

# электронная

ISSN 0207-6357

---

# промышленность

7-8/94

30 лет

ГОСУДАРСТВЕННОМУ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМУ ИНСТИТУТУ  
ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ имени Ф.В.ЛУКИНА



# НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИНСТИТУТА

Интегральные  
схемы

Датчики

Наноэлектроника

Структуры ИС

Новые технологии

Исследовательско-  
технологический  
центр с  
синхротроном

Моделирование

Анализ спектра  
проблем микро-  
и наноэлектроники

Прецизионный  
эксперимент

Теория



1964—1994 гг.

Государственный научно-исследовательский  
институт физических проблем  
имени Ф.В.Лукина



**ЛУКИН ФЕДОР ВИКТОРОВИЧ**

(1908 — 1971 гг.)

Профессор, доктор технических наук, крупный специалист в области радиотехнических и вычислительных систем, организатор микроэлектронной отрасли, первый директор Научно-производственного объединения «Научный центр», в которое входил НИИ физических проблем

Государственный научно-исследовательский институт физических проблем им. Ф.В.Лукина (НИИФП) образован в 1964 году в составе комплекса институтов и опытных заводов г. Зеленограда с целью поиска, исследования и разработки новых направлений микроэлектроники. Этим НИИФП существенно отличается от других промышленных НИИ.

Идея создания в Зеленограде крупной микроэлектронной индустрии и разноплановых институтов, включая НИИФП, и крупной научно-технологической базы принадлежит выдающемуся организатору электронной промышленности и ее руководителю на протяжении 20 лет — министру Александру Ивановичу Шокину.

Становление и формирование НИИФП протекало динамично в ходе решения возникающих актуальных проблем микроэлектроники. Личный состав Института подбирался нетрадиционно, включая теоретиков, физиков-экспериментаторов, биологов, специалистов по различным видам технологии, схемотехников и конструкторов. В результате выполнения обширных исследований и разработок были созданы оригинальные электронные приборы, структуры, технологические процессы, заложены научные основы ряда перспективных направлений. Приборно-технологические разработки передавались для освоения на промышленные предприятия различных отраслей, а в ряде случаев, когда требовалась быстрая реализация в виде конкретной продукции, вместе с коллективами исполнителей на другие предприятия.

Накопленный значительный научный потенциал и экспериментальная база, в том числе с развивающимся физико-технологическим центром, содержащим уникальное аналитическое оборудование и синхротрон, позволяют Институту проводить работы в направлениях, соответствующих общемировым тенденциям развития электроники, создавать образцы новых приборов и устройств, а также выпускать небольшими партиями изделия, имеющие значение товара для народного хозяйства, решения задач экологии, промышленной и бытовой электроники.

Структура Института, в зависимости от актуальности долговременной тематики и плановых заданий, определенным образом претерпевала изменения и в настоящее время состоит из научных отделов, лабораторий, секторов и вспомогательных подразделений.

На протяжении многих лет НИИФП имеет широкие творческие связи с институтами Академии наук и вузами. Сотрудниками Института подготовлено и защищено более 30 докторских и свыше 200 кандидатских диссертаций, ежегодно публикуется более 200 научных трудов, подаются десятки заявок на изобретения, многие сотрудники активно участвуют в работе ряда отраслевых академий, международных и региональных конференций. Некоторые сотрудники получают приглашения в иностранные институты и фирмы для проведения совместных исследований и чтения лекций.

В Национальной программе развития электроники России НИИФП отведено значительное место, особенно по научному заделу в микро- и наноэлектронике.

Коллектив Института в основной своей массе специалистов и ученых, несмотря на трудный переходный период в экономике страны, продолжает целеустремленно работать в новых направлениях развития электроники, сохраняя традиции в достижении высокого уровня и практической значимости работ.

Государственный научно-исследовательский институт физических проблем им. Ф.В.Лукина образован в 1964 году на этапе зарождения микроэлектроники в России. Прошедшие 30 лет подтвердили значимость поисковых и прикладных исследовательских работ Института в новых перспективных направлениях развития микроэлектроники. Приборно-технологические разработки передаются для промышленного освоения на многие предприятия различных отраслей.

Сейчас Институт работает по важному направлению «продвинутой» субмикронной технологии с минимальными топологическими размерами 0,3–0,1 мкм, основанной на совершенствовании и прецизионности исполнения современной технологии и традиционном представлении о функциональных возможностях электронных элементов.

Особое значение приобретают работы по нанотехнологии с минимальными размерами 300–10 нм с использованием разработанных принципов формирования самоорганизующихся структур и сильного, функционально сложного взаимодействия элементов этих структур при малом «счетном» числе носителей заряда. В этих работах особо важное место отведено создаваемому аналитическому и технологическому комплексу с синхротронным источником. Накопленный значительный научный потенциал и развивающаяся экспериментальная база явились основанием для присвоения институту статуса «Государственного научного центра Российской Федерации», что налагает на нас особую ответственность по дальнейшему развитию эффективной деятельности Института.



*Н.С.Самсонов, профессор,  
директор Государственного НИИ  
физических проблем им. Ф.В.Лукина*

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'N.S. Samsonov'.

СОДЕРЖАНИЕ

Прошлое и настоящее Института: спектр работ и люди. *Борисов Б.С., Полторацкий Э.А., Сретенский В.Н.* . . . . . 8

Информационный потенциал и микроэлектроника: тенденции развития. *Васенков А.А., Сретенский В.Н., Юдинцев В.А.* . . . . . 17

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Молекулярная электроника и молекулярно-инженерная технология: пути становления. *Айрапетянц С.В.* . . . . . 26

О взаимосвязи биоэлектроники и квантовой метрологии. *Банников В.С.* . . . . . 34

Нейроинформатика и нейронные сети. *Атаманчук Л.М., Петров А.А.* . . . . . 37

О фундаментальных исследованиях нелинейных эффектов. *Елеонский В.М.* . . . . . 42

Нелинейная магнитодинамика в пленках. *Попков А.Ф.* . . . . . 43

Управление процессами самоорганизации в диссипативных системах. *Борисов Б.С., Борисов А.Г., Калюжная В.Г., Корсаков В.С., Панюков М.Е., Плавич Л.А.* . . . . . 46

**НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

Атомарные запоминающие среды. Пути реализации проблемы. *Емельянов А.В., Полторацкий Э.А., Портнов С.М., Рябоконт В.Н., Самсонов Н.С.* . . . . . 50

Принцип объемно-структурного соответствия фаз и формирование элементов в микро- и нанoeлектронике. *Емельянов А.В., Портнов С.М.* . . . . . 54

Методы формирования и исследования пленок Ленгмюр-Блоджетт и молекулярная нанотехнология. *Быков В.А.* . . . . . 59

**ПРИБОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ**

Особенности развития интегральных схем на арсениде галлия. *Полторацкий Э.А., Ильичев Э.А., Рычков Г.С.* . . . . . 65

Опыт по созданию приборов с зарядовой связью. *Тишин Ю.И., Зимогляд В.А.* . . . . . 69

Линейные фотоприемники на ПЗС с большим числом элементов разложения. *Сафонов А.Г., Тишин Ю.И., Лепендин А.В., Глухов Ю.Ф.* . . . . . 75

Высокостабильные интегральные ПТ-сквиды: конструкция, характеристики, области применения. *Масалов В.В., Зубков А.А., Самусь А.Н., Гудков А.Л.* . . . . . 77

Цифровые интегральные схемы на джозефсоновских переходах. *Гудков А.Л., Зубков А.А., Масалов В.В.* . . . . . 84

Вакуумная микроэлектроника на базе наноразмерных автоэлектронных катодов. *Махов В.И.* . . . . . 93

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕРИАЛЫ**

От субмикронной к нанотехнологии. *Боков Ю.С., Борисов Б.С., Ракитин В.В., Самсонов Н.С.* . . . . . 99

Синхротронное излучение и проблемы субмикронной технологии. *Мазуренко С.Н., Самсонов Н.С.* . . . . . 103

Методы субмикронной фотолитографии. *Боков Ю.С.* . . . . . 109

Мембранные микроконструкции на основе прецизионной технологии микроэлектроники. Акулова Г.В., Корсаков В.С., Мазуренко С.Н., Мишачев В.И., Николаева Л.П., Самсонов Н.С., Семенихина Л.А., Трутнев Н.Ф. . . . .	113
Проводящие полимеры — конструкционные материалы микроэлектроники и электротехники. Корсаков В.С., Максимов С.И., Плавич Л.А., Трутнев Н.Ф., Новиков В.И., Тимофеев С.В., Мазуренко С.Н., Самсонов Н.С., Ефимов О.Н., Зуева А.Ф., Лачинов А.Н., Золотухин М.Г., Захидов А.А., Карпачева Г.П. . . . .	118
Высоковольтная электронно-лучевая литография для изготовления структур ультраСБИС. Белиовский А.Е., Корсаков В.С., Мартынов В.В. . . . .	124
Высокоэнергетическая ионная имплантация: оборудование и технология. Авдиенко А.А., Шокин А.Н. . . . .	127
Сополимеры акрилового ряда — высокочувствительные рентгенорезисты. Новожилов А.В., Корсаков В.С., Максимов С.И. . . . .	132
<b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ</b>	
Математическое моделирование процессов субмикронной и нанотехнологии. Кустов В.Л. . . . .	135
Программное обеспечение для моделирования приборно-технологического базиса СБИС. Ракитин В.В., Филиппов Е.И. . . . .	146
Математическое моделирование фотолитографических процессов при применении фазосдвигающих шаблонов. Никитин А.В. . . . .	150
Подход к моделированию процесса рентгенолитографии в пучках синхротронного излучения. Мазуренко С.Н., Мануйлов В.В., Матвеев В.М. . . . .	153
<b>ПРЕЦИЗИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И МЕТРОЛОГИЯ</b>	
Систематизация и направления развития прикладной метрологии в электронике. Сретенский В.Н. . . . .	158
Метод прецизионных измерений субмикронных и нанометровых объектов в РЭМ. Аммосов Р.М., Козлитин А.И., Никитин А.В. . . . .	163
Новый сканирующий туннельный микроскоп и его применение при исследовании молекулярных пленок. Быков В.А., Беляев А.В., Еремченко М.Д., Жижимонтов В.В., Иконников А.В., Кацур С.Ф., Редченко В.В., Саунин С.А. . . . .	168
Исследование методами ВИМС и оже-спектроскопии эффектов десорбции. Борисов Б.С., Залялютдинов М.К., Кириленко Е.П., Трифонов А.Ю. . . . .	172
Оперативный контроль технологических сред и поверхностей полупроводников. Безручко С.М., Кузьмин С.В., Саунин С.А., Абраменко Ю.М., Кузьмин С.М. . . . .	176
Особенности обработки экспериментальных данных при высокоточных измерениях. Антонюк А.Д., Дьяченко А.Г., Скорик В.А. . . . .	180
Микроэлектронные газоаналитические приборы широкого применения. Березкин В.А., Борзов Е.И., Качуровский Ю.Г., Шокин А.Н., Шкуронат И.Г. . . . .	182
Установка оперативного контроля микронных и субмикронных размеров. Кокин С.А., Тишин Ю.И. . . . .	186
Изобретательская деятельность. Садовой В.А. . . . .	188

**CONTENTS**

History and present day of the Institute: spectrum of work and people. <i>Borisov B.S., Poltoratsky E.A., Sretensky V.N.</i> . . . . .	8
Information potential and microelectronics: trends of development. <i>Vasenkov A.A., Sretensky V.N., Yudinsev V.A.</i> . . . . .	17
<b>FUNDAMENTAL STUDIES</b>	
Molecular electronics and molecular engineering technology: ways of formation. <i>Airapetyants S.V.</i> . . . . .	26
On the interconnection of bioelectronics and quantum metrology. <i>Bannikov V.S.</i> . . . . .	34
Neuroinformatics and neural network. <i>Atamantchuk L.M., Petrov A.A.</i> . . . . .	37
On the fundamental studies of nonlinear effects (brief review). <i>Eleonsky V.M.</i> . . . . .	42
Nonlinear magnetodynamics in films. <i>Popkov A.F.</i> . . . . .	43
Processes of selforganization in dissipative systems. <i>Borisov B.S., Borisov A.G., Kalyuzhnaya V.G., Korsakov V.S., Panyukov M.E., Plavitch L.A.</i> . . . . .	46
<b>NANOELECTRONICS</b>	
Atomic memory media. Approaches to problem solutions. <i>Emelyanov A.V., Poltoratsky E.A., Portnov S.M., Ryabokon V.N., Samsonov N.S.</i> . . . . .	50
Principles of volume-structure phases conformity and forming elements in micro- and nanoelectronics. <i>Emelyanov A.V., Portnov S.M.</i> . . . . .	54
Methods of forming and studying Langmuir-Blodgett films and molecular nanotechnology. <i>Bykov V.A.</i> . . . . .	59
<b>DEVICE RESEARCH AND DEVELOPMENT</b>	
Development peculiarities of GaAs ICs. <i>Poltoratsky E.A., Elyitchev E.A., Rytchkov G.S.</i> . . . . .	65
Experience of creating CCD. <i>Tishin Yu.I., Zimoglyad V.A.</i> . . . . .	69
Linear CCD light serisors with large number of decomposition elements. <i>Safonov A.G., Tishin Yu.I., Lependin A.V., Glukhov Yu.F.</i> . . . . .	75
High stable integrated DC SQUIDS: constructions, performances, applications. <i>Masalov V.V., Zubkov A.A., Samus' A.N., Gudkov A.L.</i> . . . . .	77
Digital ICs on Josephson junctions. <i>Gudkov A.L., Zubkov A.A., Masalov V.V.</i> . . . . .	84
Vacuum microelectronics based on field-emission cathodes of nanometer size. <i>Makhov V.I.</i> . . . . .	93
<b>TECHNOLOGY STUDIES, EQUIPMENT, MATERIALS</b>	
From submicron- to nanotechnology. <i>Bokov Yu.S., Borisov B.S., Rakitin V.V., Samsonov N.S.</i> . . . . .	99
Synchrotron radiation and problems of submicron technology. <i>Mazurenko S.N., Samsonov N.S.</i> . . . . .	103
Techniques of submicron photolithography. <i>Bokov Yu.S.</i> . . . . .	109



Membrane microconstructions based on precision microelectron technology. <i>Akulova G.V., Korsakov V.S., Mazurenko S.N., Mishachev V.I., Nikolaiva L.P., Samsonov N.S., Semenikhina L.A., Trutnev N.F.</i> . . . . .	113
Conducting polymers as construction materials for microelectronics and electroengineering. <i>Korsakov V.S., Maksimov S.I., Plavitch L.A., Trutnev N.F., Novikov V.I., Timofeev S.V., Mazurenko S.N., Samsonov N.S., Efimov O.N., Zueva A.F., Latchinov A.N., Zolotukhin M.G., Zakhidov A.A., Karpatcheva G.P.</i> . . . . .	118
High voltage electron-beam installation for lithography. <i>Beliovsky A.E., Korsakov V.S., Martynov V.V.</i> . . . . .	124
High energy ion implantation: equipment and technology. <i>Avdienko A.A., Shokin A.N.</i> . . . . .	127
Acryl-like copolymers – high sensitiv x-ray resists. <i>Novozhylov A.V., Korsakov V.S., Maximov S.I.</i> . . . . .	132
<b>MATHEMATICAL AND PHYSICAL MODELLING</b>	
Mathematical modelling submicron-nanotechnology processes. <i>Kustov V.L.</i> . . . . .	135
Software for modelling VLSI: device and technology. <i>Rakitin V.V., Philippov E.I.</i> . . . . .	146
Mathematical modelling using phaseshifting masks. <i>Nikitin A.V.</i> . . . . .	150
Approach to modelling x-ray lithography processes using synchrotron radiation. <i>Mazurenko S.N., Manuilov V.V., Matveev V.M.</i> . . . . .	153
<b>PRECISION EXPERIMENT AND METROLOGY</b>	
Systematization and development direction of applied metrology in electronics. <i>Sretensky V.N.</i> . . . . .	158
Precision technique for submicron- and nanometer SEM measurements. <i>Ammosov R.M., Kozlitin A.I., Nikitin A.V.</i> . . . . .	163
New STM and some of its applications for research of molecular films. <i>Bykov V.A., Belyaev A.V., Eremtchenko M.D., Zhyzhymontov V.V., Ikonnikov A.V., Katsur S.F., Redtchenko V.V., Saunin S.A.</i> . . . . .	168
Research of desorption effects using SIMS and Auger-spectroscopy. <i>Borisov B.S., Zalyalyutdinov M.K., Kirilenko E.P., Trifonov A.Yu.</i> . . . . .	172
Operative control of technology media and surfaces. <i>Bezrutchko S.M., Kuzmin S.V., Saunin S.A., Abramenko Yu.M., Kuzmin S.M.</i> . . . . .	176
Peculiarities of experimental data processing in case of high precision measurements. <i>Antonyuk A.D., Dyachenko A.G., Skorik A.V.</i> . . . . .	180
Microelectron gas analysis devices of wide application. <i>Beriozkin V.A., Borzov E.I., Kachurovsky Yu.G., Shokin A.N., Shkuropat I.G.</i> . . . . .	182
Facility for operative control of micron and submicron dimensions. <i>Kokin S.A., Tishin Yu.I.</i> . . . . .	186
Creative activity. <i>Sadovoy V.A.</i> . . . . .	188

# Прошлое и настоящее Института: спектр работ и люди

Б.С.БОРИСОВ, Э.А.ПОЛТОРАЦКИЙ, В.Н.СРЕТЕНСКИЙ

**Историю Института определяют творчество сотрудников, лидеры научных направлений и целеустремленная работа всего коллектива — все это было типичным для НИИ физических проблем.**

НИИ физических проблем создавался как институт электронной промышленности в интересах развития физико-технологического базиса новых поколений изделий микроэлектроники — основы электронно-вычислительной техники, систем обработки, передачи и хранения информации, аппаратуры и систем управления и автоматизации подвижных объектов.

В задачи Института входило проведение теоретических и экспериментальных исследований, создание прототипов приборов и устройств, необходимых новых технологических процессов и оборудования, анализ общемировых научных достижений в области микроэлектроники.

В период 1963—1989 гг. Институт входил в состав Научного центра, представляющего комплекс научно-исследовательских институтов и опытных заводов. Первым директором Центра был Федор Викторович Лукин, при непосредственном участии которого создавался Институт и закладывались основы отечественной микроэлектроники.

Пройденный Институтом путь можно представить поэтапно в виде условных периодов, охваченных в целом своеобразной эволюционной цепью, отражающей общий процесс развития микроэлектроники и прилегающих к ней областей науки и техники.

**1-й период (1964—1970 гг.)** характеризуется поиском направлений исследований, которые могут существенно повлиять на развитие вычислительных и информационных устройств и систем.

В Институте было сформировано три подразделения, занимавшихся разработкой элементной базы вычислительных машин, бионическим моделированием и решением физических задач при апробации новых идей создания микроэлектронных приборов и устройств.

Значительные усилия были направлены на поиски путей создания эффективных вычислительных сред на основе использования принципов живой природы — бионики. С этой целью создавалась специальная экспериментальная база. В качестве прототипов процессорной части изучался мозг простейших млекопитающих и некоторых видов рыб, а в качестве периферийных устройств — глаз лягушки. Крупным научным результатом этого периода явилась разработка теоретических

и опытных представлений о нейронах и нейронных сетях. Подобные бионические представления опередили направления развития вычислительных систем, именуемых в настоящее время нейрокомпьютерами, почти на 20 лет.

В 1968 г. были начаты работы по переносу мономолекулярных слоев ПАВ с поверхности воды на твердую подложку, которые явились началом освоения в НИИФП молекулярной Ленгмюр-Блонджетт технологии. В этот же период были изучены возможности создания диодной электроники на полуизоляторах, запоминающих устройств на сегнетоэлектрических кристаллах, хемотронных приборов, некоторых интегральных схем на основе германия.

Созданная в 1967—1968 гг. технологическая лаборатория под руководством С. А. Гаряинова разработала конструкции и основы технологии создания интегральных схем с полной диэлектрической изоляцией компонентов, технические решения которых были запатентованы в США, Англии, Франции, ФРГ, Италии и Швейцарии.

Существенно возросший объем работ по вычислительной технике привел к тому, что на базе отдела перспективных ЭВМ в 1969—1970 гг. было образовано самостоятельное предприятие — Специализированный вычислительный центр (СВЦ). Он положил начало развитию отечественных диалого-вычислительных комплексов и управляющих машин. Крупный вклад в это направление был внесен И. Я. Акушским, В. М. Амирбаевым, Д. И. Юдицким, А. А. Поповым, И. А. Большаковым, Ю. И. Чечериным, Э. И. Клямко, П. В. Нестеровым, В. А. Шахновым, Б. М. Малашевичем, Н. М. Воробьевым.

В начальный период работы Института характерным стилем взаимоотношений в его коллективе, состоящем из специалистов различного профиля — физиков, биологов, схемотехников, технологов, — был свободный поиск, острые дискуссии и терпимость к отрицательным результатам исследований. Все это заложило хорошую базу знаний и предопределило работы Института по научному заделу. Наибольший вклад в этот период деятельности Института был внесен В. И. Стафеевым, Д. И. Юдицким, К. К. Свидзинским, С. В. Айрапетянцем, А. А. Петровым, Э. И. Клямко, Э. Б. Ключнером, Р. А. Дуриняном, В. А. Кухтиным, А. Н. Мезенцевым, Т. А. Аджимолаевым, В. П. Сандоевским, В. И. Мурыгиным, В. А. Петрусевичем, В. В. Треером, М. К. Берестенко, Г. М. Лапиром, Е. Н. Хреновым, С. М. Безручко. В этот же период времени в Институт пришла группа теоретиков в составе Р. Ф. Казаринова, Р. А. Суриса, А. П. Лованюка, В. В. Осипова.

**2-й период (1970—1975 гг.)** связан с расширением приборной тематики, созданием технологической базы микроэлектроники и школы исследователей. Проводились, в частности, интенсивные исследования по созданию новых классов приборов: оптронов, хемотронов, магнитодиодов, разнообразных приборов, объединенных в рамках "функциональной электроники". За короткий срок были получены практически значимые результаты, которые стали передаваться в другие предприятия нетрадиционным образом — тематика передавалась вместе с коллективами специалистов. В этот период работы Института наибольший вклад был внесен В. П. Лаврищевым, Б. С. Борисовым, И. В. Варламовым, В. И. Мuryгиным, Л. Г. Гасановым, В. А. Петрусевицем, В. В. Поспеловым, Д. П. Колесниковым. Тогда же независимо от первых появившихся за рубежом работ, оформилось проведение исследований в новом направлении — молекулярной электроники под руководством В. С. Банникова, И. В. Мягкова, П. С. Сотникова, Г. П. Беннига, С. В. Айрапетянца.

**3-й период (1975—1987 гг.)** характеризовался большими усилиями Института в развитии микроэлектронной технологии и приборными разработками, пригодными для передачи в производство. Наибольший вклад в развитие технологии внесли П. Е. Кандыба, А. М. Милов, В. М. Красовский, Ю. С. Боков, Д. П. Колесников, Е. Н. Хренов, В. И. Золотарев, И. Г. Шкурпат, А. П. Алехин, М. М. Артомонов, Г. К. Чиркин, В. И. Махов, В. К. Никифоров, В. С. Корсаков, Н. Ф. Трутнев, А. П. Нагин, А. И. Мальцев, В. П. Грабчак, В. В. Минаев, В. И. Беклемишев. В развитии оптической, электронной и рентгеновской литографии большая заслуга принадлежит В. П. Лаврищеву, С. Н. Мазуренко, В. С. Корсакову, Г. А. Штейману, Г. Г. Сбежневу, З. И. Хориной.

В этот период работники Института внесли заметный вклад во многие новые для отечественной микроэлектроники направления. Была осуществлена разработка приборов с зарядовой связью, репрограммируемых энергонезависимых ЗУ, ЗУ на основе цилиндрических магнитных доменов, криоэлектронных ИС на основе эффекта Джозефсона, приборов на основе соединений  $A^{II}B^{VI}$  и  $A^{III}B^{V}$ . В приборную тематику значительный вклад был внесен В. В. Поспеловым, Е. А. Фетисовым, Е. Б. Володиным, Ю. И. Тишиным, А. И. Мальцевым, Р. З. Хафизовым, А. П. Нагиным, В. И. Маховым, Г. И. Лапиром, В. В. Масаловым, Г. К. Чиркиным, А. В. Емельяновым, Э. А. Полторацким, У. А. Бекиревым, В. Т. Хреновым. Институтом совместно с ЦНИИС был создан первый в нашей стране участок волоконно-оптической линии связи.

В начале 80-х годов Институт передавал некоторые свои разработки заинтересованным предприятиям вместе с коллективами разработчиков. Так, в НИИТТ был передан коллектив во главе с А. И. Мальцевым, в НИИМВ — коллектив во главе с Г. К. Чиркиным, в НПО "ОРИОН" — коллектив в составе А. М. Филачева, Е. А. Фетисова, Р. З. Хафизова, Б. И. Фукса.

Задел по ряду приборных и технологических разработок и полученные результаты исследований систематически передавались в различные организации и предприятия: в НПО "Кристалл", НПО "Восток", НПО

"Электроника", НИИ "Пульсар", НИИ "Сапфир" и завод "Ангстрем" (по микросхемам репрограммируемых ЗУ); в НПО "Плутон" и "Тантал" (по технологии холодных автокатодов); в НПО "Интеграл" и заводы "Элма", "Ангстрем" и "Микрон" (по технологии производства жидкокристаллических индикаторов); в НПО "Восток", НПО "Электрон", ПО "Сапфир", завод "Старт", КБ "Прикладная физика" (по технологии микроприборов на соединениях  $A^{II}B^{VI}$  и  $A^{III}B^{V}$ ); в ФИАН, ИРЭ, ИЗМИРАН, ИКИ, ИАЭ им. И. В. Курчатова, НПО "Вектор", НПО "Азимут" (поставлялись сверхпроводниковые структуры и датчики с переходами Джозефсона); в НПО "Электрон", "Восток", "Пульсар", ЛОМО (по многоэлементным фотоприемникам на кремниевых ПЗС). Были разработаны и изготовлены образцы сверхпроводниковых изделий — при температуре жидкого гелия — для систем раннего предупреждения о воздушных и космических объектах, а также для систем контроля за магнитным состоянием земной коры в сейсмических активных зонах и разработки нового поколения гироскопов.

В этот период был накоплен значительный научный потенциал по решению задач в следующих областях:

- физическое моделирование полупроводниковых и субмикронных технологических процессов — работы Р. А. Суриса, В. И. Рыжия, В. М. Петрова, В. А. Гергеля, Б. И. Фукса, О. В. Селляховой, Н. А. Баннова, В. Л. Кустова, Ю. С. Леонова;

- интегральная оптоэлектроника — работы Э. А. Полторацкого, А. В. Емельянова, К. К. Свидзинского, Г. С. Рычкова, У. А. Бекирева, А. А. Петрова;

- исследование нелинейных явлений в различных средах — работы В. М. Елеонского, Н. Н. Ахмедиева, А. Ф. Попкова, А. К. Звездина, Н. Н. Кировой, Н. Е. Кулагина, А. И. Попова;

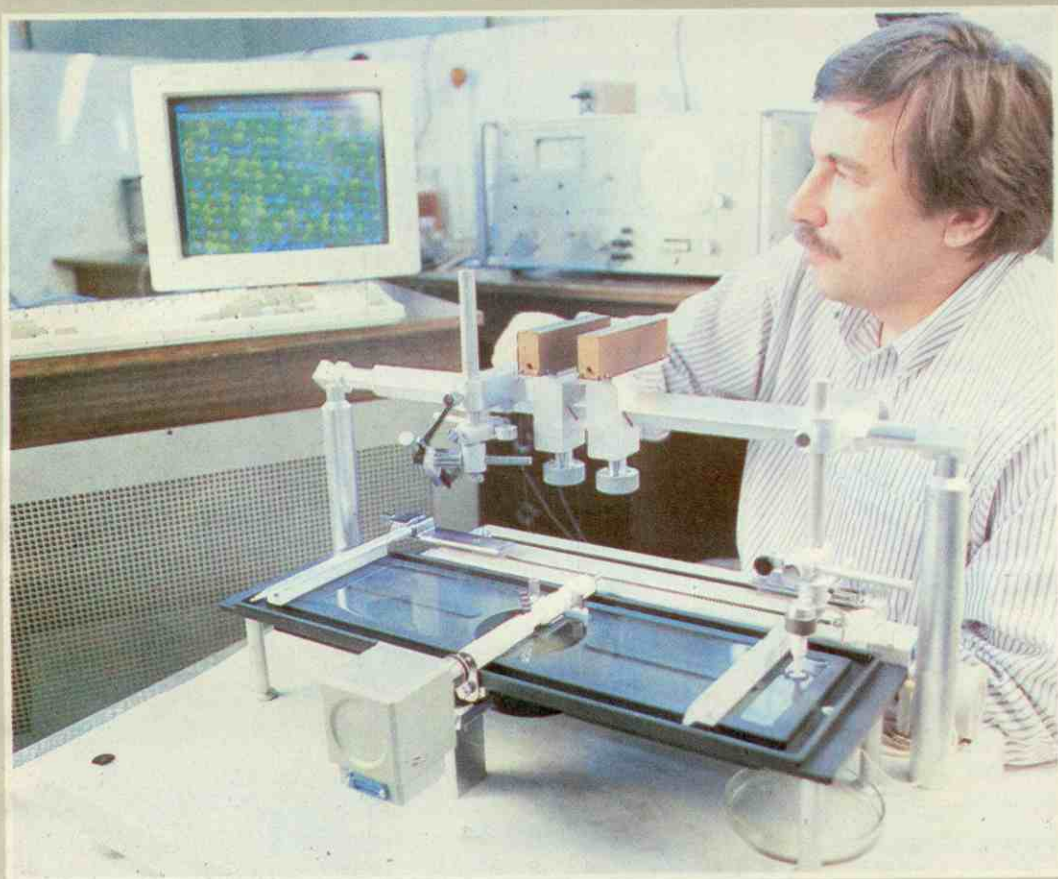
- молекулярная электроника — работы В. С. Банникова, С. М. Безручко, В. А. Быкова, П. С. Сотникова, И. В. Мягкова, С. В. Айрапетянца;

- СБИС на основе кремния, в том числе энергонезависимые ЗУ — работы В. В. Ракитина, А. П. Нагина, Ю. И. Тишина, Б. И. Седунова, В. В. Минаева, А. Г. Сафонова, А. И. Мальцева, Р. З. Хафизова, В. М. Тюлькина;

- низкотемпературная сверхпроводимость — работы В. И. Махова, П. А. Бахтина, В. В. Масалова, А. Л. Гудкова, А. Н. Самуся;

- аппаратные проработки приборов и устройств для научных исследований и народно-хозяйственного применения — работы В. А. Автономова, Б. И. Седунова, С. М. Безручко, А. А. Петрова, В. М. Гонтаря.

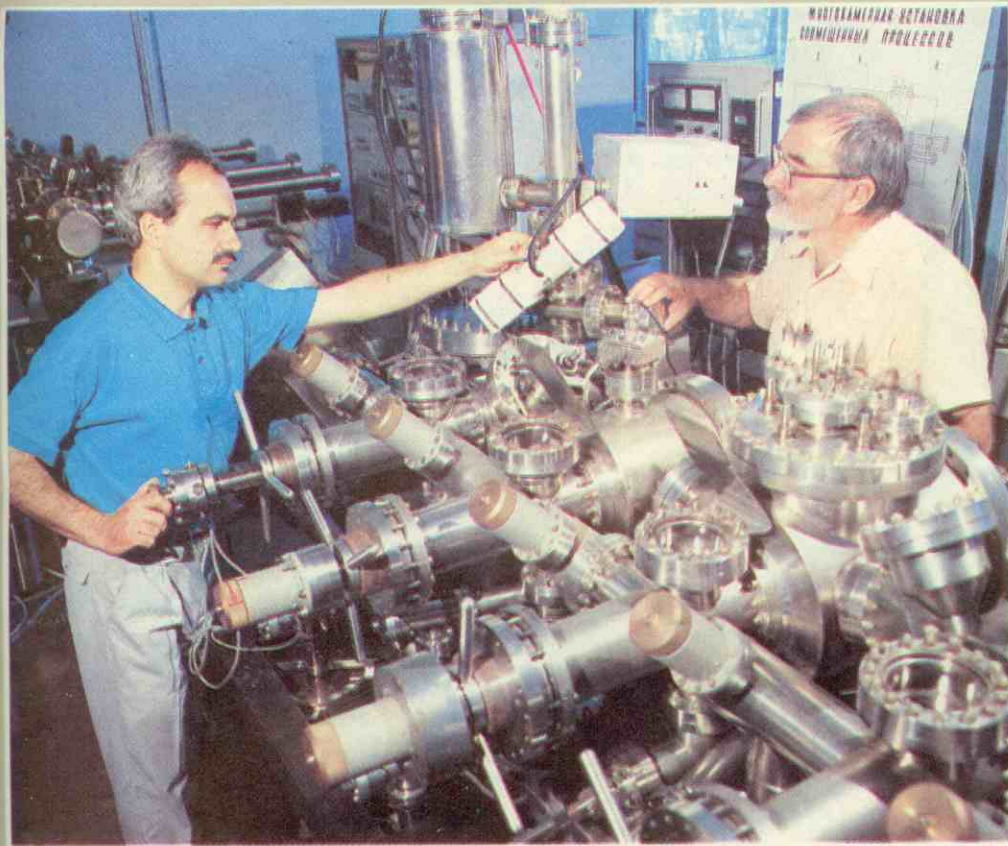
Анализ теоретических и экспериментальных исследований привел к необходимости формирования для субмикронных ИС новых видов технологии. Наиболее перспективным для этих целей оказалось использование синхротронного излучения, как для литографии, так и для диагностического контроля. В связи с этим в 1982 г. было принято решение и начато проектирование инженерно-производственного корпуса с синхротроном (ИПК) как важнейшей научно-производственной базы Института. Строительство ИПК началось в 1984 г., здание и лабораторные помещения были построены в 1986 г. Значительный вклад в решение вопросов,



Установка для нанесения и исследования пленок Ленгмюр – Блоджетт

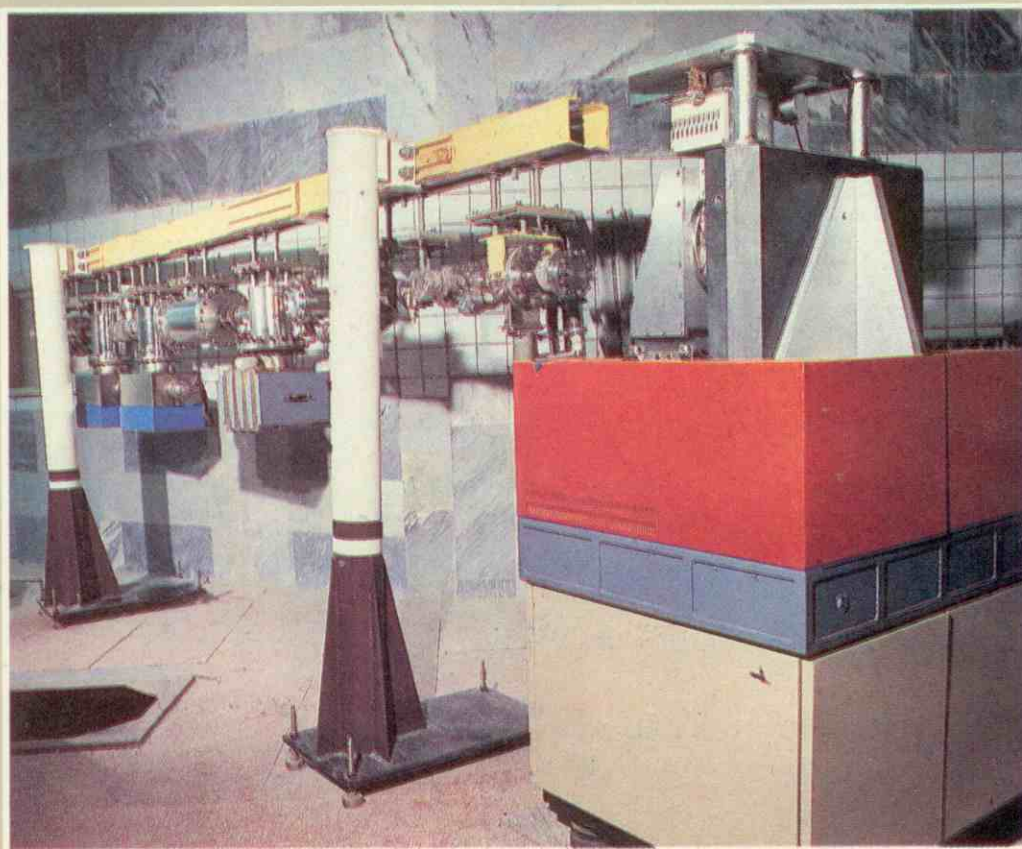
Аналитический комплекс для исследований методами вторично-ионной масс-спектрографии





Исследовательско-технологический комплекс низкотемпературных процессов для СБИС

Канал вывода синхротронного излучения для аналитических исследований и рентгенолитографии





**Виталий Иванович Стафеев**, доктор физико-математических наук, профессор. Директор НИИФП с 1964 по 1969 гг.



**Вадим Петрович Лаврищев**, доктор технических наук, профессор. Директор НИИФП с 1969 по 1981 гг.

связанных с созданием ИПК, был внесен А.А.Васенковым, С.Н.Мазуренко, Н.Ф.Трутневым, И.А.Михайловым, Н.В.Спинко, а в отношении центра аналитических исследований и автоматизации — Б.С.Борисовым и Н.В.Кузнецовым.

**4-й период (с 1987 г. — по наст. время)** — переход Института на качественно новый этап развития, связанный с продолжением фундаментальных и поисковых исследований и выполнением практических разработок, необходимых в современных условиях развития рыночных отношений.

Настоящий период в жизни Института — один из трудных в связи с общим экономическим спадом в стране. В то же время ученые Института прилагают большие усилия к поискам радикальных путей развития и применения отечественной электроники, в том числе в новом направлении — наноэлектронике.

Выполняемые в настоящее время работы Института можно объединить в следующие отдельные направления.

#### **Фундаментальные исследования:**

— изучение волновых и корпускулярных явлений в твердом теле — общая теория солитонов, самолокализованные структуры, спиновые волны, квазиодномерные полупроводники, структурные изменения в полупроводниковых системах, инициированных магнитным полем — работы *В.М.Елеонского, Н.Н.Ахмедиева, А.Ф.Попкова, Н.Н.Кировой, И.Е.Кулагина, В.М.Масловского;*

— исследование характера управления процессами самоорганизации в диссипативных системах — работы *Б.С.Борисова, В.Г.Калюжной, В.С.Корсакова, М.Е.Панюкова, Л.А.Плавич;*

— изучение потенциальных возможностей молекулярной электроники и формирование взглядов на развитие молекулярно-инженерной технологии — работы *С.В.Айрапетянца;*

— теоретические оценки исходных механизмов биоэлектроники и роль когерентных явлений — работы *В.С.Банникова;*

— исследование возможностей применения в микроэлектронике нейросетевой технологии — работы *А.А.Петрова, Л.М.Атаманчук.*

**Наноэлектроника и квантовая микроэлектроника** — новые научные и технические области электроники, основанные на использовании структур со сверхмалыми размерами туннельно-резонансных эффектов и высококогерентных явлений — потребовали проведения ряда нетрадиционных исследований в направлениях;

— выявления природы упорядоченных структур с нанометровыми размерами на поверхности и в приповерхностной области твердых тел, разработки методов модификации поверхности на атомарном уровне с применением сканирующего туннельного зонда, развития наноэлектронной элементной базы интегральных устройств на основе гетероструктур — работы *А.В.Емельянова, Э.А.Полторацкого, Н.С.Самсонова, С.М.Портнова, Г.С.Рычкова, В.Н.Рябокоть, М.О.Башкина;*

— технологических способов создания "идеальной" границы раздела сложных полупроводников с диэлектриками и металлами, разработки технологии МДП-структур на материалах  $A^{III}B^V$ , исследования структур со сложным легированием (в том числе многослойных  $\delta$ -структур) для повышения степени интеграции арсенидогаллиевых ИС, разработки оконечных интегральных устройств гигагерцевого диапазона для волоконно-оптических линий передачи информации, исследования интегральных устройств на основе резонансно-туннельных явлений в гетеропереходах — работы *Э. А. Полторацкого, А. В. Емельянова, Г. С. Рычкова, Э. А. Ильичева, У. А. Бекирева, А. Д. Михеева, Л. Н. Сидоровой;*

— развития основ молекулярной электроники, физико-химических исследований пленок Ленгмюр-Блоджетт, разработки технологии проводящих и резистивных ЛБ-пленок, жидко-кристаллических и полимерных пленок, разработки оборудования для получения и нанесения пленок — работы *В. А. Быкова, И. А. Мягкова, В. И. Троицкого, П. С. Сотникова, С. В. Айрапетянца, Н. К. Матвеевой;*

— разработки математических моделей, инженерных методов расчета и технологии микроэлектронных структур с использованием явлений низко- и высокотемпературной сверхпроводимости преимущественно на основе эффектов Джозефсона, обеспечивших создание тонкопленочных сквидов на постоянном токе, цифровых ИС на джозефсоновских переходах, СВЧ-устройств и линий связи — работы *В. И. Махова, В. В. Масалова, А. Л. Гудкова, Д. Г. Емельяненко, М. А. Забродской, А. А. Зубкова, А. Н. Самуся.*

**Приборные исследования и разработки** были посвящены:

— физико-технологическим и схмотехническим исследованиям создания прецизионных кремниевых ИС и элементной базы ДОЗУ с ориентацией на емкость до 1 Гбит, возможностей повышения быстродействия КМОП ИС при криогенных температурах — работы *В. А. Гергеля, В. В. Ракитина, Ю. И. Тишина, В. А. Зимогляда;*

— созданию приборов с зарядовой связью различного назначения — работы *Ю. И. Тишина, Б. И. Седунова, А. Г. Сафонова, В. И. Хайновского, А. В. Серебренникова;*

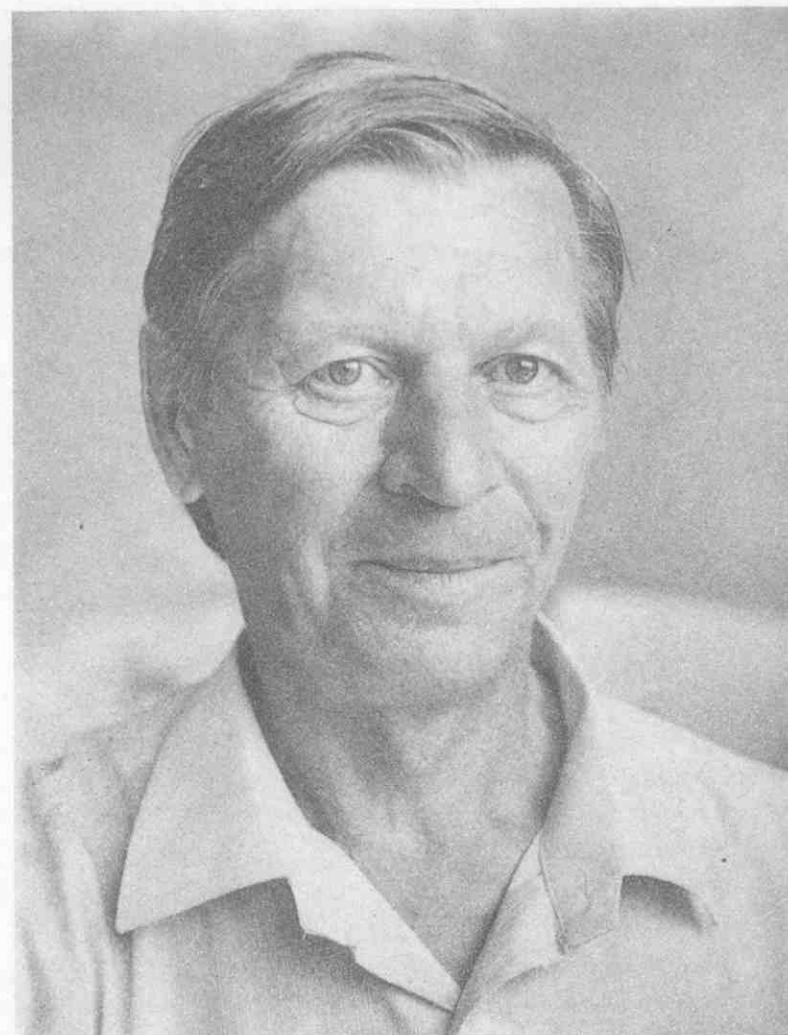
— созданию вакуумных приборов и устройств с использованием оригинальных автоэлектронных катодов с туннельно-прозрачным диэлектриком для магнетронных генераторов, катодолюминесцентных экранов и вакуумных ИС — работы *В. И. Махова, Н. А. Дюжева, А. И. Козлова, Д. В. Еремченко.*

**Технологические исследования, оборудование и материалы** потребовали привлечения больших сил и средств в связи с развитием ИС новых поколений. При этом проводились и продолжают работы в следующих направлениях:

— создания уникального исследовательского комплекса на основе синхротронного источника, обеспечивающего проведение работ по проблеме субмикронной технологии, диагностике и метрике — работы *С. Н. Мазуренко, Н. С. Самсонова, И. А. Михайлова, И. В. Спино, В. М. Матвеева, В. В. Мануйлова, Ю. М. Литвинова,*



**Александр Анатольевич Васенков**, кандидат технических наук, доцент. Директор НИИФП с 1981 по 1987 гг.



**Борис Сергеевич Борисов**, кандидат физико-математических наук, доцент. Зам. директора по научной работе — главный инженер НИИФП с 1969 по 1989 гг.



**Сергей Николаевич Мазуренко**, кандидат физико-математических наук, профессор МИЭТ. Зам. директора по научной работе — главный инженер НИИФП с 1989 г. по наст. время.

*В. И. Мишачева, В. С. Корсакова, Н. Ф. Трутнева, А. В. Новожилова, Л. П. Плавич;*

— разработки научных основ и практических средств кремниевой субмикронной технологии, включая техмаршруты СБИС на основе кластерного оборудования, способы глубокой очистки и стабилизации поверхности, плазмохимические процессы для микро-механики — работы *Ю. С. Бокова, Н. С. Самсонова, В. И. Беклемышева, А. Н. Шокина, А. П. Алехина, В. И. Золотарева, В. В. Минаева, В. В. Ракитина, Ю. И. Тишина, Л. А. Вьюкова, В. А. Энковича;*

— разработки прецизионной литографии на основе субмикронных мер линейных размеров, сухих газо-фазных методов УФ-литографии, рентгенорезистов и рентгеношаблонов — работы *А. В. Никитина, С. Н. Мазуренко, Н. Ф. Трутнева, В. С. Корсакова, А. П. Алехина, В. А. Кроткова, А. В. Новожилова, А. И. Козлитина;*

— исследования и создания полимерных материалов, обладающих уникальными свойствами и перспективными для создания полевых транзисторов и коммутирующих устройств в клавиатурах, для калькуляторов, СВЧ печей, пультов и электронных игр, а также в качестве активных элементов высоковольтных конденсаторов и химических источников тока — работы *В. С. Корсакова, С. И. Максимова, Л. А. Плавич, Н. Ф. Трутнева, В. И. Новикова, С. В. Тимофеева.* Работы

проводятся совместно с ИХФ РАН (Черноголовка), институтами Башкирского отделения РАН и Узбекской АН;

— разработки технологии и оборудования для создания приборов и структур, основанных на явлениях низко- и высокотемпературной сверхпроводимости — работы *В. И. Махова, Д. Г. Емельяненко, В. В. Масалова, А. Л. Гудкова, А. Н. Самуся, Ю. Н. Инкина, С. И. Мушкова.*

**Математическое и физическое моделирование** выполнялось в связи с решением следующих задач:

— разработки аналитических моделей и методов САПР субмикронных и нанометровых элементов ИС и приборов в целом — работы *В. А. Гергеля, В. И. Рыжия, В. В. Ракитина, Е. И. Филиппова;*

— моделирования электронных, ионных и термодиффузионных технологий — работы *В. Л. Кустова, В. М. Петрова;*

— создания нейросетевых программных средств для эмпирического моделирования и оптимизации сложных технологических процессов — работы *А. А. Петрова, Л. М. Атаманчук;*

— моделирования процессов оптической и рентгеновской литографии — работы *А. В. Никитина, С. Н. Мазуренко, В. М. Матвеева, В. М. Мануйлова.*

Разработанные при этом комплексы программ передавались в НИИТТ, НИИМЭ, НИИМП, НПО "Микропроцессор", где использовались при проектировании ИС и технологических процедур. Часть программ передавалась в НИИТМ для проведения работ по проектированию конструкции реакторов технологического оборудования.

**Прецизионный эксперимент**, определяющий достоверность новых результатов исследований, параметров разработанных приборов и технологических процессов, является систематическим видом работ Института по вопросам:

— метрологического обеспечения контрольно-измерительных средств и аналитического оборудования, анализа путей создания высокочувствительных и самокалибруемых измерительных средств на основе квантовых эффектов и микропроцессоров — работы *В. Н. Сре-тенского, А. В. Никитина, В. В. Масалова, П. А. Бахтина, А. Н. Самуся, А. Д. Антонюка, А. Г. Дьяченко;*

— разработки методов измерения субмикронных линейных размеров методами оптической и растровой электронной и дифференциально-фазовой микроскопии, элементного анализа полупроводниковых материалов, структур и технологических сред методами масс-спектрологии, оже-спектроскопии — работы *А. В. Никитина, Б. С. Борисова, К. К. Свидзинского, Р. М. Аммосова, В. В. Железнова, С. Б. Рожкова, М. К. Залялютдинова, А. Ю. Трифонова, Е. П. Кириленко;*

— исследования и разработки методов и средств экспресс-анализа чистоты технологических сред на наличие микрочастиц, биологических, органических и ионных примесей, лазерной дефектоскопии поверхности полупроводниковых пластин — работы *С. М. Безручко, С. А. Саунина, С. В. Кузьмина, О. В. Степанищева, Ю. М. Абраменко, Г. П. Бенинга, А. В. Иконникова, С. Ф. Кацура, С. М. Кузьмина.*



В ходе этих работ были изготовлены анализаторы микрочастиц в жидких и газообразных средах ЛАМ-1, ЛАМ-2, ЛАМ-4, анализаторы качества поверхности полупроводниковых пластин ЛАП-1, ЛАП-3, анализаторы органических примесей в водной среде ПАВ, Т-1, АР-1. Данные приборы широко используются на предприятиях электронной и химической промышленности, нашли применение в медицинском институте им. Н.В.Склифасовского и Академии химической защиты;

— разработки газоаналитических приборов и датчиков на основе микроэлектронной технологии — работы *В. А. Березкина, Е. И. Борзова, Ю. Г. Качуровского, А. Н. Шокина, И. Г. Шкурюпатя;*

— разработки чувствительных элементов и датчиков различного функционального назначения на основе мембранной технологии — работы *В. И. Мишачева, Н. Ф. Трутнева, В. С. Корсакова, Л. А. Семинихиной, Г. В. Акуловой, Л. П. Николаевой;*

— разработки и изготовления совместно с Харьковским ИРЭ высококогерентной аппаратуры для дистанционного контроля на миллиметровых волнах биологических и технических объектов — работы *В. С. Банникова, О. Л. Колесника;*

— разработки средств технического видения и создания автоматизированного оптического измерителя линейных размеров с субмикронным разрешением, устройств идентификации рисунка капиллярных линий с живых объектов, считывателя штриховых кодов для идентификации товаров и грузов — работы *Ю. И. Тушина, В. А. Автономова, А. Г. Сафонова, У. А. Бекирева.*

**Аналитическая работа** проводится в Институте permanently путем формирования базы данных о состоянии и тенденциях развития микроэлектроники и прилегающих к ней областей науки и техники, разработки методов прогноза, проведения оценок технического уровня микроэлектронных приборов, технологий и контрольно-измерительных средств — работы *А. А. Васенкова, Б. С. Борисова, Р. А. Суриса, Б. С. Данилина, В. Н. Сретенского, Г. Н. Соколовой, С. Т. Карецкой, В. А. Юдинцева, Т. И. Стариковой.*

НИИ физических проблем работал по ряду крупных общегосударственных научно-технических программ: "Память", ЭВМ "Эльбрус" и "Ряд", "Гамбит", "Видение", "Субмикронная технология".

В настоящее время Институт работает по следующим важным для современного этапа развития отечественной электроники программам:

— "Создание перспективной элементной базы и технологии микро- и нанoeлектроники";

— "Физика твердотельных наноструктур";

— "Высокотемпературная сверхпроводимость";

— "Молекулярные и биомолекулярные наноструктуры";

— "Синхротронное излучение, лучевые применения";

— "Плоские информационные экраны".

В 1991 г. начато создание исследовательско-технологического и аналитического центра с использованием синхротронного излучения. Центр располагает уникальным исследовательским и технологическим оборудова-

нием для развития фундаментальных дисциплин, разработки новых технологий и материалов нано- и микроэлектроники, включая биотехнологию и медицинские средства диагностики и лечения.

Многие годы Институт поддерживает творческие связи с ведущими институтами и вузами: ИОФАН, ФИАН, ЛФТИ АН, ИКАН, ФТИАН, ИФСОАН, ИРЭ АН, а также МИЭТ, МФТИ, МИФИ, МИТХТ, многими институтами СНГ. Институт имеет базовую кафедру "Микроэлектроника" в МФТИ, которая образована в 1966 г., и с 1990 г. — кафедру "Субмикронная и молекулярная технология" в МИЭТ.

В Институте совместно с ведущими учеными страны проводятся семинары, Лукинские чтения, расширенные заседания специалистов по актуальным вопросам микроэлектроники. Многие сотрудники избраны в специализированные академии: Международную академию информатизации (Н. С. Самсонов, В. Н. Сретенский, А. А. Васенков), Академию инженерных наук (А. В. Емельянов, Н. С. Самсонов), Метрологическую академию РФ (В. Н. Сретенский). В Институте в настоящее время работает 11 докторов наук (В. М. Елеонский, А. В. Емельянов, Н. Е. Кулагин, В. И. Махов, А. В. Никитин, Н. Н. Кирова, Э. А. Полторацкий, А. Ф. Попков, Г. С. Рычков, Н. С. Самсонов, В. Н. Сретенский) и 109 кандидатов наук, среди которых профессора, доценты, заслуженные деятели науки и техники, лауреаты.

В Институте работали известные ученые: М. И. Елинсон, Р. А. Сурис, В. И. Рыжий, А. К. Звездин, И. В. Варламов, В. В. Поспелов, Н. Н. Ахмедиев, В. А. Гергель. Все они внесли значительный научный вклад в развитие микроэлектроники и оказали существенную помощь в формировании научных подразделений, которые характеризуют особый стиль деятельности и творчества.

По результатам работ Института было подготовлено и защищено 30 докторских и более 200 кандидатских диссертаций. В настоящее время создан специализированный совет по защите докторских и кандидатских диссертаций по специальностям:

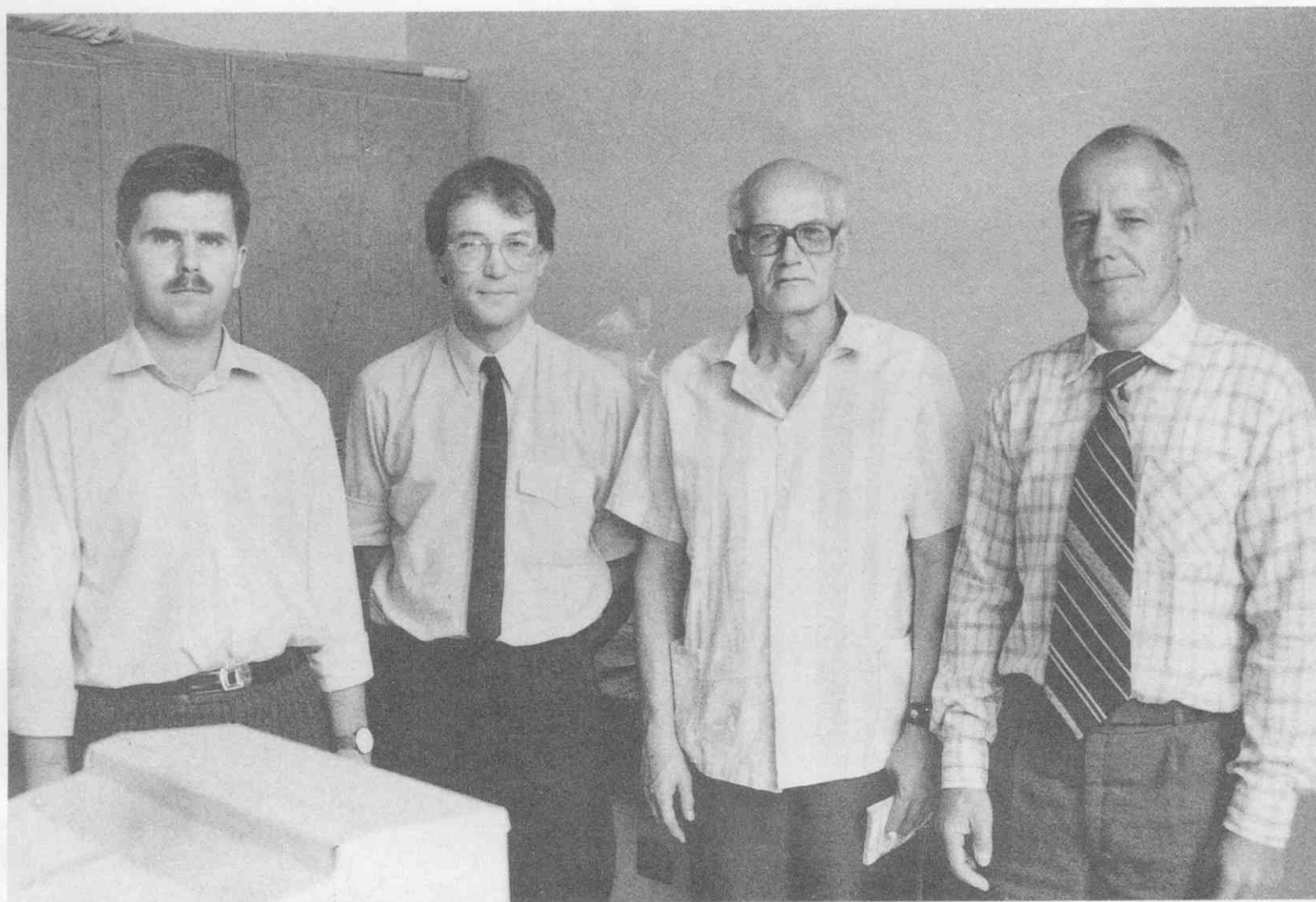
— "Твердотельная электроника, микроэлектроника";

— "Технология полупроводников и материалов электронной техники";

— "Химия, физика и технология поверхности".

Научно-технический совет Института и его девять секций в своей работе, кроме традиционных обязанностей, значительное внимание уделяет анализу результатов проводимых исследований, методологии разработок и их практической значимости, периодической аттестации научных сотрудников.

Ученые Института опубликовали более 20 монографий, ежегодно печатают около 200 научных статей в ведущих журналах страны, и отраслевых сборниках, участвуют в международных и общероссийских конференциях, активно занимаются изобретательской работой. Их труды часто цитируются в отечественных и зарубежных научно-технических изданиях. Многие ученые получают приглашения для чтения лекций за границей, являются членами редколлегии научных журналов, занимаются общественной деятельностью и популяризацией научных достижений. Все это поддерживает творческую атмосферу в коллективе Института.



**Стипендиаты Государственных научных стипендий РФ (слева направо)**

**С.М.Портнов, канд. физ.-мат. наук; А.Ю.Трифонов, канд. физ.-мат. наук;  
А.В.Никитин, д-р физ.-мат. наук; А.Ф.Попков, д-р физ.-мат. наук**

На протяжении 30 лет директорами НИИ физических проблем были В.И.Стафеев (1964–1969 гг.), В. П. Лаврищев (1969–1981 гг.), А.А.Васенков (1981–1987 гг.) и Н.С.Самсонов (с 1987 г.). Временное исполнение обязанностей директора Института в начальный период возлагалось на Д.И.Юдицкого. Продолжительное время заместителем директора по научной работе — главным инженером был Б.С.Борисов (с 1969 по 1989 г.), а с 1989 г. — С.Н.Мазуренко. Значительный вклад в работу Института внесен не только научными сотрудниками, но и хозяйственными руководителями, лаборантами, рабочими и служащими. В различные периоды деятельности Института многое было сделано активными членами коллектива — от ушедших на заслуженный отдых и до работающих в настоящее время Г.В.Артамоновой, В.С.Беляковым, Н.А.Богатыревым, Н.М.Варламовой, Н.М.Воробьевым, Т.Р.Ершовой, Н.П.Ершовым, Е.Н.Дерябиной, О.Н.Карасевым, И.Г.Ковкуто, А.Н.Косолаповым, С.И.Кочергиным, Б.Н.Князевым, П.И.Красновым, П.С.Логвиненко, И.И.Майоровым, Т.Н.Макаровой, Н.В.Медуновым, С.Г.Мигалиным, П.В.Мосаковским, Л.К.Мушкетовой, Ю.А.Ногтиковой, Е.Ф.Панюковым, В.Ф.Парфеновым, Т.С.Перегудовой, В.В.Пироговой, В.А.Садовым, Е.Ф.Семянниковым,

Е.М.Сидоровым, А.П.Скрипниковым, З.И.Смирновой, А.А.Соколовым, Б.Н.Табаченковым, А.В.Тепляковой, В.И.Трифоновым, Н.П.Филипповым, И.И.Шаболдо.

30-летний опыт работы показал, что для НИИ физических проблем ориентация на широкий спектр исследований позволяет более правильно принимать решения при выборе направлений работ по научному заданию с целью создания электронных приборов новых поколений. Это также способствует выполнению конкретных разработок, необходимых для практики и производства. Государственный НИИ физических проблем имени Ф.В.Лукина располагает высоким научным потенциалом, уникальной физико-технологической базой и опытным производством. Все это позволяет проводить исследования в области развития новых технологий, создания новейших приборов и структур, выполнять разработки уникальных приборов и устройств народно-хозяйственного назначения.

В 1994 г. Государственному НИИ физических проблем им. Ф.В.Лукина присвоен статус Государственного научного центра Российской Федерации, что открывает новые перспективы в деятельности его коллектива.

# Информационный потенциал и микроэлектроника: тенденции развития

А.А.ВАСЕНКОВ, В.Н.СРЕТЕНСКИЙ, В.А.ЮДИНЦЕВ

Ретроспективный анализ и оценка информационного потенциала, которым располагает мировое сообщество, позволяют рассмотреть динамику прогресса в области микроэлектроники, включая нетрадиционные направления.

## Введение

За 30-летний период деятельности в НИИ физических проблем сформировался подход к аналитической работе по изучению тенденций и закономерностей развития микроэлектроники и выявлению ее приоритетов в интересах определения тематической направленности проведения фундаментальных и поисковых работ. В Институте исследованиям по научному заделу всегда придавалось первостепенное значение, так как это соответствовало его статусу разрабатывать физико-технологические основы новых направлений и приборов, которые в будущем предполагалось осваивать в производстве.

Высокие общемировые темпы развития микроэлектроники (технологии и производства) и условия ограниченных материальных и финансовых ресурсов в России не позволяют отечественной промышленности включиться в равноправную конкурентную борьбу с США и Японией за рынок микроэлектронной продукции. Требуется нахождение своей «ниши» деятельности в области микроэлектроники, которая была бы достаточна для разработки и выпуска современной радиоэлектронной аппаратуры, приборов и ЭВМ, исходя из потребностей формирующегося внутреннего рынка, а также обеспечивала бы сохранение высокого научно-технического потенциала для будущих времен экономического процветания государства.

Предлагаемый ниже анализ касается результатов изучения характера развития информационного потенциала, основанного на достижениях электроники и прежде всего микроэлектроники. При этом затрагиваются возможности электроники для накопления, обработки и считывания информации, без учета вопросов ее передачи и приема. Главным при рассмотрении ин-

формационного потенциала принимается динамика изменения элементной и функциональной сложности радиоэлектронных устройств, закономерности в развитии производства интегральных схем и оценка альтернатив в электронных приборах и системах с возрастающими информационными возможностями.

## 1. Рост сложности в информационной сфере

Общепризнано, что развитие в природе и технике идет от простого к сложному. Этот саморегулирующийся процесс является результатом стремления к более совершенному и расширенному действию в условиях естественного отбора и приспособления к потребностям практики.

Обсуждая аспекты развития в технике, необходимо обратить внимание на проявление закона роста сложности информационных систем. Этот закон проявляется в виде равенства (точнее пропорциональности) приращения показателя сложности (например, числа активных элементов или функций) от времени самому показателю сложности.

Закон имеет определенные границы действия, характерные для наиболее высоких темпов развития. В целом же для каждого класса систем справедлива математическая зависимость логистического типа. Когда эта зависимость достигает пологой части, тогда наступает период морального старения и непригодности ее для решения прогрессивных задач. В период исчерпания возможностей дальнейшего развития рассматриваемой информационной системы, как правило, появляются новые решения. На участке наиболее высоких темпов развития новой системы вновь начинает действовать закон развития и, таким образом, для устойчивых направлений техники (электроники, авиации и т.п.) выполняется закон роста сложности.

Подходы к анализу развития информационных (интеллектуальных) и энергетических (силовых) систем различные. Для информационных систем, основой которых является электроника, учитывая триединство вещества (массы,  $m$ ) энергии ( $E$ ) и количества информации ( $J$ ), наи-

Энергетика и быстродействие ИС и нейронов

Ячейка памяти	Импульсная мощность, Вт	Время цикла, с
ИС	$10^{-5}-10^{-2}$	$10^{-9}-10^{-5}$
Нейрон	$10^{-9}$	$(1-5) \cdot 10^{-3}$

большая эффективность достигается при условии  $m, E \rightarrow \min$  и  $J \rightarrow \max$ . Для энергетических систем электроники функционалы  $m, E$  и  $J$  распадаются на две типичные категории  $E, \eta \rightarrow \max$  и  $m, J \rightarrow \text{var}$ , где  $\eta$  — коэффициент полезного действия.

В обобщенном и достаточно абстрактном виде количественное значение минимакса в триединстве массы, энергии и информации раскрывается пределом Бремерманна [1], характеризующего при массе вещества 1 г за время 1 с функциональной емкостью  $1,36 \cdot 10^{47}$  бит.

Таким образом, не задаваясь путями реализации технических устройств и не обсуждая известные физические ограничения, можно на примере предела Бремерманна судить об огромных неиспользованных резервах электроники в информационном отношении. Техника наших дней как бы компенсирует информационный «голод» массовостью применения изделий электроники. Можно приближенно оценить объемы информации, которыми располагает человечество при использовании только перспективных полупроводниковых изделий электронной техники (электротехнические и механические устройства опускаются по причине их больших массогабаритных характеристик и малого быстродействия). Будем ориентироваться на интегральные схемы высокой сложности (БИС и СБИС), как изделия высокоинформативные в миниатюрном исполнении. Полагаем, что в настоящее время в передовых в научно-техническом отношении странах с населением около 500 млн. человек в среднем на одного человека выпускается в год 100 микросхем со значением информационной емкости порядка  $10^5$  бит. Отсюда  $J_{\Sigma}$  информационная емкость равна  $5 \cdot 10^8 \cdot 10^2 \cdot 10^5 = 5 \cdot 10^{15}$  бит, а при быстродействии, определяемом тактовой частотой 100 МГц, сопоставимое по размерности число информационной способности с числом Бремерманна будет достигать  $5 \cdot 10^{23}$  бит в секунду. Таким образом, до уровня числа Бремерманна имеется разрыв по информационной способности более 20 порядков. При этом масса кремния в кристаллах (материал наиболее распространенный в ИС) составляет 10000 тонн, т.е. по массе также имеется разрыв от предельных возможностей около 10 порядков.

Интересно заметить, что информационные возможности человеческого мозга, определяемые согласно данным фирмы Тексас Инструментс и университета Корнеги—Меллона количеством  $10^9-10^{10}$  нейронов и  $10^{14}$  синапсов (межсоединений) [2], могут быть сопоставимы с возможностями интегральных схем (табл. 1).

Отсюда видно, что биологическая система обладает существенно меньшей потребляемой энергией и уступает технической системе по быстродействию. Мозг человека при массе 1 кг соизмерим по сложности и информационной способности 100 суперЭВМ (типа Gray-2), т.е. для переноса этих возможностей в техническую

сферу в части миниатюризации имеются большие возможности. Правда, нам до сих пор неизвестен механизм работы мозга и уникальные характеристики нейрона, созданного природой вдалеке от квантового предела шумов и возможностей рассеяния мощности для организованных функциональных систем на основе твердого тела. Несмотря на эти неясности, около 30 лет назад, возникло направление по перенесению элементов механизма работы мозга в электронику. На основе такого изучения успешно развивается методология и практика нейрокомпьютеров и нейронных сетей, существенно расширяющих возможности вычислительной техники.

Электронизация общества привела к ускорению процессов развития его информационных возможностей. Это можно проследить по перераспределению трудовых ресурсов из сферы материального производства в информационную сферу (рис. 1) [3]. Благодаря усиливающего действия информационного фактора и сопутствующих научных и технологических нововведений происходит непрерывное усложнение радиоэлектронной аппаратуры и систем.

Из установленной закономерности (рис. 2) [4] возникает возможность прогноза роста сложности электронной аппаратуры, которые свидетельствуют о достижении в ближайшее 10-летие информационной способности электронных систем порядка  $10^{20}-10^{23}$  бит в секунду, что сопоставимо с общей информационной способностью выпущенных в настоящее время ИС всем мировым производством.

Отметим, что на рис. 2 приведена область роста сложности радиоэлектронной аппаратуры и систем более чем за 35 лет, в течение которых произошла смена четырех поколений элементной базы: радиолампы — полупроводниковые приборы (дискретные) — ИС малой степенью интеграции — БИС и СБИС. Данные поколения характерны для вычислительной техники. Для многих видов аппаратуры все виды поколений элементной базы не утратили своей значимости и изменился лишь их удельный вес с существенным увеличением в сторону изделий микроэлектроники. Темпы роста сложности ИС оказываются более высокими по сравнению с темпами роста сложности аппаратуры, что объясняется прогрессивным влиянием микроэлектронной технологии.

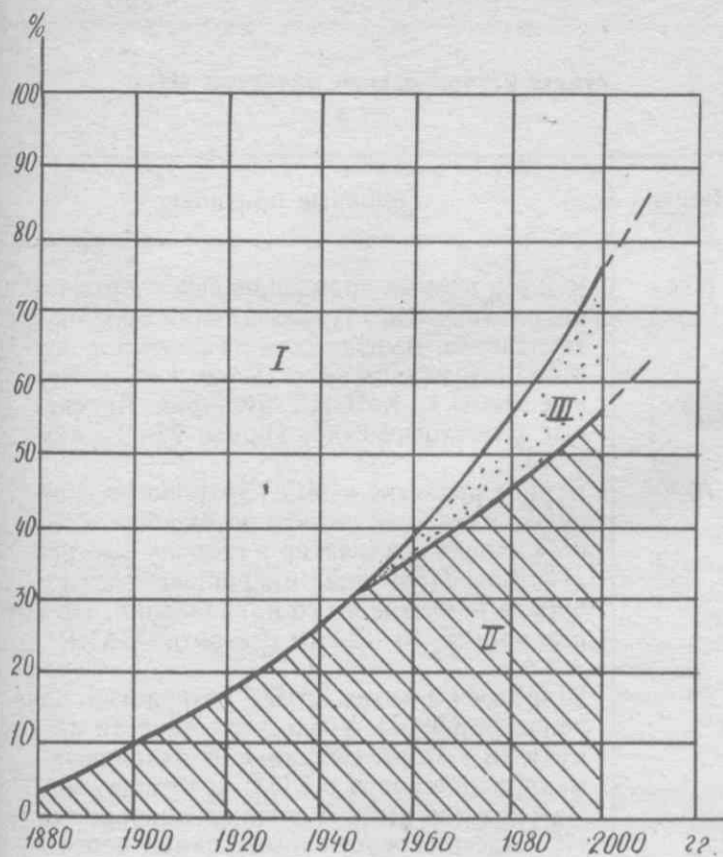


Рис. 1. Динамика процесса распределения трудовых ресурсов в США: I — сфера материального производства и обслуживания, II — информационная сфера, III — область разброса данных

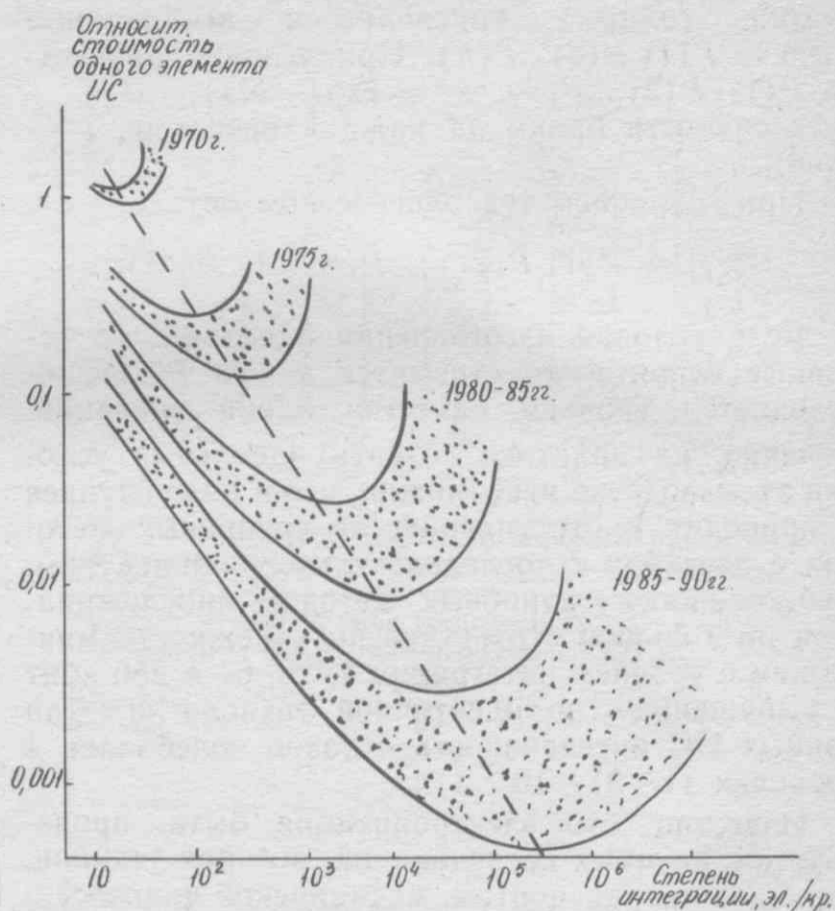


Рис. 3. Кривые эффективности технологии интегральных схем

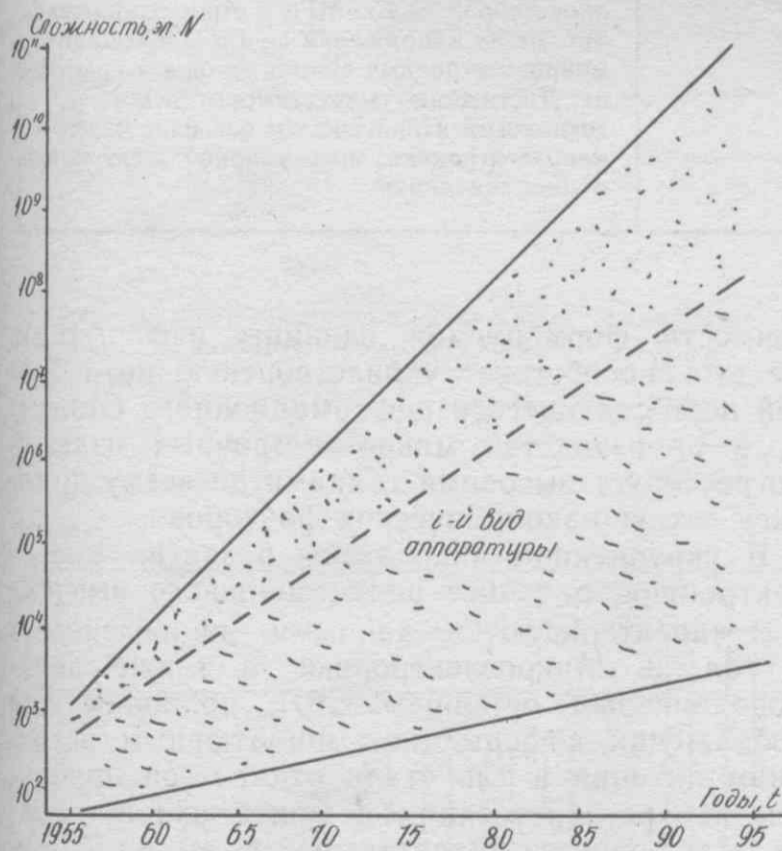


Рис. 2. Изменение сложности радиоэлектронной аппаратуры, систем и комплексов во времени

Последняя позволяет при незначительном увеличении размеров кристалла (чипа) ИС быстро наращивать степень интеграции. Особенно это ярко проявляется для схем памяти, которые, обладая регулярной структурой, обеспечивают наиболее высокие уровни сложности среди всех видов ИС.

Обобщение значительного массива статистических данных показало наличие закономерности между сложностью (количеством элементов в кристалле) и стоимостью бита информации (рис. 3). Оказывается, что для каждого этапа развития технологии ИС имеется оптимум экономической эффективности (минимум кривых), определяемый суперпозицией: падением стоимости элемента ИС на кристалле за счет существа групповой технологии и ростом стоимости за счет расходов на материалы, оборудование и издержек, связанных с падением процента выхода годных изделий. Следует обратить внимание на одно существенное обстоятельство: стоимость одного элемента с ростом степени интеграции падает до положения минимума кривых (пунктирная линия), в то время как стоимость ИС в целом растет и еще в большей мере растет стоимость разработок и производства (для килобитных ЗУ — млн.долл., а для мегабитных ЗУ — млрд. долл.).

Теоретически наиболее выгодны групповые методы технологии. Для последовательных технологических процедур качество (вероятность

выхода годных) определяется выражением  $P'(t) = P(1)P(2)...P(n)$ . При условии равенства  $P(1), P(2), ..., P(n)$ ,  $P' = \exp(-h\lambda t)$ , где  $\lambda$  — интенсивность брака на каждой операции,  $t$  — время.

При групповом технологическом методе

$$P''(t) = P(1)P(2/1)...P(n/1,2,...h-1).$$

Если условия изготовления идеальны, то условные вероятности стремятся к 1 и  $P''(t)$  определяется уровнем качества одной операции. Конечно, на практике создать идеальные условия производства невозможно, что в ряде случаев и приводит к отступлению от групповых методов и переходу к последовательным процедурам. Действенность групповых методов прослеживается на большой статистике по надежности микросхем с уровнем интеграции 4, 16, 64 и 256 кбит и выпущенных по идентичной технологии. Для данных ИС интенсивность отказов колебалась в пределах  $(1-3) \cdot 10^{-7}$  1/ч.

Известно, что электронизация быта, производства, научных исследований, военной техники, управления транспортом, медицинской диагностики и т.п. обеспечивает более высокий уровень жизни людей, повышение производительности труда, качество продукции, точности контрольно-измерительных операций и управляющих быстродействующих систем. Все это за последние полвека приводило к высоким темпам развития электронной промышленности в мире. Динамика подобных процессов развития приведена на рис. 4. Из данных обобщений следует, что лидирующее положение в развитии различных отраслей промышленности последние десятилетия по технико-экономическим показателям занимает производство ИС. Это выражается в снижении фактора стоимости и месту в мире по объему выпуска продукции в стоимостном выражении среди других производств. Так, в настоящее время электронная промышленность занимает по объему стоимости продукции третье место в мире, уступая топливно-энергетическому комплексу и автомобильной промышленности. Ожидается, что в начале следующего столетия электронная промышленность переместится на первое место.

## 2. Эволюционный характер развития интегральных схем массового применения

Диапазон изменения количественных показателей технического уровня ИС, рассматриваемый за 30-летний период развития микроэлектроники, весьма широк [5—11]. Характерно при этом, что информационные возможности ИС росли по экспоненциальным законам, а конструктивно-технологические — ближе к линейным. Данная закономерность эволюционного развития существенна, т.к. при быстром росте информационных показателей достигается одновременное снижение

Этапы исторического развития ИС

Годы	Типичные признаки
60-е	Выпуск первых промышленных гибридных и монолитных ИС. Преобладание биполярной технологии. Выпуск схем памяти на $n$ - и $p$ -МОП-структурах емкостью до 1 кбит. Первые схемы на КМОП-структурах. Проектные (топологические) нормы: 25—10 мкм
70-е	Бурное развитие $n$ -МОП технологии. Увеличение емкости памяти до 64 кбит. Крен биполярной технологии в сторону быстродействия. Появление микропроцессоров и бурное развитие этого направления. Проектные нормы: 10—2 мкм. Развитие САПР
80-е	Широкое развитие КМОП технологии, появление БиКМОП. Увеличение емкости памяти до 4 Мбит. Создание 32-разрядных микропроцессоров с RISC-архитектурой. Развивается выпуск специализированных ИС. Идет освоение субмикронных проектных норм
90-е	Доминирование КМОП технологии. Достижение емкости памяти до 64 Мбит (1994 г.) при проектных нормах 0,3—0,4 мкм. Создание 2-го поколения RISC микропроцессоров с разрядностью до 64 бит. Поиск новых комбинированных путей увеличения интеграции и быстродействия. Начальный этап нанoeлектроники
Прогноз до 2010 г.	Наращивание емкости памяти ДОЗУ до 1 Гбит. Повышение быстродействия микропроцессоров до 250 МГц и выше. Снижение питающих напряжений до 1,5 В. Создание микроэлектронных систем на одном кристалле. Достижение совместимости различных технологий. Практическое освоение изделий нанoeлектроники, молекулярной электроники и микромеханики

стоимости формируемой единицы информации. Все это способствует удовлетворению потребностей нарождающегося информационного общества, а производство микроэлектронных изделий прогрессирует высокими темпами по всему комплексу технико-экономических факторов.

В укрупненном виде этапы развития микроэлектроники, а точнее индустриального выпуска ИС, характеризуются данными, приведенными в табл. 2. Микроэлектронике, а также полупроводниковым приборам СВЧ, приборам для отображения информации, миниатюрным источникам питания и т.п. стали отдаваться приоритеты на государственном и общественном уровнях. Наблюдается значительный ежегодный рост инвестиций в крупных размерах (рис. 5), а стремление обеспечения конкурентоспособности на мировом рынке приводит к неуклонному росту полупроводникового производства (рис. 6). Однако каждый новый шаг по увеличению информацион-

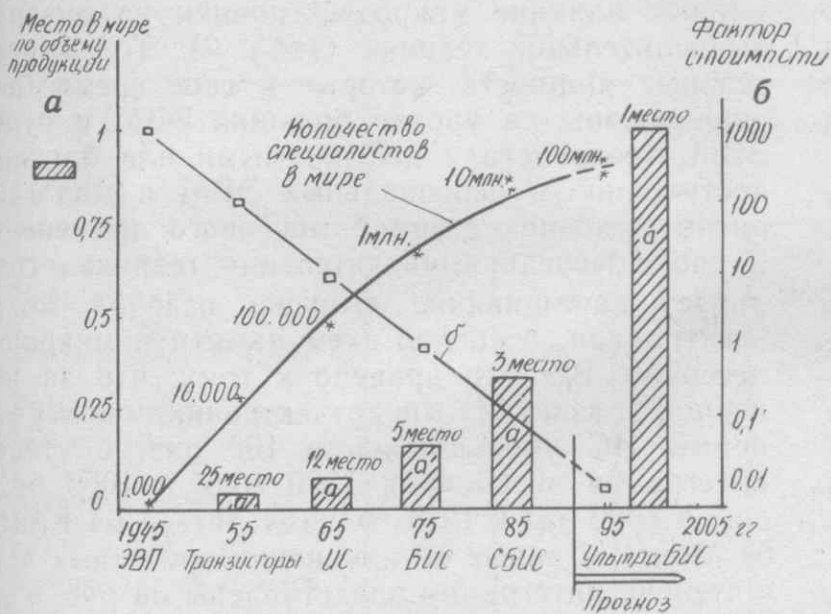


Рис. 4. Тенденции развития основных факторов электроники (усредненные общемировые данные)

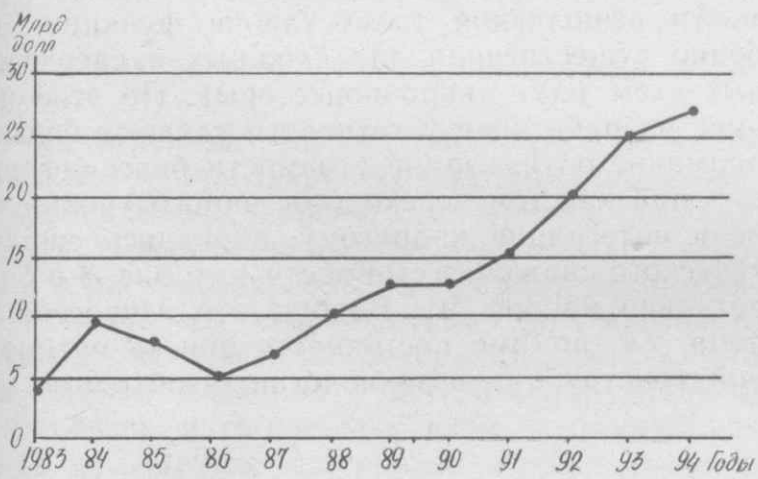


Рис. 5. Рост ежегодных инвестиций в мировую полупроводниковую промышленность

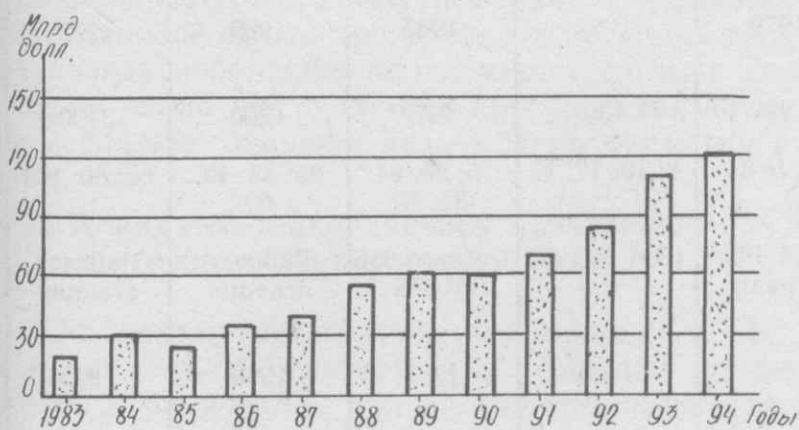


Рис. 6. Мировое производство полупроводниковых приборов, включая ИС

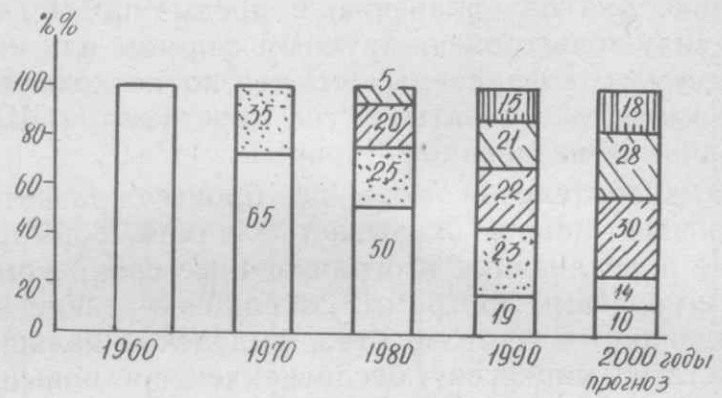


Рис. 7. Изменение структуры мирового рынка полупроводниковых приборов. □ — дискретные приборы, □ — логические и аналоговые ИС, ▨ — запоминающие устройства, ▩ — микропроцессоры, ▧ — специализированные ИС

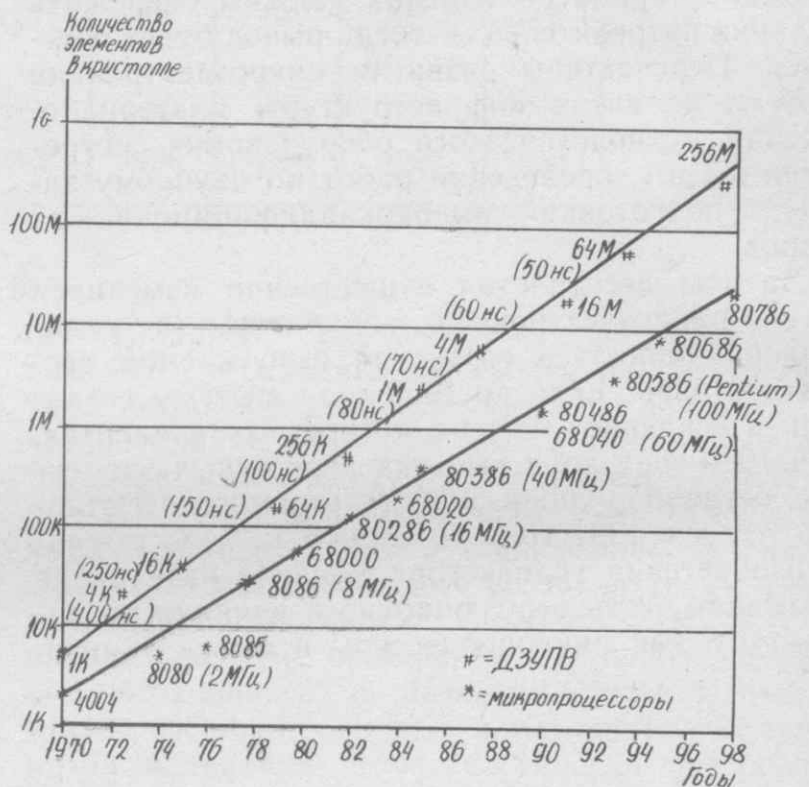


Рис. 8. Рост степени интеграции ИС с регулярной структурой (ДЗУПВ) и нерегулярной структурой (микропроцессоры)

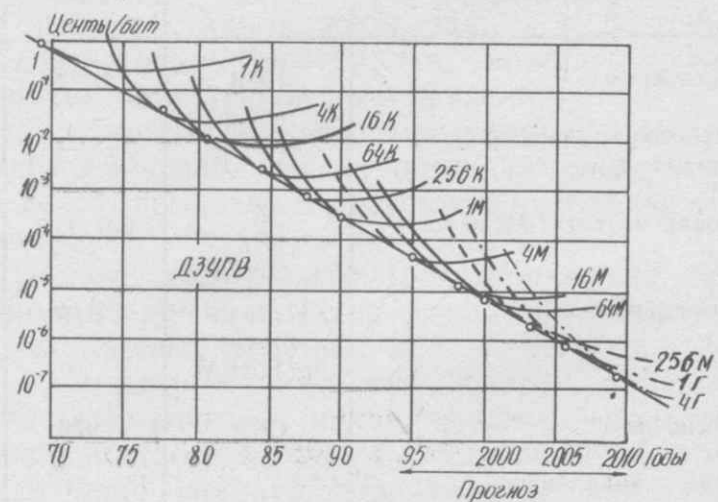


Рис. 9. Реальная и прогнозируемая стоимость 1 бита информации

ной емкости и количества элементов на одном кристалле требует увеличения инвестиций в несколько раз по сравнению с предыдущими, что под силу только очень крупным фирмам или консорциумам, создаваемых совместно несколькими экономически развитыми государствами (США, Японии, Объединенной Европы).

В значительной мере на процесс развития микроэлектроники оказывает влияние формирование и реализация в ограниченные сроки комплексно-целевых программ, сокращение цикла исследования — производство, выделение больших средств на маркетинг, беспрецедентное повышение качества продукции, научно- и экономически обоснованное управление производством снизу доверху, неукоснительное выполнение девиза «покупатель всегда прав, его желание — закон для производителя». Более того технико-экономические параметры изделий должны опережать желания потребителей — тогда рынок будет обеспечен. Перспективы развития микроэлектроники требуют развития инфраструктуры (материаловедения, технологического оборудования, метрологии и т.п.), проведения работ по научному заделу, подготовки высококвалифицированных кадров.

За три десятилетия существенно изменился облик радиоэлектронной аппаратуры и радикально изменилась структура выпускаемой элементной базы. Если до 1960 года системы создавались исключительно на дискретных элементах, то к 1980 году доля выпуска дискретных элементов составляла лишь 50% (в стоимостном отношении), а в 1991 году — только 19%. С момента изобретения транзистора никакие изделия не оказывали столь революционного влияния на аппаратуру, как микропроцессоры и схемы памяти.

В 1993 году их доля выпуска в общем объеме составляла более 50% (рис. 7). Особенно значительное влияние микроэлектроники на развитие вычислительной техники (табл. 3). Те вычислительные мощности, которые в свое время были реализованы на уровне больших ЭВМ и супер-ЭВМ, теперь стали достижимыми или близки к достижению в персональных ЭВМ и малогабаритных рабочих станциях массового применения. В свою очередь вычислительная техника стимулирует наращивание выпуска изделий микроэлектроники, особенно схем памяти и микропроцессоров. Все это привело к тому, что за весь период развития микроэлектроники проектные нормы ИС уменьшились в 100 раз, а степень интеграции возросла к 1980 году в 1000 раз и еще в 1000 раз к 1994 году (64 бит — 64 Кбит — 64 Мбит). Данные об изменении проектных норм и степени интеграции представлены на рис. 8 и в табл. 4.

Данные, приведенные для динамики развития ДОЗУ, свидетельствуют о том, что с 1976 года по 1994 год затраты на реализацию новых ступеней сложности увеличились почти в 40 раз, в то время как сложность в 16.000 раз.

Выше отмечалась важность снижения стоимости выполнения элементарной функции, особенно существенная для сложных и сверхсложных схем (ЗУ, микропроцессоры). По этой причине разработчики и технологи уделяют большое внимание оптимизации стоимости бита информации при каждом переходе от одного уровня степени интеграции к другому, добиваясь систематического снижения стоимости (см. рис. 3 и более детально на рис. 9). Вообще это непростая задача, т.к. помимо постоянного поиска оптимальной конструкции и технологии, необходимо учи-

Таблица 3

Динамика развития микропроцессоров и их роль в совершенствовании вычислительных систем

Микропроцессор	8080	z-80	8088	80286	80386	80486	80586
Год освоения	1973	1977	1979	1982	1985	1989	1993
Количество транзисторов на кристалле, тыс.			29	130	275	1200	3100
Тактовая частота, МГц	2	2,5; 4; 6	2; 5; 8	8; 10; 12; 16	16; 20; 24; 33; 40	25; 33; 40; 60	66; 80; 100
Персональные ЭВМ	Первая модель 8р. ПЭВМ	CP/M	IBM PC первая	IBM PC AT	Compaq 386 IBM PS/2	Рабочие станции	Рабочие станции
Год освоения	1974	1978	1981	1984	1987	1990	1993
Модель эквивалентной большой (супер) ЭВМ	IBM704	IBM7094	PDP 11/70	VAX 11/780	VAX8600	IBM3090	Cray-1
Год освоения	1954	1962	1975	1981	1984	1985	1983



## Динамика развития ДЗУПВ

Показатели	Наиболее высокие значения показателей								Относит. изменения, раз
	4К	16К	64К	256К	1М	4М	16М	64М	
Емкость ДЗУПВ, бит (поколения)	4К	16К	64К	256К	1М	4М	16М	64М	$1,6 \times 10^4$
Размер кристалла, мм <sup>2</sup>	24	20	30	45	54	91	142	200	8
Минимальный тополог. размер, мкм	6	4	2	1,5	1,2	0,8	0,6	0,4	15
Диаметр кремниевых пластин, мм	75	100	100—125	125—150	150	150	150—200	200	2,6
Количество техн. операций	70	80	80	120	280	400	450	500	7
Стоимость разработки и завода, млн.долл.	90	140	200	450	650	1000	2000	3400	38
Начало производства	1974	1976	1979	1983	1986	1988	1992	1994	

тывать конкуренцию со стороны других изготовителей.

Рассмотренные выше тенденции развития микроэлектроники характеризуются использованием в качестве основного материала кремния, который является не только относительно недорогим и распространенным в природе, но он оказался наиболее технологичным для массового производства. Имеются основания считать, что кремний как материал будет доминирующим в производстве интегральных схем в ближайшие 10—15 лет. Другие полупроводниковые материалы, например, арсенид галлия перспективен для создания в основном сверхбыстродействующих ИС и приборов, использующие туннельно-резонансные эффекты. По соображениям стоимости и технологических трудностей, арсенид галлиевые ИС находят применение для уникальной высокочастотной аппаратуры, рассчитанной на функционирование в экстремальных условиях [12]. Мировой объем производства арсенида галлия в виде небольших по размерам слитков составляет около 1% от объема производства кремния в слитках больших размеров по диаметру и длине.

### 3. Ожидаемые направления дальнейшего развития микроэлектроники

Для совершенствования традиционных ИС имеются немалые резервы [13]. Однако физические ограничения транзисторного эффекта, межсоединения, зачастую неблагоприятная ситуация между степенью интеграции и быстродействием и специфические применения заставляют искать новые виды изделий микроэлектроники. Эти поиски могут качественно отличаться

от принципов, заложенные в полупроводниковые ИС, и отходить от эволюционного характера развития микроэлектроники. Переход от экспоненциальной части логистической кривой определенного класса ИС (например, ТТЛ, И<sup>2</sup>Л, р-МОП и др.) в пологую часть, как отмечалось выше, приводит к новым техническим решениям. Предела роста требований по показателям функциональной значимости сложности ИС в ближайшие годы не ожидается. Возникают все новые потребности в развитии более сложных микроэлектронных систем в различных областях науки и техники, в частности, для построения систем искусственного интеллекта, устройств распознавания образов в реальном времени, супер-ЭВМ в сверхминиатюрном исполнении и т.п.

Направлений развития микроэлектроники известно достаточно много, они находятся на различных стадиях исследований и разработок. Среди этого многообразия, пожалуй, имеется три многообещающих направления:

— функциональная электроника (электроника динамических неоднородностей различной физической природы с несхемотехническими решениями);

— наноэлектроника (электроника на основе наноразмерных структур и кластеров атомно-молекулярного уровня);

— микромеханика как область, объединяющая электронные и механические компоненты на основе микроэлектронной технологии.

В ряде случаев обозначенные направления перекрываются между собой, но оценивать их удобнее раздельно.

Возможности функциональной электроники рассматривались достаточно давно [14, 15 и др.].

В приборах функциональной электроники доминирующую роль в качестве носителей информации играют динамические неоднородности, например, зарядовые пакеты (ПЗС), магнитные домены (ЦМД), акустические волны (ПАВ), солитоны, волновой фронт и т.п. Оценки показывают, что используя солитоны в твердом теле можно рассчитывать на создание ЗУ с объемом памяти до  $2 \cdot 10^{18}$  бит/см<sup>2</sup>, голографических ЗУ с объемом памяти порядка  $10^{12}$  бит и других высокоинформативных устройств. Считается, что функциональная электроника перспективна для систем обработки сверхбольших массивов информации в реальном масштабе времени. В функциональной электронике отпадает проблема межсоединений, характерная для полупроводниковых ЗУ, возможен переход от последовательной («побитовой») обработки информации к параллельной, возможно создание эффективных устройств отображения образов. Развитие функциональной электроники, изделия которой превышают параметры интегральных полупроводниковых ИС, связано с решением непростых задач физического, математического, технологического и метрологического характера. Особенно существенно для функциональной электроники, использующей континуальные среды, решение проблем материаловедения в части достижения высокой однородности, стабильности границ раздела фаз и т.п.

**Нанoeлектроника**, рассматриваемая как перспективное направление развития электроники на основе элементов и структур с нанометровыми размерами, находится на начальном этапе изучения [16]. Основная особенность нанoeлектроники состоит в квантовом характере электронных процессов, типичных для сверхмалоразмерных систем. Это заставляет переходить к новой все более детерминированной технологии формирования структур вместо традиционной микроэлектронной технологией с присущей для нее статистическим характером и большими разбросами параметров. В то же время, при создании элементов и приборов нанoeлектроники используются известные технологические приемы. Например, получение гетероструктур, состоящих из чередующихся слоев с наноразмерными толщинами, возможно на основе развитой молекулярно-лучевой эпитаксии. В технологии сверхпроводниковых, оптоэлектронных, акустоэлектронных и микровакуумных приборов возникает потребность иметь отдельные элементы с наноразмерами. В этих случаях пользуются приемами субмикронной технологии, с отбором, т.е. ценою малого процента выхода годных изделий.

В планарных наноразмерных структурах и рельефах, считающихся типичными для будущей нанoeлектроники (создания «атомарных» ЗУ, микродатчиков и т.п.), от обычной микроэлектронной технологии отказываются и идут по пути использования туннельных зондов или молекулярной нанотехнологии, в том числе на основе

ЛБ-пленок. Возможности туннельной микроскопии для литографических целей обсуждаются в литературе [17], также как молекулярной нанотехнологии, обеспечивающей самоорганизацию процессов литографии [18]. Для становления нанoeлектроники в виде технического направления необходимо решение крупных физико-технологических проблем, среди которых наиболее сложными являются проблемы формирования стабильных наноструктур, метрологического обеспечения, сопряжения с традиционными изделиями микроэлектроники, моделирования и количественного расчета характеристик, проблемы построения информационно-вычислительных систем нового поколения с использованием изделий нанoeлектроники.

Параллельно с нанoeлектроникой и ее ветвью молекулярной электроникой возникают идеи создания биоэлектронных информационно-вычислительных сред, в которых, исходя из феноменологических соображений ожидается реализовать принцип самопрограммирования на основе квантовых (когерентных) явлений [19].

Возникающее направление микромеханики, по-видимому, в ближайшие годы приобретет большое самостоятельное значение для создания на базе субмикронной технологии сверхминиатюрных (единицы мкм) датчиков и объемных движущихся механических микроустройств [20]. Изделия микромеханики интересны для создания принципиально новых средств автоматики, медицины и диагностики на основе объединения электронного и механического управления и целенаправленного перемещения микрообъектов в замкнутых объемах сложных систем. Становление микромеханики сдерживается большим числом нерешенных проблем, связанных с обеспечением прочности материалов, созданием систем теплоотвода, разработкой методов и средств измерения и контроля, методов литографии (считается перспективной глубокая рентгеновская литография на основе синхротронного излучения), методов моделирования и расчета.

Затронутые выше новые направления электроники, находящиеся на пороге их использования, направлены на достижение сверхвысоких уровней информационной способности, сверхминиатюризации и получение новых качеств от изделий электронной техники, которые не могут быть достигнуты существующей обширной номенклатурой ИС. Наряду с этим, в ряде случаев необходима не степень интеграции или быстродействие, а высокая чувствительность или выполнение специфических функций (например, обоняния и т.п.). По этой причине возникает потребность в создании изделий электронной техники специального назначения. В частности, для метрологических целей и создания измерительных средств высокой точности с самокалибровкой необходимо искать пути разработки специальной сверхпроводниковой элементной базы в виде универсальных компараторов и интеграль-

ных квантовых мер [21]. Для контроля окружающей среды, измерения радиационных, механических и других воздействий необходим широкий ассортимент датчиков, основанных на использовании различных физических эффектов. Потребности военной техники не могут обойтись без создания электронных устройств с особыми характеристиками, отличающимися от характеристик изделий микроэлектроники широкого применения.

В заключение необходимо отметить, что существующая последние десятилетия проблема наращивания информационного потенциала отождествляется с научно-техническим прогрессом в электронике и особенно в ее обширной области, какой является микроэлектроника. Дальнейшее эволюционное развитие микроэлектроники, опирающееся на уменьшение топологических размеров интегральных схем, требует постоянно растущих и без того уже огромных финансовых затрат для разработки и производства субмикронных мегабитных схем памяти и микропроцессоров. Такой подход доступен США, Японии и отдельным странам Западной Европы, да и то в ряде случаев совместно. Отечественная электронная промышленность, не располагая в настоящее время подобными материальными ресурсами, может в большинстве случаев ориентироваться лишь на ограниченный выпуск интегральных схем с производственными нормами, которыми владеют промышленные предприятия. В целях сокращения разрыва между мировой и отечественной микроэлектроникой, как показывает анализ, перспективно вести теоретические и экспериментальные работы по новым направлениям электроники, а именно наноэлектроники, функциональной электроники и микромеханики. Имеющиеся в этих направлениях научные заделы позволяют рассчитывать на создание электронных приборов и устройств с большими информационными возможностями и новыми функциями. По существу это может служить нашей альтернативой для выравнивания в перспективе технического уровня отечественной наукоемкой продукции электроники на мировом рынке.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К л и р Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач/Пер. с англ.— М.: Радио и связь. 1990, с. 544.
2. Д а н и л и н Б.С., Е п и ф а н о в а В.П. Микроэлектроника до 2000 года. Обзор по материалам зарубежной

печати. БОНТИ «Научный центр», 1987, вып. 17—20, с. 377—380.

3. Г р о м о в Г.Р. Национальные информационные ресурсы: проблемы промышленной эксплуатации.— М.: Наука, 1984, с. 240.

4. В а с е н к о в А.А., С р е т е н с к и й В.Н., Ф е д о т о в Я.А. Три проблемы твердотельной электроники. Сб. Микроэлектроника и полупроводниковые приборы, вып. 2.— М.: Сов. радио, 1977, с. 3—19.

5. Ch.-T.S a h. Evolution of the MOS Transistor — From Conception to VLSI.— Proceedings of the IEEE, 1988, v. 76, N 10, p. 1280—1297.

6. M y e r s G.J., Y u A.Y.C., H o u s e D.L. Microprocessor Trends.— Proceedings of the IEEE, 1986, v. 74, N 12, p. 1605—1622.

7. A s a S h. Semiconductor Memory Trends.— Proceedings of the IEEE, 1986, v. 74, N 12, p. 1623—1635.

8. F o l l i H. Technological and Economical Aspects of Mega-chip Development.— Electron Technology, 1993, N 1, p. 23—34.

9. Status'93. A report on the integrated circuit industry. Integrated circuit Engineering Corp.

10. B u l l i s W.M. Evolution of silicon materials characterization: lesson learned for improved manufacturing.— Semiconductor Science Technology, 1993, N 8, p. 777—787.

11. T h u m m l e r T. Mit. «Hyperintegration» ins 21. Jahrhundert.— Elektronik, 1993, N 1, s. 32—35.

12. П о л т о р а ц к и й Э.А., И л ь и ч е в Э.А., Р ы ч к о в Г.С. Особенности развития интегральных схем на арсениде галлия.— См. наст. вып., с. 65.

13. Системный подход к субмикронной технологии/ Ю.С.Боков, В.И.Жильцов, В.В.Мартынов, Н.С.Самсонов.— Электронная промышленность, 1993, № 8, с. 7—16.

14. В а с е н к о в А.А., Ф е д о т о в Я.А. Интегральная электроника статических и динамических неоднородностей.— Электронная промышленность, 1983, вып. 1, с. 21—24.

15. Ф е д о т о в Я.А., Щ у к а А.А. Альтернативы развития микроэлектроники. Микроэлектроника и полупроводниковые приборы, вып. 10.— М.: Радио и связь, 1989, с. 22—41.

16. Наноэлектроника как перспектива развития микроэлектроники/В.А.Быков, А.В.Емельянов, Э.А.Полторацкий, Н.С.Самсонов.— Электронная промышленность, 1993, № 11—12, с. 42—46.

17. Н е в о л и н В.К. Физические основы туннельно-зондовой нанотехнологии.— Электронная промышленность, 1993, № 10, с. 8—11.

18. Б ы к о в В.А. Методы формирования и исследования Ленгмюр—Блоджетт пленок как основы молекулярной наноэлектроники. См. наст. вып., с. 59.

19. Б а н н и к о в В.С. Биоэлектронные информационно-вычислительные среды. Препринт № 1, НИИ физических проблем, 1991, с. 80.

20. Б о р о в к о в В.А., П и м ч е н к о Н.А., Ю р ч е н к о В.И. Микромеханика — новое направление технологии и техники.— Электронная промышленность, 1993, № 9, с. 33—37.

21. В о л к о в А.Б., М а с а л о в В.В., С р е т е н с к и й В.Н. Возможности самокалибровки измерительных устройств с использованием квантовых мер и микропроцессоров.— Электронная техника, сер. 3, 1992, вып. 1, с. 52—55.

*ПОИСКИ НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В СОВРЕМЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ ЗАСТАВЛЯЮТ ОБРАЩАТЬСЯ К ФУНДАМЕНТАЛЬНЫМ ФИЗИЧЕСКИМ, ХИМИЧЕСКИМ, БИОЛОГИЧЕСКИМ И КИБЕРНЕТИЧЕСКИМ ЯВЛЕНИЯМ И ЭФФЕКТАМ ПРИРОДЫ, ОБЛАДАЮЩИМ БОГАТЫМИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОИНФОРМАТИВНЫХ, МИКРОМИНИАТЮРНЫХ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ.*

*ИНСТИТУТ СОСРЕДОТОЧИЛ ВНИМАНИЕ НА РЯДЕ НАПРАВЛЕНИЙ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, РАСХОДУЯ НА ИХ ПРОВЕДЕНИЕ 10–15% СИЛ И СРЕДСТВ ПО СРАВНЕНИЮ С РАБОТАМИ ПРИКЛАДНОГО ХАРАКТЕРА.*

*В ИНСТИТУТЕ ПРОВОДЯТСЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО РЯДУ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ МИРОВОЙ НАУКИ – В ОБЛАСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ, ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ САМООРГАНИЗАЦИИ, ПОВЕДЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИСТЕМ, КВАНТОВЫХ ЯВЛЕНИЙ И СВОЙСТВ КОГЕРЕНТНОСТИ, НЕЙРОПОДОБНЫХ СИСТЕМ БИОНИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА. ОНИ ОТЛИЧАЮТСЯ ОРИГИНАЛЬНОСТЬЮ И ВЫПОЛНЯЮТСЯ ИЗВЕСТНЫМИ УЧЕНЫМИ. К РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОВОДИМЫХ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЯВЛЯЮТ БОЛЬШОЙ ИНТЕРЕС КАК ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ УЧЕНЫЕ АКАДЕМИЧЕСКИХ КРУГОВ, ТАК И ЗАРУБЕЖНЫЕ, О ЧЕМ СВИДЕТЕЛЬСТВУЮТ ССЫЛКИ В ПРЕСТИЖНЫХ ЖУРНАЛАХ И ПИСЬМА ИЗ РАЗЛИЧНЫХ СТРАН СОТРУДНИКАМ ИНСТИТУТА – В.М.ЕЛЕОНСКОМУ, В.И.МАХОВУ, Н.М.КИРОВОЙ, В.С.БАННИКОВУ, Г.С.РЫЧКОВУ, В.А.БЫКОВУ И ДРУГИМ.*

## Молекулярная электроника и молекулярно-инженерная технология: пути становления

С.В.АЙРАПЕТЯНЦ

Большая молекула как функциональный элемент является естественным пределом миниатюризации: в ней реализуется принцип атомной детализации — каждый атом на своем, отведенном ему месте. Использование таких больших молекул означает переход к молекулярной технологии и к молекулярной электронике. Принципиальных трудностей для такого перехода сегодня нет. Это существенно для решения проблемы перехода на новый уровень микроминиатюризации технических устройств.

**Молекулярно-инженерная технология.** В 1982 году известные американские специалисты в области научных основ микротехнологии И.Броддай и Дж.Мерей в своей монографии «Физические основы микротехнологии» писали: «Современная технология базируется в основном на удалении лишнего материала из заготовки, подобно тому, как это делает скульптор, создавая статую. В будущем можно предвидеть применение молекулярно-инженерной технологии, которая позволит строить приборы атом за атомом,

по аналогии с тем, как дом складывается по кирпичику... Стимулы к микроминиатюризации будут исчерпаны только тогда, когда будут исчерпаны все потенциальные возможности молекулярно-инженерной технологии».

Почему специалисты, прекрасно знающие научные основы микротехнологии, видят продолжение и завершение процесса миниатюризации в молекулярно-инженерной технологии? Может быть, они нашли принципиально непреодолимый предел миниатюризации при традиционном подходе? Нисколько. В заключение они пишут:

«Использование в технологии лучевых методов (электронно-лучевых, ионно-лучевых, рентгеновских, сухой технологии) является тем горизонтом, который открывает возможность получать приборы с характерными размерами 10—25 нм. В этом диапазоне придется столкнуться с фундаментальными вопросами, связанными с новыми физическими принципами работы приборов, и ограничениями, свойственными традиционным планарным процессам». Таким образом, трудности будут, но традиционный путь для миниатюризации открыт.

Ответ на вопрос о том, почему же нам необходима молекулярно-инженерная технология, частично был найден в 1968 году в уникальном в свое время бионическом отделе НИИФП, где в то время начались работы по молекулярно-инженерной технологии для микроэлектроники.

**Молекулярная инженерия.** Молекулярная инженерия — это конструирование и изготовление органических молекул с заданными свойствами. Органические молекулы содержат 10—200 атомов и имеют достаточно сложную пространственную конструкцию. Свойства материала из этих молекул определяются размерами молекулы, ее формой, взаимным пространственным расположением и параметрами различных функциональных групп молекулы и т.д. Конструктор должен предвидеть связь конструктивных параметров молекулы с ее свойствами или со свойствами материала из этих молекул. Раньше это определялось интуицией разработчика.

Сегодня для прогнозирования свойств будущих молекул и направлений синтеза широко используются методы математического моделирования: квантово-химические методы расчета энергетического спектра электронов, методы Монте-Карло и молекулярной динамики для расчета конформаций и надмолекулярных структур и другие. Развита компьютерная графика для визуализации крупных молекул из тысяч атомов. Развивается туннельная микроскопия с ангстремным разрешением. Все это входит в арсенал молекулярной инженерии.

Созданы конструкции и выделены из природных соединений более четырех миллионов различных органических молекул. Наибольшие успехи молекулярной инженерии достигнуты в фармакологии, в разработке широкой гаммы твердых и эластичных полимеров, искусственных каучуков и кремний-органических резин,

синтетических волокон, кож, масел, лаков и т.д. Огромных успехов достигла генная инженерия по целенаправленному воздействию на заданные участки молекулы ДНК. Давно решена проблема синтеза молекул ДНК и белков с заданной последовательностью оснований и аминокислот. Такой синтез успешно используется при исследованиях. В микроэлектронике молекулярной инженерией заняты разработчики резистов.

Сегодня молекулярная инженерия — это большая и успешно развивающаяся область науки и техники, методологией которой можно воспользоваться при разработке молекулярной технологии.

**Молекулярная технология.** Технология называется молекулярной тогда, когда в ней в той или иной мере используются процессы межмолекулярной самосборки. Межмолекулярная самосборка — это процесс агрегации определенного числа (5—100) молекул нескольких типов (5—50). Агрегация происходит за счет избирательных парных взаимодействий между отдельными участками молекул по принципу «ключ-замок». Процессе самосборки завершается, когда на поверхности частицы (надмолекулярной структуры) не будет центров парных взаимодействий. Для этого молекулы, завершающие процесс самосборки, должны иметь мало центров взаимодействий, например один, чтобы, присоединившись этим центром к структуре, образовать нейтральный, не взаимодействующий участок поверхности частицы.

Грубой моделью самосборки может служить вариант детской игры, в которой из квадратных фишек складывается абстрактная графическая картинка при условии, что до последней фишки складывающий не знает, что должно получиться. Выбрав произвольно первую фишку и какую-нибудь ее грань, складывающий приставляет к ней по очереди разные грани разных фишек, пока линии на стыке фишек не совпадут. Используя этот алгоритм, он правильно сложит картинку, не имея никакого представления о ней. Более того, если перемешаны фишки от нескольких разных или одинаковых картинок, все картинки будут восстановлены. При самосборке роль фишек играют молекулы, проверку на совпадение линий осуществляет избирательное взаимодействие «ключ-замок», а пробные прикладывания «осуществляет» броуновское движение молекул.

При самосборке получают полностью идентичные частицы как по форме так и по содержанию и, если исходные молекулы не содержат различных изотопов, то частицы физически неразличимы в строгом понимании этого термина.

Процесс самосборки достаточно исследован экспериментально. В водной среде частицы размером 10—25 нм (вспомним предел миниатюризации), такие как вирусы или сложные ферменты, при определенных условиях в экспериментах *in vitro* распадаются на составные молекулы. Если же изменить соответствующим образом условия среды (РН, ионную силу, температуру

и др.), то произойдет самосборка частиц и полное восстановление их биологической активности.

Самосборка используется в исследовательской работе. Она была обнаружена в 30-х годах, а в 1962 г. разработана первая теория самосборки [1]. Сейчас имеется достаточно строгая математическая модель самосборки, разработанная на основе комбинаторного подхода для сборки одно-, двух- и трехмерных частиц [2]. Сформулированы условия, при соблюдении которых процесс самосборки приводит к единственному (уникальному) результату.

Не надо думать, что самосборка — это особенность, присущая только живой природе. Процесс самосборки может быть продемонстрирован на синтезированных в аппаратуре молекулах. Если известна первичная структура молекул белка и РНК, т.е. последовательность аминокислот и оснований у молекул, участвующих в процессе самосборки, то они могут быть синтезированы в специальной серийно выпускаемой аппаратуре и с их помощью может быть продемонстрирован процесс самосборки.

Безусловно, самосборка — изобретение биоэволюции, но, если этот процесс понят и осмыслен, он может быть использован на других специально сконструированных органических молекулах.

Отметим важные отличительные особенности самосборки:

— заданные размеры (10—25 нм) и форма частицы (функционального элемента) создаются не за счет очень локальных внешних воздействий по удалению лишнего материала, а за счет выбора параметров участвующих в самосборке молекул;

— функциональные параметры элементов полностью идентичны, т.е. не имеют никакого статистического разброса;

— в любой из идентичных частиц строго заданы координаты и тип каждого атома, т.е. имеется атомная детализация.

Именно последняя особенность, т.е. атомная детализация, показывает, что при самосборке достигается предел миниатюризации. Ничего более детального и мелкого по сравнению с тем, что каждый атом находится на своем, отведенном только ему, месте, изобрести уже нельзя. Имея в виду атомную детализацию, И.Броудай и Дж.Мерей писали, что стимулы к миниатюризации будут исчерпаны только тогда, когда будут использованы все потенциальные возможности молекулярно-инженерной технологии. Атомная детализация элемента, содержащего миллион атомов, позволяет не только строго выдержать заданные размеры и форму, но и наполнить их глубоким и разнообразным функциональным содержанием. В габариты  $10 \times 10 \times 10$  нм вписываются тысячи функциональных элементов — разнообразных ферментов и остроумнейших регуляторов. Эволюция создала даже электромотор, работающий, правда, на протонах, а не на

электронах. Этот мотор также вписывается в указанные габариты.

Итак, смысл содержания термина «молекулярно-инженерная технология» в том, что он подразумевает использование молекулярной инженерии для создания молекул, пригодных одновременно для выполнения полезной функции и для самосборки, а также проведение технологических операций, в которых участвуют процессы самосборки. В России вместо термина «молекулярно-инженерная технология» используется термин «молекулярная технология».

При использовании принципов самосборки в микротехнологии нельзя переоценивать сложность процессов, идущих на молекулярном уровне в живой природе. Но нельзя и упрощать. От понимания принципов самосборки до молекулярно-инженерной технологии очень далеко. Отметим видимые трудности:

— самосборка реализуется на молекулах белка и РНК, но белки — не подходящий материал для первых шагов молекулярно-инженерной технологии;

— необходимость использования для самосборки небелковых органических молекул ставит перед разработчиками большую и сложную научную проблему, решение которой надо начинать почти с нуля;

— необходимость возникновения фундаментальных вопросов, связанных с новыми физическими принципами работы приборов с размерами 10—25 нм (но не в будущем, как писали И.Броудай и Дж.Мерей, а с самого начала работы).

Трудностей достаточно, но они преодолимы. В 1968 году в бионическом отделе НИИФП началась разработка молекулярно-инженерной технологии для микроэлектроники. Для получения сверхтонких, по тем временам, диэлектрических пленок был использован метод Ленгмюра—Блоджетт (ЛБ) [3]. В этом методе используются нерастворимые поверхностно-активные вещества (ПАВ). Молекула ПАВ состоит из двух фрагментов. Один фрагмент — гидрофильный — имеет сродство к воде, и может хорошо в ней растворяться, а второй — гидрофобный — нерастворимый в воде, не позволяет молекуле ПАВ погрузиться в воду. В результате молекула может быть только на поверхности воды, держась за нее гидрофильным концом. Метод позволяет формировать на поверхности воды однородные мономолекулярные пленки из молекул ПАВ и по одному слою последовательно переносить их на твердые подложки. Более того, можно нанести на подложку два монослоя одного типа, затем два монослоя второго, третьего и т.д., то есть получить на подложке «слоеный пирог» из бимолекулярных слоев с любым иметь свою кристаллическую структуру, такую же как в объемной фазе. Возможность получения таких рукотворных чудо-кристаллов надежно проверена

Замечательной особенностью ЛБ-метода является то, что, как и при самосборке, толщина монослоя или бислоя (2—4 нм) определяется не

внешними воздействиями и точностью соблюдения технологического режима, а размерами молекул и потому легко может быть выдержана с точностью не хуже 0,1 нм. Конечно, и в ЛБ-методе надо соблюдать технологический режим (РН, ионную силу, «двумерное» давление в монослое, температуру и др.) для того, чтобы процесс шел в нужном направлении. Зато это позволяет не приближаться к пределу миниатюризации (10—25 нм), а сразу попадать внутрь его.

ЛБ-метод это, конечно, не самосборка, все делается человеком, а молекулам доверяется только одна операция — образовать мономолекулярный слой на поверхности воды в порядке самодеятельности. А в итоге получается молекулярный размер по толщине слоя. ЛБ-метод имитирует только одномерную самосборку по нормали к подложке, а в планарной технологии это самое легкое направление при миниатюризации. Однако он нашел применение в электронике для получения ориентирующих покрытий в ЖК-индикаторах. Большие возможности у ЛБ-метода для получения тонкослойных резистивных слоев [4]. В 1982 г. в отделе был продемонстрирован рисунок по алюминию, полученный с помощью всего одного молекулярного слоя (толщиной 2 нм) в качестве резиста.

Важное достоинство ЛБ-метода заключается в том, что это пока единственный технологический прием, который может оказаться пригодным для получения рисунка при предельной миниатюризации (до 10—25 нм).

Рассмотрим простейшую схему для получения планарной структуры из идентичных субъединиц размером порядка  $10 \times 10$  нм. Она предельно проста и предельно не конкретна:

1) синтез или самосборка субъединиц из более мелких молекул;

2) проведение «кристаллизации», при которой образуется «двумерный кристалл» (паркетная структура) из субъединиц.

Напомним, что субъединица должна состоять примерно из миллиона атомов и представлять собой практически готовый функциональный элемент, например полевой транзистор или ПЗС и т.п. Поэтому субъединица должна иметь сложную внутреннюю структуру. Роль диэлектрика в такой структуре могут играть, например, молекулы насыщенных углеводородов или еще лучше, насыщенных перфторированных углеводородов, а роль каналов проводимости инжектированных электронов — молекулы полиацетилена или полидиацетилена и их производные, а также молекулы полинитрида серы. В роли проводников (с металлической проводимостью) могут выступать цепочки молекул металлоорганических производных с большой проводимостью и наиболее проводящие системы с переносом заряда. В настоящее время имеется широкий выбор органических полупроводников с хорошо изученной проводимостью.

Субъединицу надо разбить на фрагменты, которые можно синтезировать отдельно. После синтеза фрагментов надо, как в ЛБ-методе, «помочь» молекулам собраться в нужную струк-

туру. Для этого можно воспользоваться методом синтеза Мерифилда. Это линейный синтез, когда к цепочке фрагментов звено за звеном последовательно химически присоединяются следующие фрагменты (молекулы). Каждый фрагмент имеет химически активную группу (Н) — (начало) и в отдалении от нее группу (К) — (конец). Группы (Н) и (К), принадлежащие разным фрагментам, химически связываются друг с другом. В исходном состоянии активные группы находятся в пассивном (заблокированном) состоянии. Пусть первые фрагменты №1 временно химически присоединены к дну химического реактора. Для соединения фрагментов в желаемой последовательности приводятся следующие операции:

1) активируются (деблокируются) группы (К) у фрагментов №1 в реакторе и производится замена среды на другую, в которой должна проходить реакция присоединения;

2) в другом сосуде активируются группы (Н) у фрагментов №2 и происходит добавление их в реактор.

После завершения реакции присоединения фрагментов №2 к фрагментам №1 вновь производятся операции 1 и 2, но уже с фрагментами №2 и №3 и т.д., пока все фрагменты не будут соединены в нужной последовательности. Поскольку соединение фрагментов осуществляется одинарной (а не двойной) связью, они могут вращаться друг относительно друга вокруг этой связи, как вокруг оси. При таком вращении цепочка связанных фрагментов образует бесформенный клубок, а не четко организованную субъединицу. Чтобы избежать этого, надо затормозить вращение. Например, молекула октадекана  $C_{18}H_{38}$  имеет 17 поворотных осей вращения и поэтому не имеет определенной формы (конформации). Если в ней атомы водорода заменить на фтор, то вращения будут заторможены из-за больших размеров атомов фтора и молекула приобретает форму жесткого стержня. Более того, можно создать стерические препятствия, разрешающие образование связи между фрагментами только при одном определенном взаимном положении фрагментов. Это — вполне решаемая задача. Тогда при присоединении фрагментов, как при самосборке, будет формироваться единственная структура, и, если молекулярный инженер-конструктор все правильно рассчитал, то этой единственной структурой будет желанная субъединица заданной формы и содержания. Надо предусмотреть также образование межфрагментных водородных связей, стабилизирующих нужную форму субъединицы. При этих рассуждениях предполагается, что сами фрагменты тоже сформированы так, что имеют жесткую форму, а конформация фрагментов одного типа одинакова. Вполне возможно, что при синтезе некоторых фрагментов будет использован метод Мерифилда.

Предложенная схема не является, конечно, оптимальной. Возможны лучшие варианты. Эта схема приведена для того, чтобы показать, что в настоящее время нет принципиальных трудностей на пути создания молекулярных функцио-

нальных элементов для микроэлектроники с габаритами по 10 нм ни с точки зрения ассортимента требуемых свойств и веществ, ни с точки зрения методов синтеза. Конечно, синтез субъединиц совсем не так прост, как может показаться из того, что здесь было изложено. Разработка такого синтеза — трудная задача. Но, кажется, настало время попробовать пойти с другого конца, чтобы быстрее и легче прорубить туннель к пределу миниатюризации. Следует отметить, что уровень интеграции операций в химическом синтезе составит порядка 10 в восемнадцатой степени функциональных элементов за один синтез.

Перейдем ко второму пункту программы — проведению «кристаллизации», при которой образуется «двумерный кристалл» (паркетная структура) из субъединиц. Наиболее подходящим для этого является ЛБ-метод. Если субъединицам придать свойство поверхностной активности, что для молекулярной инженерии не представляет труда, то их можно использовать в ЛБ-методе для получения «двумерных кристаллов» из субъединиц на поверхности воды, после чего их можно переносить на подложку. Такая операция неоднократно проводилась на больших белковых молекулах. Вода обеспечивает подвижность частиц и позволяет им хорошо упаковаться. Следует отметить, что статистическая физика «запрещает» существование неограниченных двумерных монокристаллов. Однако при толщине субъединиц 10 нм «кристалл» будет только квазидвумерным. В ЛБ-методе получают «двумерные кристаллиты» размером от 0,01 до 5 мкм (20—10000 диаметров молекул). Это следствие одновременного образования зародышей новой фазы при отсутствии общего ориентирующего градиента свободной энергии. Опыты по созданию такого градиента и определению «термодинамически допустимых» размеров квазидвумерных монокристаллов неизвестны. Есть все основания полагать, что усилия в этом направлении позволят получать требуемые размеры однородных паркетных структур из субъединиц.

Паркетная структура из субъединиц не имеет ни конца, ни начала, поскольку субъединицы (молекулярные приборы) — это простейшие функциональные элементы, например типа ПЗС. Как из этой структуры создать микросхему? Содержательный ответ будет дан ниже. А сейчас отметим, что структура из молекулярных элементов ввиду их малых размеров и маломощности создает проблемы ввода и вывода из нее информации. Очевидно, что управлять структурой необходимо с помощью обычных микроприборов, поэтому необходимо создать элементы, обеспечивающие передачу информации от микроприборов к молекулярным приборам и наоборот. Для этого незаменим технологический вариант туннельной микроскопии, который имеет атомарное разрешение.

Из сказанного следует, что молекулярная технология не заменяет микротехнологию, а опирается на ее достижения, ибо для управления молекулярной структурой, для ввода и вывода

из нее информации нужна традиционная микроэлектроника.

**Молекулярная электроника.** С учетом результатов того, что сделала эволюция для технологии на уровне молекул, следует рассмотреть принципы работы функциональных элементов молекулярных размеров (около 10 нм), выработанные эволюцией. Молекулярная биология позволила обнаружить, что процессы жизнедеятельности на молекулярном уровне проявляются как активность молекулярных функциональных элементов, имеющих размеры 5—10 нм. Они состоят из одной или нескольких макромолекул, объединенных в молекулярный комплекс. В функциональном плане молекулярные функциональные элементы являются молекулярными автоматами, имеющими несколько функциональных состояний, разделенных энергетическими барьерами в 5—20 кТ. Энергетические барьеры защищают молекулярный автомат от тепловых флуктуаций, не позволяя тепловому движению хаотически переключать его из одного состояния в другое. Для таких переключений автомат расходует энергию специальных молекул — переносчиков энергии или использует часть энергии, выделяющейся при химической реакции, которую он катализирует. Наличие энергетических барьеров и потребление энергии позволяют молекулярному автомату осуществлять целенаправленное (заданное его конструкцией) функционирование на фоне теплового движения.

Принципиальной особенностью молекулярных автоматов является то, что за один рабочий цикл они манипулируют строго определенным числом микрочастиц (молекул, ионов или электронов). Дискретность по числу частиц, участвующих в цикле, определяется тем, что каждый из входов автомата способен принять (избирательно адсорбировать) только одну частицу. Это запрограммировано конструкцией автомата. Например, если вход автомата рассчитан на прием электрона, то акцептор для электрона выбран так, что он имеет только один локальный уровень ниже уровня Ферми и поэтому может принять только один электрон. Уровень для второго электрона лежит заметно выше уровня Ферми и поэтому не заселяется вторым электроном. Таким образом, в молекулярных электронных приборах можно достичь не только предела миниатюризации, но и предельно малого числа электронов, переносящих сигнал, снизив это число до единицы. При этом будет достигнут теоретический предел по энергии, необходимой для переключения прибора, и исключен дробовой эффект и связанные с ним возможности сбоя.

Наряду с молекулярными автоматами функционируют и молекулярные каналы для переноса отдельных частиц. Такие каналы служат для избирательного переноса по градиенту электрохимического потенциала электронов, ионов калия, натрия, хлора и др. Имеются и молекулярные автоматы-насосы для индивидуального переноса молекул и ионов против градиента химического потенциала.



Каналами для переноса электронов служат длинные молекулы с сопряженными связями типа полиацетиленов. В такой молекуле возбужденные состояния атомов углерода достаточно сильно перекрываются и образуют одномерную зону проводимости с подвижностью для электронов до 50 см/с на В/см. Попав в зону проводимости, избыточный электрон может свободно перемещаться от одного конца молекулы до другого.

Второй тип каналов для переноса электронов создается цепочками различных циклических молекул, удаленных друг от друга (зазор между молекулами 0,5—1 нм). По молекулам туннелирует электрон. Туннелирование между соседними молекулами происходит за 1—1000 пикосекунд. В таких цепочках реализуется быстрое резонансное и одновременно однонаправленное туннелирование за счет того, что уровень для лишнего электрона в каждой последующей молекуле на 0,1—0,2 эВ ниже, чем в предыдущей. Если электрон протуннелировал на молекулу и задержался на ней на 0,01 пикосекунды, ядра атомов, образующих молекулу, сместятся под действием кулоновского поля лишнего электрона (поляризация остова молекулы) и энергия электрона понизится на 0,1—0,2 эВ, а на молекуле, с которой он туннелировал, поляризация пропадет и энергия электронного уровня на ней повысится. В результате для возвращения электрона на исходную молекулу нужна энергия активации 0,2—0,4 эВ и пока электрон дожидается активации, он успеет туннелировать на следующую по цепочке молекулу. Быстрое резонансное туннелирование происходит тогда, когда молекулы в цепочке подобраны так, что энергия электрона, поляризовавшего данную молекулу, равна энергии электронного уровня на следующей не поляризованной молекуле, т.е. у соседних не поляризованных молекул в цепочке энергии уровней для лишнего электрона должны понижаться на 0,1—0,2 эВ, а не быть одинаковыми, как принято считать.

Рассмотрим теперь возможные варианты использования принципов функционирования молекулярных автоматов при создании приборов молекулярной электроники. Принципиально новые возможности открываются при получении молекулярных приборов, оперирующих одним электроном в качестве носителя сигнала, подобно молекулярным автоматам. Привлекает возможность достижения при этом предела по минимизации энергии на одну операцию. Эта энергия определяется допустимой вероятностью ошибки выполнения простейшей операции в вычислительной технике:  $W_{\text{ош}}$  порядка  $10^{-10} \div 10^{-20}$ . Пусть 5—10 64-разрядных регистров выполняют операции с двоичными элементами на частоте 36 МГц. Каждая операция с двоичным элементом состоит из 5—10 простейших физических операций (подача потенциала на управляющий электрод, инверсия в канале проводимости и т.д.). Если считать допустимым невыполнение или ошибочное выполнение одной простейшей операции за 300 часов, то допустимая вероят-

ность ошибки в простейшей операции составит

$$W_{\text{ош}} = 10^{-17}$$

на одну простейшую операцию.

В транспьютерах  $W_{\text{ош}}$  получится еще на 3—4 порядка меньше.

Найдем энергию, необходимую для перевода электрона с одной молекулы на другую, такую же, считая, что эти молекулы являются, например, элементами регистра. Забирая у молекулы инжектированный электрон-носитель сигнала, мы затратим энергию сродства электрона к молекуле  $E_{\text{ср}}$ . На второй молекуле, куда мы поместили электрон, он должен пробыть время  $t$  (до конца такта), но под действием тепловых флуктуаций может преодолеть энергетический барьер  $E_{\text{ср}}$  и освободиться досрочно, что приведет к ошибке. Вероятность такого процесса  $W$  пропорциональна времени  $t$  и определяется формулой Эйринга для скоростей реакций:

$$W = tv \exp(-E/kT), \quad (1)$$

где  $E = E_{\text{ср}}$ ,  $v = kTZ^*/(hZ)$ ,  $h$  — постоянная Планка,  $Z^*, Z$  — статсуммы в возбужденном (на вершине барьера) и невозбужденном состояниях,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура. Для оценки при комнатной температуре считают  $v = 10^{13} \text{ с}^{-1}$ .

Приравняем  $W = W_{\text{ош}}$  и запишем энергию  $E$ , которая необходима, чтобы сохранить электрон в течение времени  $t$  с вероятностью ошибки, меньшей, чем  $W_{\text{ош}}$ ,

$$E = -kT \ln(W_{\text{ош}}/tv). \quad (2)$$

Для регистров ( $W_{\text{ош}} = 10^{-17}$ ,  $t = 10^{-8} \text{ с}$ ) получим  $E = 1,3 \text{ эВ}$ .

Формула (2) имеет смысл теоретического предела минимальной энергии для совершенствования определенного (целенаправленного) действия, последствия которого сохранятся в течение времени  $t$ , причем вероятность их стирания тепловыми флуктуациями меньше  $W_{\text{ош}}$ . Формула (2) относится, например, к «энергонезависимому» режиму хранения информации в молекулярном ЗУ, когда электрон удерживается на молекуле только энергетическим барьером сродства к молекуле.

Рассмотрим теперь «энергозависимый» вариант операций с одним электроном. Приложим электрическое поле, которое создаст между молекулами разность потенциалов  $V$ , способствующую переходу электрона от одной молекулы к другой. Теперь, без учета эффекта Шотки, энергетический барьер по полю будет составлять  $E = E_{\text{ср}}$ , а в обратном направлении

$$E = E_{\text{ср}} + qV.$$

Даже при  $E_{\text{ср}} = 0$  останется барьер  $E = qV$ , который согласно формулам (1) и (2) будет препятствовать переходу в обратном направлении,

но электрическое поле должно быть все время включено, как в энергозависимом ЗУ.

Формулы (1) и (2) относятся к режиму хранения информации. Оценим минимальную энергию  $E$  для ЗУ емкостью  $N=128$  Мбайт (примерно  $10^9$  бит) при условии, что в нем за год вероятность возникновения ошибки из-за тепловых флуктуаций при комнатной температуре будет меньше 0,1. Для ячейки на один бит  $W_{\text{ош}} = 0,1/N = 10^{-10}$ . Из формулы (2) получим  $E = 1,8 \text{ эВ} = 2,85 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ .

Рассмотрим теперь режим «переключения», т.е. перехода электрона из одного состояния в другое. Для одного электрона это всегда вероятностный процесс с некоторым характерным временем  $\tau$ . Вероятность  $W$  того, что за время  $t$  электрон не совершит переход и произойдет ошибка, будет

$$W = \exp(-t/\tau).$$

Отсюда при  $W=W_{\text{ош}}$ , для  $t$  получим:

$$t = -\tau \ln(W_{\text{ош}}). \quad (3)$$

Возьмем  $W_{\text{ош}} = 10^{-17}$  (для регистра) и получим  $t = 39\tau$ . В макроскопических приборах, где в переходе участвуют сотни или тысячи электронов, время перехода порядка  $\tau$ , а для надежного перехода одного электрона это  $39\tau$ , т.е. по крайней мере на порядок больше.

Использование только одного электрона как носителя сигнала имеет недостатки, накладывающие ограничения на «одноэлектронику» [5].

Ограничение первое. При управляющем воздействии процесс перехода электрона из одного состояния в другое оказывается не детерминированным и время на переход определяется формулой (3). При работе в тактовом режиме это приводит к значительному увеличению времени на один такт. Чтобы не допустить сбоя, необходимо, чтобы время на такт было больше времени, определяемого из формулы (3).

Второе ограничение связано с тем, что в одноэлектронном приборе появление электрона должно существенно изменять его функциональные параметры. Если до появления электрона в приборе был свободный локальный уровень, то после того, как уровень занят, второй электрон не должен появиться в приборе, вероятность его появления должна быть меньше  $W_{\text{ош}}$ . Это означает, что второй уровень должен быть выше первого на энергию  $E$ , рассчитанную по формуле (2) т.е. примерно на 1—2 эВ. Пусть локальный уровень образован не занятой  $S$  орбиталью. Для  $S$  орбитали как для емкости сферы радиуса  $R$  имеем  $V = q/(\epsilon R)$ . Отсюда при  $V > 1 \text{ В}$  и  $\epsilon = 2,5$  получим для радиуса орбитали

$$R < 0,6 \text{ нм}.$$

Емкость диска радиуса  $R$  в два раза меньше емкости сферы, поэтому, моделируя циклическую молекулу диском, получим для ее радиуса  $R < 1,2 \text{ нм}$ . Таким образом, в одноэлектронном

приборе диаметр орбитали для сигнального электрона должен быть меньше 1,2 нм (для сферы) и меньше 2,4 нм (для диска). Эти «неруководимые» трехмерные и двумерные размеры доступны только молекулярной технологией. Отметим, что при снижении температуры уменьшаются тепловые флуктуации, снижается  $E$  (формулы (1) и (2)) и размеры орбиталей растут. Например, при температуре жидкого гелия  $R$  было бы получено в 70 раз больше (84 или 168 нм), т.е. размеры, вполне доступные будущей микротехнологии. Однако глубокое охлаждение отнюдь не генеральная линия микроэлектроники. Вряд ли в будущем персональные компьютеры будут охлаждаться жидким гелием. Поэтому практическое применение одноэлектронных приборов возможно только при использовании молекулярной технологии, обеспечивающей атомную детализацию приборов и организацию орбиталей для сигнальных электронов на подходящих циклических молекулах или акцепторных группах.

Для иллюстрации рассмотрим принципиальную схему молекулярного ЗУ на одноэлектронных приборах (рис. 1). Из схемы наглядно видны достоинства и недостатки одноэлектронных приборов. Между проводящими электродами в диэлектрической среде находится зигзагообразный канал проводимости для инжектированных (сигнальных) электронов. Это могут быть длинные молекулы с сопряженными связями, т.е. молекулы полиацетилена или полидиацетилена и их производные или молекулы полинитрида серы. В канал встроены акцепторные группы или молекулы, формирующие локальный уровень (орбиталь) для захваченного электрона (обозначены цифрами 1—4). Локальный уровень акцептора должен лежать ниже дна зоны проводимости канала на энергию  $E$ , обеспечивающую допустимую вероятность  $W_{\text{ош}}$  тепловой активации электрона в зону проводимости канала по формуле (2). Это показано на энергетической схеме участка канала В-1-А рис. 2,а. Пусть на акцепторе 1 находится электрон. Приложим к верхнему электроду отрицательное напряжение  $-V$  и проследим изменение потенциала электрона вдоль участка зигзага В-1-А. Участок В-1 перпендикулярен к направлению электрического поля, и потенциал вдоль него не будет изменяться, поэтому положение уровня энергии электрона по отношению к энергии дна зоны проводимости на участке В-1 не изменится, а участок 1-А параллелен полю и потенциал электрона вдоль него будет понижаться как показано на рис. 2,б. В результате электрон протуннелирует в зону проводимости участка 1-А (см. рис. 2,б), затем под действием поля долетит до горизонтального участка А-2 и будет находиться в нем, пока из-за теплового дрейфа не попадет в ловушку на орбиталь акцептора 2 (рис. 1) и будет на ней оставаться. После этого приложенное напряжение можно снять. В результате приложенного «прямоугольного» импульса напряжения электрон однозначно переведен от акцептора 1 на акцептор 2. Если теперь на верхний электрод подать положительный импульс напряжения, то картина полностью повторится и

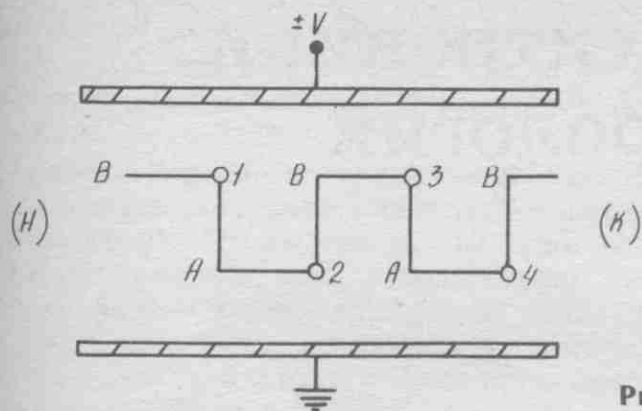


Рис. 1

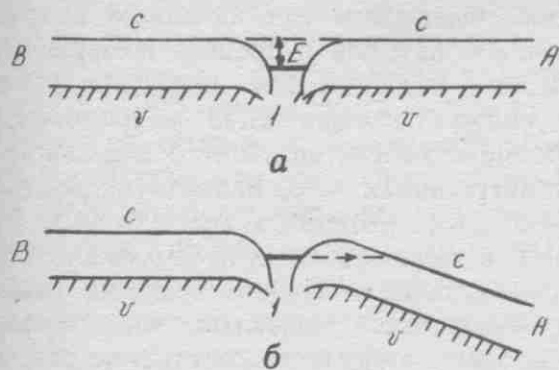


Рис. 2

электрон однозначно перейдет на акцептор 3. Таким образом, асимметричное расположение акцепторов на зигзаге позволяет с помощью знакопеременных импульсов напряжения на наружных электродах перемещать электрон вдоль зигзага с его начала до конца, последовательно проходя все акцепторы зигзага. В конце импульса напряжения все электроны занимают только «верхние» или только «нижние» акцепторы, т.е. максимум половину акцепторов, поэтому емкость зигзага, как ЗУ, в битах равна половине числа содержащихся в нем акцепторов. Если в начале зигзага (Н) есть переходной элемент, переводящий многоэлектронный сигнал в одноэлектронный, а в конце (К) — наоборот, то в зигзаг можно записать любую последовательность «единиц» и «нулей», сохранить ее и при желании вывести.

Зигзаг является гибридом сдвигового регистра и цепочки ПЗС с той разницей, что нет подвода питания к каждому элементу. Оно реализуется общими «полевыми» электродами.

Схема допускает два возможных режима хранения информации: «энергонезависимый» и «энергозависимый» (под напряжением), а надежность хранения дается формулой (2). Длительность тактового импульса при переводе электрона на следующий акцептор должна быть примерно в 40—50 раз больше характерного времени для туннелирования электрона с акцептора в канал проводимости и количественно описывается формулой (3).

Отметим некоторые требования к технологии и конструкции молекулярного ЗУ на одноэлектронных элементах.

Единственный механизм стирания информации, который был рассмотрен, это надбарьерные

переходы электронов за счет тепловых флюктуаций согласно формуле (1). Для одноэлектронных приборов существенен и подбарьерный уход электронов за счет туннелирования. Оценки показывают, что для борьбы с неконтролируемым туннелированием достаточно слоя диэлектрика толщиной в 10—15 нм. На это расстояние должны быть удалены друг от друга и от электродов цепи переноса электронов. Это позволяет (при стороне зигзага 10—15 нм) оценить плотность записи в молекулярной среде в 100 Гбит на квадратный сантиметр в одном слое с учетом трехкратного резервирования.

Еще один механизм стирания информации — это ток между электродами через диэлектрик, в который вкраплены цепи переноса электронов. Ток практически должен равняться нулю. Это трудноразрешимая задача. Надежда на ее решение в том, что ЛБ-технология позволяет создать атомарно-гладкую поверхность электродов путем нанесения 5—10 проводящих монослоев, которые заравнивают поверхность. В этом случае пространство между электродами будет строго детерминировано без переходных слоев, возникающих между диэлектриком и металлом или полупроводником. А это позволяет с помощью квантовохимических методов рассчитать энергетическое положение возможных локальных уровней и вероятность туннелирования на них, т.е. прогнозировать токи при вариации молекулярной структуры и подобрать оптимальный вариант.

Возникнут, конечно, проблемы с очисткой материалов и структур от примесей и множество других проблем, которые появятся при разработке. Но тем не менее молекулярной технологии и молекулярной электроники не избежать, и тот, кто будет работать в этой области сегодня, не окажется завтра в рядах безнадежно догоняющих.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Caspar D.L.D., Klug A. Physical principles in the construction of regular viruses.— Gold Spring Harbor. Symp. Quant. Biol. 1962. Vol. 27, p. 1—24.
2. Корнилов В.В. Математическая модель надмолекулярных структур, полученных самосборкой.— Автореф. канд. дис.: АН СССР, Ин-т биофизики.— Пущино, 1986.
3. Langmuir I., Blodgett K.V. Some new methods for the investigation of monomolecular films.— Kolloid-Z, 73 (1935), 257.
4. Матвеева Н.К. Фото- и электронорезисты на основе полимерных лангмюровских пленок. Автореф. канд. дис. Московский химико-технологический ин-т им. Д.И. Менделеева.— Москва, 1992.
5. Айрапетянц С.В. Предельные возможности молекулярных электронных приборов. Препринт АН СССР, ИЦ биол. исслед., НИВЦ, Пущино, 1987.

# О взаимосвязи биоэлектроники и квантовой метрологии

В.С. БАННИКОВ

Рассмотрена взаимосвязь отправных положений квантовой кибернетики и квантовой метрологии, вытекающая из ключевого понятия когерентности, которое в силу фундаментальности постоянной Планка  $\hbar$  приводит к принципам самопрограммирования как организующему началу квантовых «вычислений» и измерений — основы искусственного интеллекта.

Известный биофизик А. Сент-Дьердьи определил биоэлектронику как исследование в области клеточной регуляции, подчеркивая при этом, что только квантовая механика способна объяснить биологические явления и на электронном (субмолекулярном) и на организменном (надмолекулярном) уровнях [1]. Несмотря на огромные успехи современной биологии, биологический подход до сих пор не смог объяснить процесс самоорганизации «атома жизни» — клетки из молекул [2], как и современная наука не нашла объяснения феномену жизни на уровне клетки, а тем более физической природе психики (сознанию и самосознанию). Очевидно, нужен новый, интегральный подход.

О необходимости привлечения кибернетического подхода, а вместе с тем идей и аппарата квантовой физики для решения этой проблемы неоднократно указывали ведущие физики и математики XX века. Этот вопрос подробно обсуждается в работе [3], в которой показано, что ключевой идеей, объединяющей природные явления различного уровня сложности, является идея когерентности, а конкретно для биологии — использование коллективных квантовых явлений типа сверхпроводимости и мазерного эффекта (нестационарного эффекта Джозефсона). Эти явления в силу когерентности (фазировки) процессов могут проявляться и в макроскопических масштабах — от отдельной клетки до сообщества индивидуумов.

Пути достижения квантовых пределов в информационной технологии в виде квантового кибернетического устройства — вычислителя с предельными возможностями (высококогерентного микроволнового «биокомпьютера») можно рассмотреть на примере физической модели биоэлектронной информационно-вычислительной среды (атомно-молекулярный уровень технологии).

Полученные результаты связаны с выяснением физических ограничений современных и разрабатываемых информационных технологий, обусловленных, в первую очередь, размерными эффектами. Эти ограничения преодолеваются в модели путем использования непрерывного (волнового или спектрального) представления информации вместо дискретного (цифрового). При этом основной принцип высоких технологий — интеграция — получает дальнейшее развитие, но интеграция в виде коллективного (когерентного) процесса осуществляется не в обычном трехмерном (евклидовом) про-

странстве, а в многомерном пространстве временных частот (Фурье-пространстве).

По мере приближения традиционной микроэлектроники, а также развивающейся наноэлектроники, к физическим и технологическим ограничениям возрастает роль высокоточных методов и средств измерений различных физических величин. Как показано в работе [4], решение сложного комплекса метрологических проблем микроэлектроники должно основываться на использовании встроенных мер, использующих фундаментальные физические константы ( $\hbar$ ,  $c$  и др.). Опора на эти константы в высокоточных измерениях означает опять-таки использование макроскопических (высококогерентных) квантовых эффектов типа эффектов Джозефсона, которые могут непосредственно связывать константы с измеряемыми величинами (магнитный поток, фаза электромагнитного излучения и др.). Именно поэтому подобные метрологические средства называются квантовыми. Они характеризуются очень высокими стабильностью и энергетическим разрешением (порядка  $10 \hbar!$ ). Эта тенденция слияния прецизионных технологий и метрологии, как показано в работе [3], достигает естественного предела в виде биоэлектронной информационно-вычислительной среды. Макроскопический характер коллективных (когерентных) квантовых процессов позволяет живой природе использовать эти процессы непосредственно для внутренних измерений («самоизмерения»), по сути тождественных биоэлектронным «вычислениям».

Далее кратко обсуждаются некоторые результаты проведенной работы, а также связь отправных положений квантовой кибернетики и квантовой метрологии.

**Когерентность и принцип самопрограммирования.** Любые известные науке и технике технологии и измерения характеризуются вполне конкретной целью, которую выбирает человек. Выбрать цель самостоятельно способны только живые системы. Возможная роль нелинейных кооперативных эффектов в самоорганизации кибернетических систем обсуждается давно [5], однако фундаментальный вопрос о физической природе целесообразности, т.е. спонтанного выбора одного из бесчисленных параметров порядка данной системы долгое время оставался открытым. Квантово-физическая концепция биоэлектронных «вычислений» позволила сформулировать принцип «самопрограммирования» на основе идеи когерентности.

Когерентность (фазировка, синхронизация, корреляция, кооперативность) — это, как известно, фундаментальная характеристика любых волновых процессов, означающая постоянство разности фаз колебаний во времени и лежащая в основе интерференции. Термин «когерентность» возник в классической теории колебаний и носит общезначимый характер, поскольку отражает «несиловую», информационную (фазовую) сторону физических взаимодействий, описываемую

волновой функцией  $\Psi$ . Биоэлектроника использует квазиклассический вид  $\Psi = ce^{i\varphi}$  в качестве параметра порядка максоскопических когерентных квантовых состояний.

Принцип "самопрограммирования" утверждает, что действительное состояние квантовой кибернетической системы спонтанно выделяется из всех допустимых состояний тем, что оно удовлетворяет максимуму действия. Формально можно было бы считать этот принцип следствием фундаментальных физических принципов: принципа Гамильтона, обычно называемого "принципом наименьшего действия", принципа соответствия Бора (квазиклассичности  $\Psi$ ) и вынужденного излучения Эйнштейна. Однако правильно его считать обобщением опытных данных и основных физических принципов, которые не выводятся. Это верно как для уравнения Шредингера, так и для принципа Гамильтона.

В классическом пределе фаза волновой функции  $\Psi = ce^{i\varphi} = ce^{iS/\hbar}$  очень велика ( $S/\hbar \gg 1$ ). Как показал Р.Фейнман [6], вблизи классической траектории, для которой действие экстремально (первая вариация  $\delta S = 0$ ), в первом приближении все траектории движения имеют близкие фазы  $\varphi \approx S_{\text{кл}}/\hbar$  ( $\delta\varphi = 0$ ), что и означает спонтанное возникновение когерентного состояния, когда складываются амплитуды траекторий. Говоря о "траекториях", следует иметь в виду, что речь идет о многомерной характеристике движения системы в целом — в случае квантовой системы в частотном или Фурье-пространстве. Как только спонтанно возникают различные когерентные (экстремальные) состояния, разность фаз различных  $\Psi$  приобретает непосредственный физический смысл, т.е. может быть измерена. Наглядно когерентные состояния можно представить в виде нерасплывающихся, но периодически колеблющихся волновых пакетов. Вследствие того, что энтропия такого процесса весьма близка к нулю, шум также минимален. Отсюда и чрезвычайно высокие метрологические требования к измерениям когерентных состояний квантовых систем: необходимы высокостабильные приборы на квантовых же эффектах, обеспечивающие соответствующую степень когерентности.

Согласно принципу Гамильтона, действительному движению системы соответствует экстремум действия

$$S = \int_{t_0}^t L dt,$$

необходимым условием которого является равенство нулю первой вариации  $\delta S = 0$ . Выбор вида экстремума ("наибольшее" или "наименьшее") действия находится за пределами вариационного принципа и определяется спецификой физической системы. Принципиально важным для интегрального принципа Гамильтона является то, что протекание процесса выводится с учетом в равной степени прошедшего и будущего системы, что уже указывает на целенаправленный характер экстремума действия. Полагая, что фазовая синхронизация частных состояний  $\Psi$  в Фурье-пространстве с учетом граничных условий и есть физический механизм "редукции  $\Psi$ ", получаем из вариационного принципа для действия различие между прошлым и будущим, т.е. цель. Именно поэтому принцип "самопрограммирования" ("наибольшего" действия) следует отнести к основному принципу квантовой кибернетики.

Еще 60 лет назад Н.Бор высказал гипотезу, что главный контролирующий механизм процесса мышле-

ния настолько чувствителен и избирателен, что его можно описать только в терминах квантовой физики [7]. Совсем недавно знаменитый английский физик Д.Бом подчеркнул фундаментальную роль квантовой когерентности для понимания сути человеческого сознания и смысла (цели) жизни [8]. Другой известный английский физик Р.Пенроуз убежден, что человеческий разум превосходит любые системы искусственного интеллекта именно благодаря использованию законов квантовой физики [9]. Важно подчеркнуть, что речь идет о существовании высококогерентных квантовых состояний мозга как целого, а это принципиально отличается от использования квантовых явлений, например, сверхпроводимости, в отдельных элементах традиционных ЭВМ, действие которых подчиняется классическому принципу определенности. Напротив, биоэлектронные информационные устройства, включая и мозг, действуют на основе квантовых принципов неопределенности  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$  и языка в форме волновой

функции  $\Psi = ce^{iS/\hbar}$ , т.е. на основе фундаментальной природной константы — постоянной Планка  $\hbar$ . Каждый разумный человек знает, что пытаясь вспомнить что-либо или заставить вспомнить другого человека, он воздействует на свое или чужое мышление непредсказуемым образом. Использование языка волновой функции позволяет описать психику как единый процесс сознательного и подсознательного, процесс спонтанного возникновения порядка из хаоса, смысла из бессмыслицы, и наоборот.

**Когерентность и измерения.** Поскольку квантовый биоэлектронный "компьютер" хранит и обрабатывает информацию в виде Фурье-образов не в реальном, а в "мнимом" (n-мерном Фурье-пространстве), измерительные приборы, т.е. устройства ввода-вывода информации, должны характеризоваться когерентностью  $\tau = \Delta v^{-1}$ , не меньшей, чем у природного "копьютера"  $\Delta v/v < 10^{-10}$ . Аналогично развитие квантовых измерений в других областях физики потребовало создания сверхстабильных СВЧ-генераторов, поскольку именно стабильность частоты автогенератора в конечном счете определяет чувствительность макроскопического эксперимента [10]. Понятие когерентности играет исключительно важную роль во всех радиотехнических измерениях. Например, когерентное излучение отдельных элементов антенны — необходимое условие ее направленного действия, а когерентность боковых полос ЧМ-колебания необходима для эффективного подавления шумов.

В отличие от всех известных видов помехоустойчивой модуляции только метод повышения помехоустойчивости на основе абсолютного измерения частоты не обладает пороговым значением. Именно поэтому квантовые "биокомпьютеры" характеризуются предельно большим отношением сигнал/шум. Из принципа "самопрограммирования" следует, что целенаправленность есть следствие избирательности, которая имеет в своей основе встроенные физические эталоны в виде фундаментальных природных констант, прежде всего  $\hbar$ , входящих в уравнение Шредингера. Весьма высокая фазовая когерентность электронного движения — физическая основа всех уникальных особенностей природных "биокомпьютеров", в том числе устойчивости в отношении различных флуктуаций. Можно сказать, что принцип самопрограммирования обеспечивает живым системам "самокалибровку", поскольку для них цели —

это естественные макроскопические масштабы. Такое метрологическое обеспечение можно назвать в прямом смысле квантовой метрологией. В проведенных экспериментах, основанных на высококогерентном генераторе дифракционного излучения, который работал в автодинном режиме в миллиметровом диапазоне длин волн, впервые были получены доказательства наличия высококогерентных состояний в "биокомпьютерах" живых клеток [11].

С проблемой повышения помехоустойчивости непосредственно связана и другая важнейшая техническая проблема — распознавание образов, или фильтрация информации. Процессы измерения и фильтрации по смыслу совпадают. Уже цифровая ЭВМ, являющаяся составной частью высокоточных средств измерений, работает как фильтр, который управляется программой, максимизирующей отношение сигнал/шум. Однако на практике чаще всего априорная информация об объекте измерения, которая необходима для разработки алгоритма фильтрации, отсутствует. Именно поэтому до сих пор не находила удовлетворительного технического решения задача распознавания образов в реальном масштабе времени. В то же время человек ежесекундно успешно решает задачу интерпретации неточной информации, и за счет селективности восприятия способен весьма эффективно подавлять шумы и распознавать образы, оценивая сигнал в целом.

Наиболее перспективным вычислительным средством, позволяющим практически решить в настоящее время эту задачу, является искусственная "нейронная сеть" или "нейрокомпьютер" [12]. Хотя попытки моделирования мозга человека с помощью вероятностных нейросетей делаются давно [13], только современная микроэлектронная элементная база позволила придать разработкам "искусственного интеллекта" (ИИ) практическое значение. Следует подчеркнуть, что моделирование (имитация) мышления средствами ИИ — далеко не само мышление. Термин "искусственный интеллект" — метафора, поскольку законы квантовой физики описывают явления в многомерном Фурье-пространстве, которые весьма сложны уже на элементарном уровне, тогда как нейросеть строится в реальном трехмерном пространстве. По этой причине нейросеть не способна к самопрограммированию, а требует обучения, алгоритм которого задается набором обучающих правил, т.е. человеком. Однако нейросеть — это шаг в правильном направлении, поскольку информация хранится и обрабатывается непосредственно в виде образов, способных коррелировать друг с другом. Нейросеть — это оптимальный адаптивный фильтр. За счет усложнения программирования и использования идеи когерентности (ассоциаций, корреляций) удается реализовать высокую параллельность "вычислений" при неполном описании задачи. Наиболее перспективными представляются ансамблевые нейронные сети со сложной архитектурой, которые реализуют функции распределенной ассоциативной памяти, параллельности и, как следствие, устойчивости к шумам и сбоям. Способность нейросетей к самоадаптации ("самоорганизующийся фильтр") позволяет им работать с неполными, зашумленными входными данными. В отличие от традиционных ЭВМ, нейросеть при распознавании образов не требует программирования: она сама обучается распознаванию, причем за этим процессом точно следить невозможно, так как он носит вероятностный характер, а задается только алгоритм обучения. Так как с кибернетической точки зрения и традиционные ЭВМ, и нейро-

сети, и "биокомпьютеры" представляют собой усиленные устройства с обратной связью (положительной или отрицательной), когерентность (внутренняя или внешняя) сигналов — необходимое условие их функционирования. Отличие "всего лишь" в том, что "биокомпьютер" может быть источником новой информации, а его имитация (ИИ) — нет.

В последнее время идея когерентности (квантовых корреляций) разрабатывается также применительно к квантовым криптографическим устройствам, которые должны функционировать в оптическом диапазоне [14]. В связи с этим в квантовом канале связи обеспечивается помехоустойчивость и абсолютная информационная надежность связи. Согласно рассмотренной физической модели, мозг человека является природным прототипом такого устройства, но работающего не в оптическом, а микроволновом диапазоне.

Таким образом, когерентность можно рассматривать как физическую основу квантовой биоэлектронной информационной технологии — квантовой кибернетики, которая способна прояснить извечные вопросы о том, почему сравнительно небольшая группа атомов узнает о своем существовании, т.е. почему мыслящее существо способно понять, что и как оно мыслит, а также в чем заключается свобода мысли и воли.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сент-Дьердьи А. Биоэлектроника. 1971. М.: Мир. — 80 с.
2. Albrecht — Buehler G. — Int. Rev. of Cytology, 1990, vol. 120, p 191—241.
3. Банников В.С. Биоэлектронные информационно-вычислительные среды. Препринт НИИФП, № 1, 1991, Москва. — 79 с.
4. Сретенский В.Н. Метрологическое обеспечение производства приборов микроэлектроники. — М.: Радио и связь, 1988. — 144 с.
5. Хакен Г. Синергетика. — М.: Мир, 1980. — 404 с.
6. Фейнман Р., Хибс А. Квантовая механика и интегралы по траекториям. — М.: Мир, 1968. — 382 с.
7. Bohr N. Atomic Theory and the Description of Nature. — London, 1934.
8. Бом Д. Наука и духовность: необходимость изменений в культуре. Человек. — М.: Наука, 1993, № 1, с. 7—17.
9. Penrose R. The Emperor's New Mind Concerning Computers, Mind and Laws of Physics. — Oxford Univ. Press, 1989. — 466 p.
10. Брагинский В.Б. Разрешение в макроскопических измерениях: достижения и перспективы. — УФН, 1988, т. 156, вып. 1, с. 93—113.
11. Банников В.С., Веденский О.Ю., Ермак Г.П., Колесник О.Л., Шестопалов В.П. ГДИ-автодинный метод исследования биообъектов. — ДАН СССР, 1990, т. 315, № 3, с. 733—737.
12. Shandl J. Neural networks are ready for prime time. Electronic Design, 1993, vol. 41, N 4, pp. 51—54, 57—58.
13. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики. — М.: Мир, 1965. — 480 с.
14. Беннет Ч.Г., Брассар Ж., Экерт А.К. Квантовая криптография. — В мире науки, 1992, № 11/12, с. 130—139.

# Нейроинформатика и нейронные сети

(АНАЛИЗ ИДЕЙ)

Л.М.АТАМАНЧУК, А.А.ПЕТРОВ

**Исследование нейросетей и нейрокомпьютеров открывает перспективы создания информационных систем высокой производительности.**

Интерес к нейронам, нейронным сетям и работе мозга появился в НИИФП 30 лет назад, одновременно с основанием института. Этот интерес был обусловлен убежденностью первого директора института В.И.Стафеева и ведущих сотрудников С.В.Айрапетянца, Э.И. Клямко, Р.А.Дуриняна и других в том, что именно понимание процессов, происходящих в нервной системе и мозге, откроет наиболее широкие и далекие перспективы для микроэлектроники.

До настоящего времени уровень возможностей, заложенных природой в мозг человека, еще не достигнут никакими устройствами ни по интеграции, ни по быстрдействию, ни по надежности. Мозг обладает непревзойденной способностью обучаться и создавать при этом сложную адаптивную эмпирическую модель внешнего мира.

Эти особенности мозга вызывают большой интерес исследователей и стимулируют поиск возможностей воссоздания в вычислительной технике таких свойств мозга, как параллельность обработки информации, способность к обучению, ассоциативному запоминанию, распознаванию образов, высокая надежность и т.п.

В последние годы, сначала за рубежом, а затем и в России вновь начало обретать силу научно-техническое направление, которое получило название "нейроинформатика". Оно включает разработку алгоритмов, моделей, процессорных элементов, устройств и систем на базе представлений о функционировании нейронных сетей мозга.

ЭВМ, использующие модели нейронных сетей, получили название нейрокомпьютеров, а интегральные микросхемы, имитирующие работу нейронных сетей — нейрочипов.

В предлагаемой статье не ставится задача проанализировать мировые достижения в области создания нейрочипов и нейрокомпьютеров, хотя успехи этого направления впечатляют. Цель данной работы — подвести итоги сложного пути развития деятельности НИИФП в области нейроинформатики и показать некоторые перспективы, открывающиеся в этом направлении с учетом собственных возможностей нынешнего времени.

**Моделирование нейронных сетей (60-е годы).** Первый этап работ в Институте в области нейроинформатики — с 1964 по 1970 гг. — характеризуется ярко выраженным направлением на исследования и моделирование нейрона и нейронных сетей, как элементарных электрофизических систем обработки информации в нервной системе [1]. Были разработаны аналитическая модель нейрона, как порогового элемента, кодирующего внешние воздействия частотой генерации

импульсов [2], и элементы теории нейронных цепей на ее основе [3].

Анализ процессов передачи сигналов в нейронной сети [4] позволил разработать статистическую теорию работы простейших нейронных ансамблей — рецептивных полей [5]. Особое место занимали изучение и моделирование процессов обнаружения, обработки, распознавания и классификации сигналов в зрительном анализаторе, как наиболее информативной системы восприятия внешнего мира (известно, что человек получает 90—96% информации через зрительную систему). Были разработаны математические модели рецептивных полей детекторов движения, выделения контуров, временной и пространственной декорреляции сигналов на основе теории статистических решений [6, 7]. Алгоритмическая модель процесса формирования классифицирующих нейронных структур на основе теории графов позволила правдоподобно описать процесс узнавания изображений человеком [8].

В целом этот этап создал базу для понимания многих процессов, происходящих в биологических нейронных сетях, и послужил основой для перехода к этапу реализации нейронных сетей техническими средствами.

В современном представлении искусственные нейронные сети — это структуры с параллельной распределенной обработкой информации, состоящие из процессорных элементов, соединенных между собой каналами связи с однонаправленным распространением сигналов. Каждая связь характеризуется весовым коэффициентом. Она может быть возбуждающей (т.е. увеличивающей активность нейрона) или тормозящей. Нейроны могут обладать локальной памятью и способны выполнять нелинейные операции по обработке информации.

Нейроны группируются по слоям, а слои, расположенные последовательно один за другим, объединяются в сеть связями различного вида: прямыми, перекрестными и обратными.

Искусственный нейрон сети, моделирующий функции биологического нейрона, осуществляет:

- умножение значений сигналов, приходящих на него из окружающей среды, либо от других нейронов предшествующего слоя, на весовые коэффициенты входов нейронов (синапсов),
- суммирование взвешенных значений приходящих сигналов,
- сравнение суммарного сигнала с пороговым уровнем,
- некоторое функциональное (обычно нелинейное) преобразование полученной суммы:

$$Y_i^{(L)} = f\left(\sum_{j=1}^N Y_j^{(L-1)} \cdot W_{ij} - Q_i \cdot W_{oi}\right), \quad (1)$$

$$(i = 1, M)$$

где  $Y^{(L)}$  — уровень активности нейрона в слое  $L$ ;  $Y_j^{(L-1)}$  — уровень активности нейрона в предшествующем слое  $L-1$  (или сигнал, приходящий из окружающей среды);  $W_{ij}$  — весовой коэффициент, определяющий относительное влияние  $j$ -го нейрона в слое  $L-1$  на  $i$ -й нейрон в слое  $L$ ;  $Q_i$  — модулируемый весом  $W_{oi}$  внутренний порог нейрона, который должен быть преодолен, чтобы возникла активность нейрона;  $M$  — количество нейронов в слое  $L$ ;  $N$  — количество нейронов в предшествующем слое  $L-1$ ;  $f$  — функция активности нейронов, которая выполняет отображение  $N$ -мерного вектора уровней активности нейронов в слое  $L-1$  (или сигналов, приходящих из окружающей среды) в  $M$ -мерный вектор уровней активности нейронов в последующем слое  $L$ .

Искусственные нейронные сети могут быть реализованы с помощью различных технических средств: электронных цифровых или аналоговых схем, оптических или оптоэлектронных устройств, а также путем эмуляции на ЭВМ.

Оптоэлектронный процессор — прототип нейрокompьютера с фиксированными весовыми коэффициентами (70-е годы). Выражение (1), определяющее операции, выполняемые нейронной сетью, представляет собой одномерную взаимную корреляционную функцию (вектор  $Y^{(L)}$ ), вычисляемую для вектора входных сигналов  $Y^{(L-1)}$  и матрицы эталонных сигналов  $W$  [9]. Именно эту функцию реализует некогерентный оптический коррелятор, который может вычислять и двумерную корреляционную функцию (матрицу  $Y^{(L)}$ ), если входной вектор заменить на матрицу входных сигналов.

Интерес к оптическим методам реализации искусственных нейронных сетей обусловлен преимущественно от использования трехмерного пространства и параллельностью выполнения операций умножения и суммирования при обработке информации. Микроэлектроника, ограниченная планарной технологией, такими возможностями не обладает. Эти потенциальные возможности оптических методов обусловили проведение за рубежом и в нашей стране большого количества работ по созданию оптических и оптоэлектронных вычислительных устройств и элементной базы для их реализации [9, 10].

В НИИФП работа по созданию оптоэлектронных процессоров проводилась с 1970 года. Она в немалой степени способствовала развитию в институте направления по излучательным диодам и фотоприемным устройствам. В семидесятые годы были разработаны концепции и принципы построения некогерентных оптоэлектронных процессоров на основе матричных оптоэлектронных БИС и предложены оригинальные конструкции корреляторов [11, 12, 13]. Проводилось теоретическое и экспериментальное исследование особенностей формирования и регистрации оптических изображений с помощью матричных оптоэлектронных БИС [14]. Разработанная методика проектирования матричных оптоэлектронных процессоров использовалась для определения требований к элементной базе [15, 16].

В НИИФП были разработаны и изготовлены экспериментальные образцы светоизлучающих матриц для

воспроизведения входных изображений и матричных фотоприемников, предназначенных для регистрации изображений выходной функции коррелятора.

В середине 70-х годов впервые в СССР и одновременно с разработкой [9] американского, так называемого "станфордского", векторно-матричного умножителя сотрудники НИИФП изготовили матричный оптоэлектронный коррелятор, который представлял собой оптоэлектронный прототип нейрокompьютера. Он обладал быстродействием 100 миллионов операций типа умножений в секунду и мог успешно конкурировать с электронной техникой [17].

Результатом проведенных исследований прототипа и развития теории некогерентных оптических корреляторов была разработка оригинальной концепции планарного фотонного процессора — реализация некогерентного оптического коррелятора в виде одной гибридной оптоэлектронной БИС [13].

Однако существенным ограничением функций оптоэлектронных вариантов нейрокompьютеров оставалась невозможность перестраивать эталонные изображения (матрицы весовых коэффициентов), воспроизводимые на сменных диапозитивах. "Камнем преткновения" в оптической обработке информации явилось создание управляемого транспаранта или пространственно-временного модулятора света. Поэтому с начала 80-х годов в НИИФП начались усиленные работы над этой проблемой.

Перестраиваемая матрица весовых коэффициентов — оптический управляемый транспарант (80-е годы). В результате анализа зарубежных и отечественных работ были выбраны два направления создания устройств для воспроизведения перестраиваемых изображений: магнитооптические управляемые транспаранты (МОУТ) и жидкокристаллические управляемые транспаранты (ЖКУТ).

Совместно с ВНИИМЭТ (г. Калуга) была разработана технология и созданы функционирующие экспериментальные образцы МОУТ с использованием эффекта Фарадея [18]. Образцы были изготовлены в двух вариантах: с числом элементов  $32 \times 32$  и  $128 \times 128$ . Их оптическая эффективность составила 10%, контрастность 50:1, время записи информации 0,1 с. На технологию и конструкции МОУТ в 1982–86 гг. было получено пять авторских свидетельств. Однако эти транспаранты позволяли отображать только бинарные изображения, причем глубина модуляции света (различие "1" и "0") существенно зависела от длины волны и ширины спектра считывающего света, что практически исключило возможность использования в процессоре матриц светоизлучающих диодов. Значительное поглощение света в транспаранте делало также невозможным построение оптоэлектронного процессора с двумя последовательными транспарантами (для воспроизведения входного и эталонного изображений) и лазерным диодом в качестве источника света: на фотоприемник попадало слишком малое число фотонов и необходимо было увеличивать время накопления. Следствием этого была потеря быстродействия. Поэтому основное внимание было направлено на разработку технологии ЖКУТ.

Первый вариант ЖКУТ был изготовлен на основе пассивной ЖК-матрицы с использованием В-эффекта. Созданный образец ЖКУТ имел число элементов  $128 \times 128$ , эффективность около 10%, контрастность 10:1 и быстродействие, позволявшее воспроизводить 1–5 изображений в секунду [19].

Необходимость повышения глубины модуляции



света (контраста), оптической эффективности и быстродействия ЖКУТ заставила перейти от варианта пассивного ЖК-транспаранта к созданию активного.

Совместно с НИИМВ и заводом "Элма" была проведена разработка управляющей матрицы тонкопленочных полевых транзисторов на гидрогенизированном аморфном кремнии [20], ЖК индикатора [21] и ЖК пространственно-временного модулятора света на их основе [22].

В дальнейшем эта работа была продолжена в направлении создания активной матрицы для цветного ЖК-экрана карманного телевизора и завершилась изготовлением нескольких действующих образцов цветных телевизионных экранов с последующей передачей работы на завод "Элма" [22, 23]. К концу 80-х годов несмотря на некоторые успехи оптического нейрокомпьютерного направления, особенно в США и Японии [24], на основании анализа и собственного опыта был сделан вывод о том, что вопреки распространенным оптимистичным прогнозам, оптоэлектронное направление не сможет составить серьезной конкуренции микроэлектронному (такие фирмы, как Intel, Motorola, Hitachi и др. в настоящее время уже приступили к серийному выпуску нейронных СБИС). В то же время уровень отечественной микроэлектроники затрудняет разработку нейрочипов.

Для решения задач научного и прикладного значения в нейроинформатике необходимо было перейти к созданию собственных нейросетевых программ, поскольку аппаратные и программные нейросетевые продукты до последнего времени были практически недоступны отечественным разработчикам. Переход на программное моделирование, исследование алгоритмов искусственных нейронных сетей и анализ перспективных направлений нейроинформатики в НИИФП совпал с началом 90-х годов.

Программная среда для создания обучаемых нейросетевых экспертных систем и ее практическое применение (90-е годы). В качестве конкретной области применения нейронных сетей было выбрано направление создания обучаемых нейросетевых экспертных систем (ЭС).

Этот выбор по ряду причин не был случайным. В последнее десятилетие в рамках исследований по искусственному интеллекту сформировалось самостоятельное направление — экспертные системы. Цель этого направления — решение сложных задач путем использования знаний экспертов и процедур логического вывода.

К таким задачам в настоящее время можно отнести прогнозирование поведения сложных динамических систем, предсказание экологической и медико-демографической обстановки в городах и регионах; получение оперативной оценки возможных социально-экономических последствий решения, принимаемых правительством, законодательными и финансовыми органами в области налоговой и кредитно-денежной политики; краткосрочный и долгосрочный прогнозы погоды и климатических изменений в природе Земли; предсказания, связанные с возникновением и распространением эпидемий; прогнозирование в макро- и микроэкономике и многие другие.

При решении подобных задач возникают проблемы, к общим признакам которых можно отнести следующие:

— невозможность или чрезвычайную сложность построения строгих математических моделей систем;

— динамический характер поведения систем;

— необходимость сбора и обработки оперативной информации, полученной из различных (часто удаленных друг от друга) источников, с последующим накоплением информации в базах данных;

— необходимость анализа и получения экспертной оценки эволюции поведения системы с учетом оперативной и хранящейся в базе данных информации.

В настоящее время экспертные системы уже применяются в различных областях интеллектуальной деятельности: в проектировании интегральных микросхем и поиске неисправностей технических систем, в медицинской диагностике и разведке полезных ископаемых, позволяя повысить в 5–10 раз производительность труда. Ведутся разработки экспертных систем для таких проблем, как раннее предупреждение национальных и международных конфликтов, планирование и распределение ресурсов, принятие решений в кризисных ситуациях, оптимизация систем управления разных уровней от кабинета министров до фирмы, банка или магазина. По прогнозам рынок экспертных систем в США в 1995 году составит 8–10, а в 2000 году — 60 млрд. дол. [25].

Однако стоимость разработки таких систем традиционными методами велика: даже для относительно простых экспертных систем, содержащих от 200 до 1000 правил и рассчитанных на использование ПЭВМ, стоимость разработки составляет от 50 тыс. до 300 тыс. дол., время разработки — до года, трудоемкость — несколько человеко-лет. Для сложных экспертных систем эти показатели на порядок выше [25]. Тем не менее, несмотря на значительную стоимость разработок, экспертные системы приносят существенный доход и являются весьма эффективным средством решения задач, в которых формальные методы не приносят успеха.

Поиск путей снижения затрат на разработки экспертных систем и дальнейшее повышение их эффективности привел к попыткам использования для создания экспертных систем искусственных нейронных сетей.

Преимущества нейросетевого подхода при создании экспертных систем обусловлены принципиальной возможностью эффективно преодолевать перечисленные выше проблемы. К основным достоинствам этого подхода можно отнести следующие:

*обучаемость*: способность нейронных сетей обучаться на примерах (т.е. реально существовавших фактах или результатах) и создавать в процессе обучения неявную (скрытую) эмпирическую модель анализируемой системы, процесса или явления;

*нелинейное отображение*: способность нейронных сетей к произвольному нелинейному отображению информации (представленной в виде векторов или матриц числовых значений);

*правдоподобие*: нелинейное отображение приводит к более правдоподобным обобщениям — экстраполяциям, чем, например, полиномиальные модели;

*устойчивость*: метод независимой проверки достоверности созданной модели, используемый для нейросетевых экспертных систем, позволяет автоматически оценивать, как много истинной информации содержится в обучающей выборке. Это делает нейросетевую экспертную систему устойчивой к шумам и недостатку данных;

*простота использования*: весь процесс обучения нейронной сети может быть автоматизирован в программе, так что пользователь, даже не являющийся

экспертом в анализируемой проблеме и специалистом по нейронным сетям, может за короткое время приготовить разумную экспертную оценку.

Возможности нейросетевых экспертных систем прогнозирования имеют и свои ограничения. Полезные предсказания и модели могут быть получены только в том случае, если имеется достаточное количество достоверных данных, на основе которых нейронная сеть может построить корректную модель.

В отличие от традиционных экспертных систем, для которых логическая структура решения задачи должна быть задана априори, нейросетевые экспертные системы создаются эмпирически путем обучения.

В процессе обучения нейронной сети, составляющей основу таких экспертных систем, подстраиваются коэффициенты связей между нейронами сети, моделируя функцию преобразования входных данных в выходные и тем самым, создавая эмпирическую (имитационную) модель решения задачи получения требуемого выхода по заданному входу. На основе такой эмпирической модели и функционирует нейросетевая экспертная система.

С использованием библиотеки Turbo-Vision фирмы Borland-International в НИИФП была разработана программная среда Нейросетевых Экспертных Систем — НЭКСИ [26, 27].

НЭКСИ представляет собой набор взаимосвязанных программных средств — интегрированную среду, ориентированную на исследователя нейронных сетей и пользователя, самостоятельно разрабатывающего различные полезные для работы системы диагностики, классификации, распознавания, прогнозирования или экспертизы.

Как отмечено выше, создание экспертной системы осуществляется путем обучения на примерах. Примеры для обучения составляются из "ситуаций" или "объектов".

*Ситуация (объект)* представляет собой упорядоченный набор числовых значений параметров, называемых показателями ситуации (атрибутами объекта), которые представляют кодированное описание реальных событий, процессов, явлений, условий, классов, состояний и других характеристик реального мира, используемых в практических приложениях. Ситуацию можно рассматривать как вектор числовых значений. Размерность вектора определяется числом показателей ситуации.

Входные ситуации содержат наборы входных данных, т.е. условия задачи. Выходные ситуации включают наборы выходных данных, т.е. решения задачи.

Пара соответствующих друг другу входной и выходной ситуаций представляет собой пример. Совокупность примеров для обучения нейронной сети составляет обучающую выборку. Совокупность примеров для тестирования качества обучения нейронной сети образует тестовую выборку. Одна или несколько обучающих и тестовых выборок составляют базу данных экспертной системы.

В процессе обучения нейронной сети экспертной системы формируется база знаний, которая представляет собой файл форматированных данных, включающий информацию об архитектуре, функции активности нейронов и значениях параметров обученной сети (в частности, весов связи нейронов), а также об использованных при обучении примерах ситуаций (объектов).

НЭКСИ обеспечивает диалоговый режим работы пользователя и состоит из следующих связанных через интерфейс программных блоков:

- просмотр текстовых файлов,
- создание базы данных,

- обучение нейронных сетей,
- исследование нейронных сетей,
- тестирование и экспертиза
- сервисные средства среды,
- справочник и руководство пользователя.

В НЭКСИ могут быть использованы два основных класса архитектуры искусственных нейронных сетей:

прямосвязные трехслойные сети с обратным распространением ошибки в процессе обучения — наиболее широко применяемые в настоящее время;

рекуррентные сети нейронов — сети с обратными внешними связями, чьи выходные сигналы зависят от "предысторий" входных сигналов, накопленных за несколько временных периодов.

Программная среда НЭКСИ предоставляет возможности;

создавать эмпирические модели сложных динамических систем и количественно оценивать их достоверность;

проводить оптимизацию архитектуры и исследование динамики обучения нейронной сети, используя встроенную графику;

обеспечивать автоматическое (без участия эксперта) формирование базы знаний экспертной системы;

выявлять ключевые факторы в анализируемом процессе или явлении;

количественно оценивать качество обучения и точность экспертизы;

проводить экспертные оценки и прогнозировать поведение систем;

протоколировать процессы обучения, тестирования и экспертизы.

Среда НЭКСИ выполнена в двух вариантах: для работы с векторами аналоговых сигналов, представленных последовательностями действительных чисел, и для работы с матрицами двоичных сигналов — бинарными изображениями.

На основе НЭКСИ созданы демонстрационные прототипы нейронных экспертных систем, предназначенные для решения практических задач:

"реактор" — обнаружение отклонений режима работы технологической установки от номинального и диагностика повреждений датчиков, контролирующих технологических процесс;

"образ" — распознавание изображений в системах технического зрения и идентификации образов на примере отпечатков пальцев;

"валюта" — прогнозирование изменений курсов валют;

"биржа" — предсказание изменений цен на фондовой бирже;

"тест" — психологическое тестирование людей.

Два прототипа экспертных систем были разработаны для Госкомстата России:

ЭССЭ — экспертная система состояния экономики государства [28],

ЭСКДП — экспертная система кредитно-денежной политики, прогнозирующая социально-экономические последствия проведения определенной политики в области финансов и кредитной системы.

Для реализации ЭССЭ была создана база данных, в которой были использованы: статистические материалы Европейской системы интегрированных экономических счетов за 1977–1989 годы, статистические сборники ООН, справочник валют стран мира и другие документы, представляющие динамику развития экономики и государств мира.

База данных для обучения и тестирования была сформирована в виде примеров экономических ситуаций, содержащих последовательности числовых значений макроэкономических показателей США, Франции и Германии. Созданная нейросетевая экспертная система продемонстрировала способность с требуемой точностью прогнозировать значения макроэкономических показателей государств с устойчивой рыночной экономикой.

\* \* \*

Существует ряд научно-технических направлений, в которых применение нейросетевых методов и разработанных программных средств представляется весьма перспективным. К ним относятся:

- технология и моделирование,
- управление и прогнозирование,
- экология и диагностика,
- системы технического зрения,
- нанотехнология и наноконьютеры.

По этим разделам в НИИФП имеется определенный научно-технический задел, который позволяет успешно развивать следующие направления:

— имитационное моделирование и оптимизация сложных технологических процессов на основе созданной программной среды НЭКСИ;

— управление технологическим (например, кластерным) оборудованием путем включения в него элементов технологии искусственного интеллекта в виде ПЭВМ с соответствующими аппаратными средствами и программным обеспечением, использующим нейросетевой подход и принципы нечеткой логики;

— разработка системы технического обоняния (многокомпонентного анализатора газов) на основе интегральных микросхем матричных полупроводниковых газовых сенсоров и обучаемой нейросетевой экспертной системы газового анализа для экологического мониторинга;

— разработка различных систем диагностики на базе магнитометров и обучаемой нейросетевой экспертной системы;

— создание программных средств оптимального планирования и управления производством и экономическим развитием отраслей, городов и регионов. Возможность выявления с помощью нейросетевых экспертных систем важнейших факторов, влияющих на социально-политическое и финансово-экономические показатели, уже сейчас используется при принятии стратегических и тактических управленческих решений. По мере накопления банков данных роль этого направления нейронинформатики будет неуклонно возрастать;

— разработка обучаемых систем технического зрения для различных применений: распознавания отпечатков пальцев, кредитных карточек, шрифтов и т.п.

— становление нанотехнологии и поисковые работы в направлении создания нейрокомпьютеров с использованием наносхем и системотехники. Переход от микро- к нанoeлектронике нельзя рассматривать как традиционную эволюцию размеров и степени интеграции СБИС. Малые размеры элементов нанoeлектроники обуславливают не только увеличение степени интеграции, но и функциональную ограниченность и наличие значительных случайных факторов в характеристиках нанoelementов. Случайные факторы, вызванные квантово-размерными эффектами, будут затруднять или делать практически невозможным использование методов формальной логики, на которой базируется вся современ-

ная цифровая вычислительная техника. Создание вычислительных систем на базе нанотехнологии потребует компенсации потери качества элементов путем увеличения их количества и перехода от формальной к нечеткой логике. Поэтому нанoeлектроника должна использовать новый подход, основанный на принципах параллелизма, самоорганизации и стохастичности. Параллелизм: естественное распараллеливание процесса обработки информации в результате использования большого количества процессорных нанoelementов — нейронов. Самоорганизация: формирование функциональных взаимосвязанных ансамблей нейронных сетей за счет обучения ансамблей нейронов выполнению определенных функций и установлению необходимых для решения задач связей между ансамблями.

Стохастичность: реализуемое за счет сверхинтеграции нанoelementов использование принципа усреднения стохастических сигналов по ансамблям нейронов, обеспечивающего высокую помехоустойчивость, надежность и быстродействие;

— разработка ассоциативных запоминающих устройств на основе созданных на базе нанотехнологии искусственных нейронных сетей;

— использование искусственных нейронных сетей для идентификации данных при считывании информации, хранящейся в ЗУ с накопителями в виде структур с неоднородностями, индуцированными методами нанотехнологии.

В заключение следует подчеркнуть, что выбор нейронных сетей в качестве объекта моделирования и технической реализации не был ошибочным: это убедительно доказывают успехи и лавинообразный рост работ в нейронинформатике.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Айрапетянц С.В. и др. Бионические аспекты микроелектроники.— Электронная техника. Сер. 6, 1967, вып. 7, с. 3—21.
2. Петров А.А., Пьянзина Л.Я. «К вопросу о математическом моделировании процессов переработки информации в нейроне», Электронная техника, серия VI, вып. 2, 1966, с. 95—101.
3. Петров А.А., Пьянзина Л.Я. «Элементы математической теории нейрона и нейронных цепей», Кибернетические аспекты в изучении работы мозга, М., Наука, 1970, с. 223—230.
4. Петров А.А. «К вопросу о статистическом характере передачи сигналов в нервной системе», Биофизика, т. XIV, № 1, 1969, с. 143—150.
5. Петров А.А., Петров Б.И., Петров Ю.М. «Статистическая обработка сигналов взаимотормозной сетью», Автоматика и вычислительная техника, Рига, № 3, 1967, с. 69—74.
6. Петров А.А. «Оптимальная обработка фоторецепторных сигналов и строение сетчатки», Бионика и биокибернетика, Сб.ст., 1968, с. 117—125.
7. Петров А.А. «Об алгоритмах предварительной обработки сигналов в зрительном анализаторе», Биофизика, т. XVI, № 3, 1971, с. 512—519.
8. Петров А.А., Пьянзина Л.Я., Чебаков В.А. «Алгоритмическая модель процесса формирования классифицирующих нейронных структур», Электронная техника, серия VI, вып. 1(16), 1969, с. 100—110.
9. ТИИЭР, т. 65, № 1, 1977, т. 72, № 7, 1984.
10. Оптическая обработка информации, Л., ФТИ им. А.Ф.Иоффе, 1979, с. 206.
11. Атаманчук Л.М., Петров А.А. «Оптический коррелятор», а.с. № 943769, 1972.
12. Атаманчук Л.М., Петров А.А. «Оптический коррелятор», а.с. № 960863, 1975.
13. Атаманчук Л.М., Борисов Б.С., Петров А.А. «Гибридная интегральная схема», а.с. № 632011, 1976.

14. Атаманчук Л.М., Петров А.А. «Особенности формирования и регистрации оптических изображений с помощью матричных оптоэлектронных интегральных микросхем», Всесоюзная конференция «Оптические изображения и регистрирующие среды», Л., 1982, с. 182.
15. Петров А.А. «Перспективы развития некогерентных оптоэлектронных процессоров для обработки изображений», IV Всесоюзная школа молодых ученых и специалистов по оптической обработке информации, 1982, Минск, ч. I, с. 5—7.
16. Петров А.А. «Оптоэлектронные устройства для оптических процессоров», Электронная промышленность, вып. 8(125), 1983, с. 83—87.
17. Петров А.А. «Три концепции построения ОВМ: состояние и перспективы», Шестая всесоюзная школа-семинар по оптической обработке информации, 1986, Фрунзе, ч. I, с. 7—8.
18. Зюбин В.В., Зюбина Н.В., Петров А.А. Магнитооптический транспарант с электрическим управлением.— В кн.: IV Всесоюзная школа молодых ученых и специалистов по оптической обработке информации. Ч. II.— Минск, 1982, с. 211—213.
19. Атаманчук Л.М. и др. «Разработка и исследование жидкокристаллического управляемого транспаранта на В-эффекте», Там же, ч. II, с. 226—228.
20. Атаманчук Л.М., Борисов Б.С., Васенков А.А., Лещенко П.Т., Петров А.А. «Матрица тонкопленочных полевых транзисторов на аморфном кремнии для управления ЖКИ», Электронная промышленность, вып. 8(166), 1987, с. 35—37.
21. Атаманчук Л.М., Борисов Б.С., Васенков А.А., Лещенко П.Т., Петров А.А. «Жидкокристаллический индикатор, адресуемый матрицей тонкопленочных полевых транзисторов на аморфном кремнии», Электронная промышленность, вып. 8(166), 1987, с. 37—38.
22. Атаманчук Л.М., Лещенко П.Т., Петров А.А. «ЖК ПВМС для воспроизведения телевизионного изображения», Пространственно-временные модуляторы света для оптической обработки информации, Л., 1987, с. 58—63.
23. Атаманчук Л.М., Лещенко П.Т., Петров А.А., Приходько Е.Л. «Матрица тонкопленочных полевых транзисторов на основе аморфного кремния для цветного ЖК экрана», Электронная промышленность, вып. 5(195), 1988, с. 35—37.
24. Applied Optics, Vol. 26, N 23, 1987.
25. Справочник «Искусственный интеллект», Книга I, М., «Радио и связь», 1990.
26. Atamanchuk L., Petrov A. «Construction and Learning Problems for User Neural Expert Systems», 1992 RNNS/IEEE Symposium on Neuroinformatics and Neurocomputing, Rostov-on-Don, USSR, Oct. 7—Oct. 10, 1992.
27. Атаманчук Л.М., Петров А.А. «Программная среда для создания обучающихся нейросетевых экспертных систем», Международная научно-техническая конференция «Микроэлектроника и информатика», Москва, Зеленоград, 1993, с. 69—70.
28. Петров А.А., Атаманчук Л.М. Нейросетевая экспертная система состояния экономики.— В кн.: Международная научно-техническая конференция «Микроэлектроника и информатика».— М.: Зеленоград, 1993, с. 71—72.

## О фундаментальных исследованиях нелинейных эффектов

(КРАТКИЙ ОБЗОР)

В.М.ЕЛЕОНСКИЙ

Начало фундаментальных исследований физики нелинейных явлений в НИИФП относится к концу 60-х годов. Первые работы в области существенно нелинейных образований были связаны с проблемами распространения сигналов в нейристорных линиях передачи, содержащих нелинейные элементы с N- или S-образной вольт-амперной характеристикой [1]. Одновременно с этим были выполнены (совместно с ФИАН) исследования [2] пространственно-неоднородных распределений электромагнитных полей в средах с нелинейной диэлектрической проницаемостью.

В последующие десятилетия эти две задачи, из которых вторая в те годы не имела, как казалось, прямого прикладного значения, привели к формированию двух основных направлений фундаментальных исследований физики нелинейных явлений, получивших широкое признание как в России, так и за рубежом, и оказавших значительное влияние на развитие теоретических и прикладных исследований.

В 70-е годы основное внимание в анализе существенно нелинейных образований было перенесено на исследования движущихся доменных границ и магнитных солитонов [3], а также на исследования самосфокусированных волноводных каналов нелинейных диэлектриков [4]. Решение ряда возникающих при этом задач было получено на основе качественной теории соответ-

ствующих динамических систем и теории бифуркаций А.Пуанкаре. Накопление опыта исследований существенно нелинейных объектов различной физической природы (магнитных солитонов, вихрей в сверхпроводящих средах, самосфокусированных волноводов в нелинейных диэлектриках) как особых объектов теории динамических систем привело к тому, что работы сравнительно небольшой группы теоретиков (А.Звездин, А.Попков, Н.Кирова, Н.Кулагин, Н.Ахмедиев, Н.Мицкевич, В.Редько) в 80-е годы уже занимали достойное место на общем высоком фоне исследований по физике нелинейных явлений, проводимых в нашей стране.

Так, в 80-е годы получили признание и дальнейшее развитие пионерские работы, выполненные НИИФП совместно с ФИАН, по теории самолокализованных в пространстве и периодических по времени состояний нелинейных полей [5]. В настоящее время вновь усилился интерес к этой проблеме в связи с исследованием солитонов в биополимерах и иных квазиодномерных периодических структурах.

В эти же годы широкое развитие получил цикл работ по теории оптических солитонов в волоконных волноводах. Был решен ряд проблем, связанных с классификацией и кодировкой сложных солитонных сигналов, а также с бифуркациями структуры векторных солитонов [6]. При этом результатом исследования

свойств оптических векторных солитонов стало создание эффективного алгоритма для решения задачи нахождения особых траекторий, являющихся образами векторных солитонов в фазовом пространстве. Таким образом, задача нахождения особых траекторий в четырехмерном фазовом пространстве была сведена к задаче определения точек пересечения кривых на двумерной поверхности [7].

Во второй половине 80-х годов значительное внимание в НИИФП было уделено проблеме существования сложных узоров симметрии самолокализованных состояний полей в нелинейных средах. В простых моделях нелинейного поля исследовался переход от плоской геометрии задачи к задаче с круговой симметрией (развитие гофра в плоском самолокализованном слое и трансформация слоя в цепочку островков с круговой симметрией), а также к задаче о допустимых нетривиальных узорах симметрии в поперечном сечении самосфокусированных волноводов [8]. Эти проблемы являются определяющими для различных проектов оптической обработки информации на основе процессов управления узором симметрии, созданным сложной нитевидной структурой самосфокусированного оптического волновода в нелинейной среде при наличии обратной связи. Анализ этих же проблем необходим для реальной оценки проектов интегральных оптических систем, основанных на возбуждении "сильной" накачки в однородной нелинейной среде сложного рисунка пересекающихся и ветвящихся самосфокусированных волноводных каналов, который реализует сложное функциональное преобразование "слабых" информационных сигналов, "захваченных" и распространяющихся в таких самосфокусированных каналах [9].

Наконец с начала 90-х годов начались работы по решению ряда задач теории солитонов нелокальных полей. Это связано с тем, что динамика джозефсоновских вихрей является нелокальной. Простейшим примером может служить линия передачи с точечными джозефсоновскими контактами при наличии взаимной индуктивной связи между ближайшими ее ячейками. Предло-

женный подход [10] показал, что нелокальные связи или взаимодействия могут приводить к режиму обострения солитонных фронтов и к возможности существования новых типов солитонов (например, джозефсоновских вихрей, каждый из которых переносит несколько квантов магнитного потока).

В заключение следует отметить, что основная причина высокого уровня исследований и широкого их признания в стране и за рубежом — многолетняя приемственность разработок, позволившая, несмотря на неизбежную смену физических моделей и типов носителей информации, сохранить единый подход к анализу существенно нелинейных объектов и явлений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Е л е о н с к и й В.М., С т а ф е е в В.И., М у р ы г и н В.И. Нейристоры.— Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1967, вып. 7.
2. Е л е о н с к и й В.М., С и л и н В.П.— ЖЭТФ, 1969, т. 56, с. 574; 1969, т. 57, с. 478.
3. Е л е о н с к и й В.М., К у л а г и н Н.Е. Доменные границы, солитоны и фазовые переходы.— В кн.: Исследования по физике кинетических явлений.— Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984.
4. Е л е о н с к и й В.М., С и л и н В.П.— Радиофизика, 1975, т. 18, № 10.
5. E l e o n s k y V. Problems of existence of nontopological solitons (breathers) for nonlinear Klein—Gordon equations.— In.: Asymptotics beyond All Orders.— Ed. by H.Segur et al.: Plenum Press, N.Y., 1991.
6. E l e o n s k y V.M., K o r o l e v V.G., K u l a g i n N.E. and S h i l ' n i k o v L.P.— International Journal of Bifurcation and Chaos, 1993, vol. 3, N 2, p. 385.
7. E l e o n s k y V.M., K o r o l e v V.G., K u l a g i n N.E. and S h i l ' n i k o v L.P.— Chaos, 1992, vol. 2, N 4.
8. A l f i m o v G.L., E l e o n s k y V.M., K u l a g i n N.E., L e r m a n L.M., S i l i n V.P.— Physica D, 1990, N 44, p. 168.
9. A k h m e d i e v N., A n k i e w i c z A.— Opt. Comm., 1993, vol. 100, p. 186.
10. A l f i m o v G.L., E l e o n s k y V.M., K u l a g i n N.E.— Chaos, 1992, vol. 2, N 4.

# Нелинейная магнитодинамика в пленках

(РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ)

А.Ф.ПОПКОВ

Использование нелинейных явлений, возникающих при распространении волн магнитного момента в намагниченных до насыщения пленках и в доменных границах ненасыщенных магнитных пленок, а также явлений самолокализации спиновых волн, взаимодействия солитонов и их стабилизации в диссипативной среде может быть положено в основу создания систем обработки информации на новых принципах, в частности — синергетического компьютера на магнитных нелинейных волнах.

Динамика намагниченности в магнитных пленках определяет важнейшие рабочие характеристики магнито-

пленочных электронных микросхем: быстродействие и потери в дискретных магнитных системах, передаточные частотные характеристики и эффективность аналоговых магнитных устройств. Изучение нелинейных магнитодинамических явлений до 80-х годов ограничивалось в основном исследованием параметрических процессов в магнитоупорядоченных средах. Прогресс в физике нелинейных явлений, особенно в нелинейной оптике, а также успехи в математической теории решения нелинейных уравнений оказали сильное стимулирующее влияние на развитие нелинейной магнитодинамики как в теории, так и в эксперименте [1]. Результаты проводившихся в НИИФП исследований нелиней-

ной магнитодинамики пленок, включая образование спинволновых солитонов в насыщенных магнитных пленках и доменных границах ненасыщенных магнитных пленок, их взаимодействие и эволюцию в диссипативной среде с внешней накачкой, а также возникновение инстантонов и спонтанное перемагничивание монодоменных малых магнитных частиц сильно анизотропных материалов, представляют определенный интерес.

**Спинволновые солитоны в доменах и доменных границах магнитных пленок.** Одним из фундаментальных завоеваний физики нелинейных явлений явилось понятие солитона — уединенной волны, локализованной в пространстве и сохраняющей либо восстанавливающей свою форму во времени после взаимодействия с другими солитонами. Солитоны электромагнитных колебаний обнаруживались в оптически прозрачных волокнах со слабой дисперсией. Наблюдение подобных образований в магнитных пленках представлялось проблематичным из-за наличия значительного затухания и волновой дисперсии колебаний магнитного момента. Достижением научных исследований НИИФП было предсказание реальной возможности наблюдения солитоноподобного режима распространения спинволновых пакетов в пленках железо-иттриевого граната при подходящем выборе условий и параметров первоначального возбуждения [2]. В дальнейшем это предположение было успешно подтверждено работами ленинградских физиков [3], а затем и зарубежными исследователями [4].

Солитоны — одно из проявлений самоорганизации нелинейной системы. В последнее время появился ряд экспериментальных работ по изучению неравновесных магнитных структур в ненасыщенных магнитных пленках, которые возникают в переменных магнитных полях и связываются с синергетическими явлениями самоорганизации. Процессы самоорганизации неравновесных структур изучаются в различных средах. В частности, многообещающие результаты получены за рубежом в изучении диссипативных структур в резонаторе с оптически активной средой и оптически нелинейным кристаллом для реализации идеи синергетического компьютера. Релаксация нелинейных волн намагниченности к стационарному состоянию может оказаться не менее быстрой, чем установление нелинейных диссипативных структур поляризации в оптически прозрачном кристалле. Поэтому изучение солитонов и диссипативных структур в магнитных средах, условий их возникновения, преобразования и контроля представляет также и практический интерес.

В последнее время в НИИФП проводились теоретические исследования уединенных волн параметрически связанных колебаний намагниченности в звуковой решетке, образующихся в области частотной полосы не пропускания, обусловленной брегговским отражением спиновых волн на решетке [5]. Обычно считается, что малоамплитудные самолокализованные уединенные волны возникают только в области выполнения критерия пространственной неустойчивости плоского волнового фронта, определяемого знаками нелинейности и дисперсии среды — критерием Лайтхилла. Однако для случая дисперсии, обусловленной гибридизацией когерентно связанных волн, этот критерий требует уточнения, так как солитоны огибающей могут рождаться с конечной амплитудой вдали от края активационной

щели, где этот критерий нарушается. Одним из важных результатов исследований [5] является доказательство того, что солитоны огибающей могут существовать по всей области полосы не пропускания сигнальной волны в нелинейной периодической среде как вблизи верхней, так и нижней ее границ, где дисперсия линейных гибридных волн имеет противоположный знак.

Наряду с этим в работе [5] была подтверждена возможность стабилизации солитонов связанных волн путем электромагнитной локальной накачки на частоте одной из связанных гармоник. Проведенные расчеты показывают, что в принципе возможно контролируемое управление параметрами локализованных спинволновых пакетов по аналогии с оптическими нелинейными устройствами. Таким образом, можно надеяться, что на базе замедленных электромагнитных волн в магнитных пленках можно реализовать новые нелинейные устройства аналоговой обработки сигналов СВЧ-диапазона. В отличие от оптических систем магнитные пленки характеризуются большей величиной нелинейности и требуют значительно меньших мощностей нелинейных сигналов.

Другим направлением теоретических исследований в области нелинейной магнитодинамики пленок, проводившихся в НИИФП за последнее десятилетие, является цикл работ по изучению солитоноподобных явлений в доменных границах магнитоодноосных пленок с большой перпендикулярной анизотропией [6–13]. Среди наиболее интересных результатов, полученных в этом направлении, следует отметить следующие. Новый подход к рассмотрению метастабильных микромагнитных состояний неоднородной поляризации доменной границы позволил существенно упростить описание магнитодинамики блоховских линий и их скоплений на доменной границе при скоростях, ниже критической. Был выявлен механизм ограничения предельной скорости блоховских линий как в однородных по толщине, так и в "скрученных" доменных границах. Проведенные расчеты позволили не только успешно объяснить результаты экспериментальных исследований динамики доменных границ с блоховскими линиями [14], но и провести моделирование работы магнитного запоминающего устройства на вертикальных блоховских линиях с целью определения его предельных характеристик [15–16].

Дальнейшие исследования нелинейной магнитодинамики доменных границ показали, что блоховские линии, обладающие солитонными свойствами в закрепленной доменной границе при нулевой диссипации, могут демонстрировать солитоноподобные свойства и при наличии диссипации. Условием проявления таких свойств является наличие достаточно большой начальной кинетической энергии, достаточной для компенсации диссипативных потерь в процессе взаимодействия сталкивающихся блоховских линий. Характер динамического поведения блоховских линий оказался в этом смысле близок к поведению магнитных флюксонов, в распределенном джозефсоновском переходе. Роль плазменных колебаний здесь играют изгибные колебания доменной границы. Однако затем были выяснены также и различия в поведении доменной границы и распределенного сверхпроводящего контакта. Оказалось, что конечная изгибная жесткость доменной границы приводит к тому, что блоховские линии легко образуют скопления при движении в одном направлении, но не могут образовать связанного состояния типа бризерного, когда они сталкиваются друг с другом во встречном направлении.

Таким образом, доменная граница является нелинейным каналом для локализованных на ней спинволновых возмущений. По крайней мере она может служить хорошим модельным объектом для изучения солитоноподобных явлений в магнитной среде. Теоретические расчеты, проводившиеся в НИИФП, доказывающие солитоноподобные свойства блоховских линий, а также предсказанные особенности динамического взаимодействия пакетов блоховских линий при больших скоростях, получили подтверждение в экспериментах [17], проводившихся в МГУ, которые фактически впервые продемонстрировали проявление солитонных свойств в диссипативной среде у магнитных топологических образований.

**Туннелирование намагниченности и магнитные инстантоны в изинговских магнетиках.** Переход к наноразмерным структурам в электронике сопровождается возрастанием роли квантовых проявлений их свойств. В частности, квантовые флуктуации намагниченности наноразмерных частиц кладут предел плотности бинарной записи информации на магнито жестких материалах. Ограничивающим фактором является экспоненциально возрастающая с уменьшением объема ячейки памяти частота квантового туннелирования намагниченности из метастабильного состояния в основное и между энергетически эквивалентными состояниями. Поэтому в связи с появлением нанoeлектронной технологии возрастает интерес к изучению макроскопических квантовых явлений в квазиклассических системах, содержащих от  $10^4$  до  $10^7$  элементарных магнитов вещества [18].

Макроскопическое квантовое туннелирование (МКТ) в магнитных веществах предсказывалось еще Бином в Ливингстоном в 1959 г. С начала 80-х годов МКТ изучалось теоретически и экспериментально в ряде работ по релаксации доменной структуры при сверхнизких температурах. В этих работах магнитное последствие связывалось с магнитным туннелированием малых участков доменных границ на магнитных неоднородностях.

Новый этап открыла впечатляющая работа сотрудников фирмы IBM [19], в которой было показано, что ансамбль искусственно изготовленных магнитных наночастиц может находиться в состоянии макроскопической квантовой когерентности и резонансно откликаться на внешнее магнитное поле, частота которого совпадает с частотой МКТ. Теория этого явления развивалась в ряде работ и наиболее интенсивно Е.М. Чудновским [18]. Наряду с качественным согласием общих предположений теории имелись, однако, существенные количественные расхождения.

Расчет частоты туннелирования намагниченности в упомянутых работах проводился в основном в квазиклассическом приближении путем нахождения инстантонной траектории для классического лагранжиана магнитной частицы. Используемый при этом лагранжиан магнитной системы получен в пределе слабого кристаллического поля по сравнению с обменным взаимодействием. Как правило, это справедливо для слабоанизотропных ионов, таких как Fe, Ni и др. Однако в целом ряде соединений, таких например как Со-содержащие, редкоземельные элементы и другие, кристаллическое поле конкурирует с обменным и превышает его. Это существенно влияет на структуру электронного спектра ионов и на динамику его спинов. В частности уравнение

Ландау—Лифшица для компонент намагниченности перестает быть справедливым.

В совместных исследованиях НИИФП и ИОФРАН [20] была решена задача о туннелировании намагниченности в существенно анизотропных магнитных наночастицах, обладающих изинговскими свойствами. Рассматривалась система обменно взаимодействующих некрамерсовских ионов, основное состояние которой определяется двумя нижними энергетическими уровнями, образующими квазидублет с волновыми функциями, описывающими изинговские свойства иона. Расчеты показали, что несмотря на отсутствие обычной траектории туннелирования намагниченности, связанной с пространственной ее переориентацией, для системы некрамерсовских ионов имеется инстантонное решение благодаря взаимодействию изинговской намагниченности с магнитными мультиполями, которые играют роль эффективных компонент спина в поперечном к изинговской оси направлении. При этом вероятность туннелирования сильно зависит от соотношения релятивистского и обменного взаимодействий. Наибольшей величины эта вероятность достигает при уменьшении обменного взаимодействия до критической величины, соответствующей метамагнитному переходу в рассматриваемой изинговской системе спинов. При возрастании обмена вероятность туннелирования падает до нуля. Таким образом, можно управлять величиной МКТ намагниченности в сильноанизотропных ионах, технологически меняя величину магнитных взаимодействий между ионами в приготавливаемых наночастицах, например путем их легирования.

Проводимые исследования макроскопического туннелирования и квантовой когерентности намагниченности в наночастицах и нанослоях могут оказаться полезными не только при проектировании будущих сверхплотных устройств магнитной памяти, но и с точки зрения возможной реализации идеи квантового компьютера Фейнмана со сверхнизким энергетическим потреблением. Так, при нанoeлектронном размере элементарной магнитной ячейки обратимого компьютера с частотой туннелирования  $\sim 10^6$  Гц при добротности магнитной системы  $\Delta H/H \cong 10^{-2}$  оценка мощности рассеяния дает  $p \cong 1$  мВт и быстродействие  $Nf = 10^{20}$  бит/с.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Барьяхтар В.Г., Иванов Б.А., Четкин М.В. Динамика доменных границ в слабых ферромагнетиках.— УФН, 1985, т. 146, вып. 3, с. 417—458.
2. Звездин А.К., Попков А.Ф. К нелинейной теории магнитостатических спиновых волн.— ЖЭТФ, 1983, т. 84, вып. 2, с. 606—615.
3. Калинин Б.А., Ковшиков Н.Г., Славин А.— Письма ЖЭТФ, 1983, т. 38, с. 413.
4. De Gasperis P., Marcellini R., Miccoli G.— Phys. Rev. Lett., 1987, vol. 59, p. 481.
5. Попков А.Ф. Спинволновые солитоны в звуковой решетке.— ЖЭТФ, 1993, т. 104, вып. 3, с. 3165—3177.
6. Попков А.Ф. Коэрцитивность блоховской линии.— ЖЭТФ, 1990, т. 97, с. 965—975.
7. Кулагин Н.Е., Попков А.Ф. О динамике блоховских линий при больших скоростях.— Письма ЖЭТФ, 1986, т. 43, вып. 4, с. 197—199.
8. Звездин А.К., Попков А.Ф. Динамика блоховских линий в ферромагнетике.— ЖЭТФ, 1986, т. 91, вып. 5, с. 1789—1798.
9. Звездин А.К., Попков А.Ф. О предельной скорости блоховских линий в магнитных пленках.— ЖЭТФ, 1991, т. 100, вып. 2, с. 564—570.

10. Попков А.Ф. Динамика вертикальной блоховской линии вблизи изгибающей неустойчивости доменной границы.— ЖТФ, 1988, т. 58, вып. 8, с. 1548—1550.

11. Звездин А.К., Попков А.Ф., Ярема И.П. Динамическое взаимодействие и столкновение блоховских линий в ферромагнетике.— ЖЭТФ, 1990, т. 98, вып. 3, с. 1070—1079.

12. Попков А.Ф., Ярема И.П. Самолокализованные колебания доменной границы одноосного ферромагнетика.— ЖЭТФ, 1993, т. 103, вып. 2, с. 507—525.

13. Попков А.Ф. Бризеры и солитоны огибающей в доменной границе одноосного ферромагнетика.— Письма ЖЭТФ, 1991, т. 54, вып. 2, с. 97—99.

14. Четкин М.В., Парыгина И.В., Смирнов В.Б., Гадницкий С.Н., Звездин А.К., Попков А.Ф. Динамика кластеров блоховских линий.— ЖЭТФ, 1988, т. 94, вып. 11, с. 164—173.

15. Попков А.Ф., Зюбин В.В. Модель сдвигового регистра на ВБЛ.— Микроэлектроника, 1989, т. 18, вып. 2, с. 166—171.

16. Винокурова Т.В., Попков А.Ф., Редько В.Г. Влияние микронеоднородностей на работу регистра хранения информации на блоховских линиях.— ЖТФ, 1991, т. 61, вып. 11, с. 87—94.

17. Звездин А.К., Попков А.Ф., Четкин М.В. Динамика солитонов в доменной границе ферромагнетика.— УФН, 1992, т. 162, вып. 12, с. 151—155.

18. Chudnovsky E.M. Macroscopic quantum tunneling of the magnetic moment.— J. Appl. Phys., 1993, vol. 73, N 10, p. 6697—6702.

19. Awschalom D.D., McCord M.A., Grinstein G. Phys. Rev. Lett., 1990, vol. 65, p. 783.

20. Zvezdin A.K., Popkov A.F. Macroscopic quantum spin-flip in Ising nanoparticles.— JETP Lett., 1993, vol. 57, N 9, p. 562—566.

## Управление процессами самоорганизации в диссипативных системах

Б.С.БОРИСОВ, А.Г.БОРИСОВ, В.Г.КАЛЮЖНАЯ,  
В.С.КОРСАКОВ, М.Е.ПАНЮКОВ, Л.А.ПЛАВИЧ

Работа направлена на поиск новых нетрадиционных систем записи, обработки и преобразования больших массивов информации.

Изучение процессов самоорганизации, в частности автоволновых, и способов управления такими процессами в диссипативных системах, достаточно далеких от термодинамического равновесия, представляет собой как научный, так и практический интерес в отношении разработки самоорганизующихся систем обработки информации большой сложности, например самообучающихся систем с ассоциативной памятью, адаптивных систем типа перцептрона и т.д. [1]. Этот интерес обусловлен высокой сложностью стационарных периодических структур, образующихся в таких системах, а следовательно, их потенциально высокими функциональными возможностями.

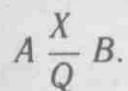
Автоволновые процессы широко представлены в природе и проявляются в различных системах: физических (среды с инверсной заселенностью, цепочки мультивибраторов, линии туннельных диодов), химических (концентрационные автоколебательные реакции) и биологических (ней-

ронные структуры, популяции организмов). Однако только химические диссипативные системы в силу своей специфики и невысокой скорости протекания автоволновых процессов являются наиболее удобными для изучения модели самоорганизующихся систем. Ввиду общности характера явлений самоорганизации во всех указанных системах в дальнейшем, вероятно, будет возможно экстраполировать полученные результаты на более быстродействующие физические диссипативные системы, поиск и изучение которых в настоящее время также активно ведется.

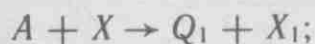
**Общие предпосылки управления химическими диссипативными системами.** Согласно работам А.М.Жаботинского [2], в общем случае в диссипативной среде существование режимов автоколебаний возможно лишь тогда, когда среда описывается минимум двумя независимыми переменными, причем изменение их во времени определяется системой нелинейных дифференциальных уравнений. Для концентрационных химических систем, которые рассматриваются в данной работе, это условие означает, что процесс должен содержать минимум одну автокаталитическую стадию. Химическая гомогенная система, в кото-



рой возможны автоволновые процессы, может быть представлена в виде:

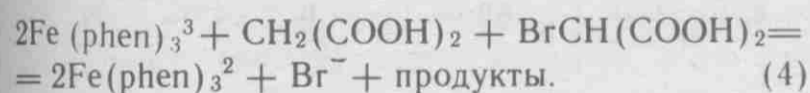
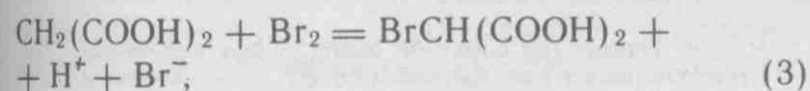
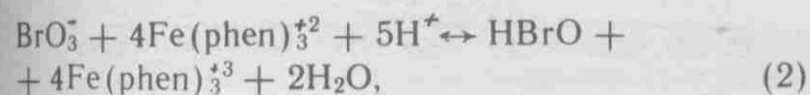
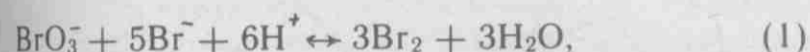


Предполагается обязательное наличие следующих стадий:



где  $X$ ,  $X_1$  — две формы существования катализатора в системе, например  $\text{Ce}^{+3}$ ,  $\text{Ce}^{+4}$  в реакции Белоусова—Жаботинского;  $Q_1$ ,  $Q_2$  — продукты реакции, один из которых должен играть роль катализатора или ингибитора какой-либо из стадий. Чтобы процесс был локально обратим во времени, ингибитор должен удаляться из системы с определенной скоростью, иначе система может быть просто заблокирована.

Исследовались концентрационные колебания, возникающие в системе: малоновая кислота ( $\text{CH}_2(\text{COOH})_2$ ) — бромат калия ( $\text{KBrO}_3$ ) — о-фенантралиновый комплекс железа ( $\text{Fe}(\text{phen})_3^{+2}$ ). Возникновение колебаний в этой системе связано с протеканием следующих химических реакций [5]:



Установлено, что если концентрация анионов  $\text{Br}^-$  велика, преобладает реакция (1), в то время как реакция (2) заторможена. По мере снижения его концентрации включается реакция (2), и цвет раствора меняется с красного на голубой. Одновременно интенсифицируются реакции (3) и (4). Это приводит к накоплению  $\text{Br}^-$  и торможению реакции (2), а за счет восстановления иона  $\text{Fe}(\text{phen})_3^{+3}$  цвет раствора изменяется на красный, и цикл повторяется снова.

Управление (оптическое или электрическое) такой химической системой представляется следующим образом:

1) можно подобрать какое-то вещество, в результате внешнего воздействия на которое будут генерироваться в достаточных количествах исходные продукты как это имеет место в хемилюминесцентной системе окисления серы озоном в присутствии ионов бихромата и уранила [3];

2) подбором длины волны излучения или потенциала электрода можно дополнительно регу-

лировать одну из форм катализатора, например, электрохимическим путем окислять  $\text{Fe}(\text{phen})_3^{+2}$  в  $\text{Fe}(\text{phen})_3^{+3}$ , что ускорит протекание реакции (4) и замедлит реакцию (2);

3) внешним воздействием можно либо вводить дополнительные порции ингибитора в систему, либо, наоборот, выводить их, что также должно влиять самым непосредственным образом на характер процессов в системе;

4) возможен также путь перевода исходных веществ в продукты реакции непосредственно внешним воздействием.

Из всех перечисленных вариантов воздействия на систему самыми перспективными представляются второй и третий, так как обычно концентрация катализатора и ингибитора намного меньше концентрации основных компонентов системы. Поэтому даже небольшое внешнее воздействие обеспечивает достаточную концентрацию указанных соединений для эффективного воздействия на систему. Достижение положительного эффекта облегчается еще и тем, что катализатор представляет собой ион, что упрощает электрохимическое воздействие на него.

**Оптический способ управления.** Возможность оптического управления концентрационными автоколебаниями в химических реакциях показана в работах [2, 5] на примере системы: малоновая кислота — бромат калия — сульфат церия. При этом установлено, что УФ излучение постоянной интенсивности с длиной волны  $220 \leq \lambda \leq 300$  нм может инициировать колебания, а также менять их характер (амплитуду, длительность и форму).

Проведенные авторами исследования показали принципиальную возможность оптического управления концентрационными колебаниями в системе:  $\text{CH}_2(\text{COOH})_2$ — $\text{KBrO}_3$ — $\text{Fe}(\text{phen})_3^{+2}$  излучением с  $\lambda=441,3$  нм (He—Cd-лазер) и с  $\lambda=632,8$  нм (He—Ne-лазер). В частности, наблюдался эффект запуска автоколебаний лазерным излучением, изменение характера автоволновых процессов, а также усиление их интенсивности. Эксперименты, проведенные с целью уточнения механизма оптического управления концентрационными автоколебаниями, позволили установить следующие факты:

— из всех исходных компонентов и возможных промежуточных продуктов на длине волны  $\lambda=441,3$  нм поглощают только  $\text{Br}_2$  и  $\text{Fe}(\text{phen})_3^{+2}$ , а на длине волны  $\lambda=632,8$  нм небольшим коэффициентом характеризуется бром ( $\epsilon < 5$ ) и существенным поглощением обладает  $\text{Fe}(\text{phen})_3^{+3}$  (рис. 1, 2);

— в системе  $\text{KBrO}_3$ — $\text{Fe}(\text{phen})_3^{+3}$ , получаемой добавлением раствора  $\text{Fe}(\text{phen})_3^{+3}$  в раствор бромата калия, под действием лазерного излучения происходит изменение окраски из красной в голубую, что свидетельствует о протекании фотохимической реакции, результатом которой является локальное изменение концентрационного равновесия;

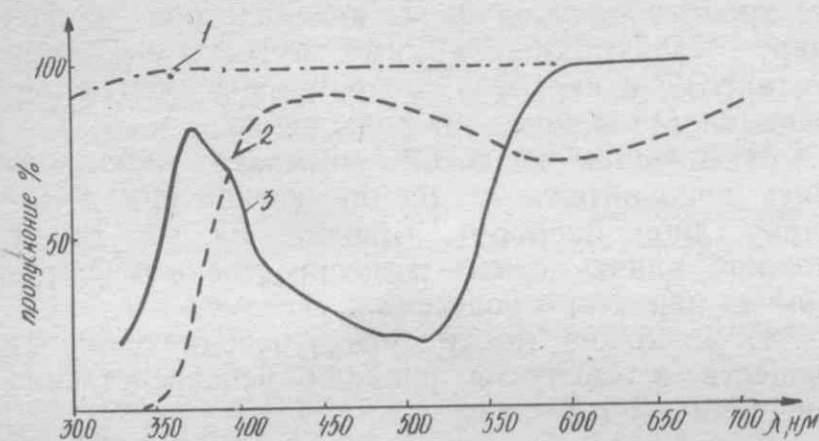


Рис. 1. Спектры поглощения растворов: 1 — малооновая кислота; 2 —  $\text{Fe}(\text{phen})_3^{2+}$ ; 3 —  $\text{Fe}(\text{phen})_3^{3+}$

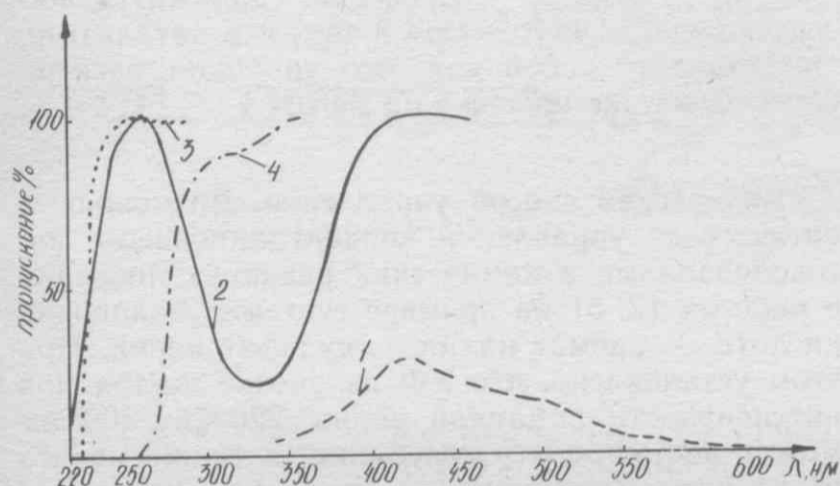


Рис. 2. Спектры поглощения растворов: 1 —  $\text{Br}_2$ ; 2 —  $\text{KBrO}_3$ ; 3 —  $\text{KBrO}$ ; 4 —  $\text{KBr}$

— добавление брома в указанную систему усиливает эффект;

— эффект оптического воздействия отсутствует при преобладании в системе окисленной формы комплекса железа (раствор голубого цвета).

Анализ приведенных экспериментальных результатов свидетельствует о том, что способность исследуемой системы реагировать на оптическое излучение связана с появлением в системе  $\text{Br}_2$  и дальнейшими фотохимическими реакциями с его участием. Достаточно того, что лазерное излучение смещает равновесие реакции (1) влево, тем самым облегчая запуск реакции (2). Максимальный эффект должен наблюдаться для излучения с длиной волны  $\lambda \approx 420$  нм (см. рис. 2).

Проведенные эксперименты открывают широкие возможности для моделирования различных перспективных устройств электронной техники. В частности, наблюдалась запись изобра-

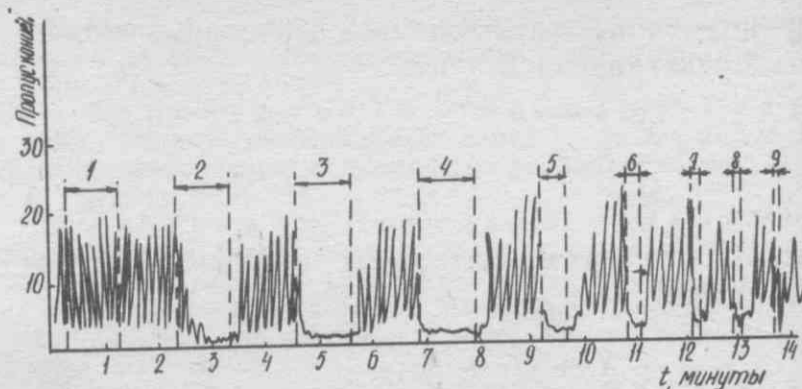


Рис. 3. Управление колебаниями оптической плотности в диссипативной системе с помощью постоянного тока: 1 —  $U=2$  В,  $\tau=1$  мин; 2 —  $U=2,25$  В,  $\tau=1$  мин; 3 —  $U=2,4$  В,  $\tau=1$  мин; 4 —  $U=2,5$  В,  $\tau=1$  мин; 5 —  $U=2,5$  В,  $\tau=30$  с; 6 —  $U=2,5$  В,  $\tau=25$  с; 7 —  $U=2,5$  В,  $\tau=20$  с; 8 —  $U=2,5$  В,  $\tau=15$  с; 9 —  $U=2,5$  В,  $\tau=10$  с

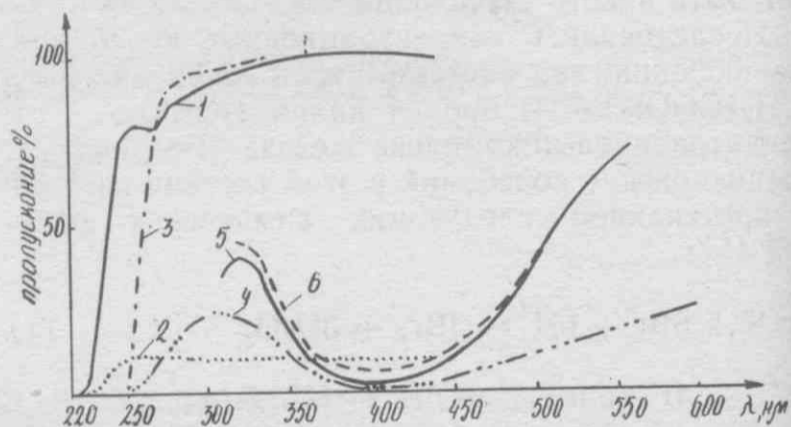


Рис. 4. Изменения спектров веществ под действием отрицательного напряжения (2,5 В): 1 — малооновая кислота,  $U=0$ ; 2 — малооновая кислота,  $U=2,5$  В; 3 —  $\text{KBrO}_3$ ,  $U=0$ ; 4 —  $\text{KBrO}_3$ ,  $U=2,5$  В; 5 —  $\text{Br}_2$ ,  $U=0$ ; 6 —  $\text{Br}_2$ ,  $U=2,5$  В

жения предмета, помещенного в луч лазера. В силу наличия автоволновых процессов в среде это изображение преобразовывалось по законам, определяемым диффузионно-кинетическими уравнениями реакций, протекающих в системе. Довольно высокий контраст позволяет уверенно считать на фотоприемную матрицу все стадии происходящего преобразования изображения.

Кроме того, лазерным излучением можно локально изменить характер автоволновых процессов (например, провести преобразование ведущий центр — ревербератор), что приводит к изменению с течением времени всей автоволновой структуры в системе по программе, задаваемой лазерным воздействием.

**Электрохимический способ управления.** Экспериментальное исследование электрического (точнее электрохимического) способа управления

автоколебаниями позволило установить следующие факты, необходимые как для уточнения механизма управляющего воздействия, так и для оценки эффективности самого способа управления:

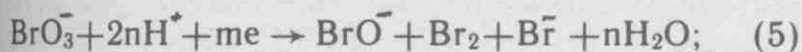
— при подаче напряжения на два платиновых электрода, помещенных в исследуемую систему на расстоянии 0,8 см друг от друга таким образом, что рабочий электрод, имеющий меньшую площадь, являлся катодом, происходит гашение автоколебаний (рис. 3). Величина порогового напряжения составляет 2,5 В, хотя частичное гашение начинает проявляться с 2,25 В. Минимальная длительность импульса гашения составляет 5—10 с. После окончания действия управляющего импульса колебания восстанавливаются по форме и частоте с задержкой во времени 10—15 с;

— аналогичный эффект наблюдается также в тонких слоях раствора. При подаче отрицательного напряжения на платиновый пленочный электрод стационарные периодические структуры в растворе над ним исчезают;

— наоборот, в системе, отношение концентраций исходных компонентов немного больше граничной величины, при которой возникают автоколебания, при подаче на электрод отрицательного напряжения, большего 2,25 В, начинается генерация автоколебаний. В плоской тонкослойной ячейке возникают стационарные периодические структуры (ревербераторы или ведущие центры), локализованные строго над поверхностью катода;

— при воздействии электрического напряжения на раствор малоновой кислоты его спектр поглощения изменяется. Вероятно, имеет место электрохимическое восстановление малоновой кислоты до соответствующих спирто- и альдегидокислот [4];

— раствор бромата калия подвергается электролизу (рис. 4); при этом имеет место следующая реакция:



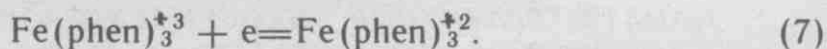
— раствор брома под действием указанного напряжения постепенно обесцвечивается (см. рис. 4):



На основании анализа экспериментальных данных представляется возможным следующий механизм электрического управления. Очевидно, что реакции (5) и (6) служат мощным дополнительным источником аниона  $\text{Br}^-$ , который, как уже указывалось, при больших концентрациях эффективно блокирует реакцию окисления фенантролинового комплекса железа (2). Кроме того, реакция (5), являясь конкурентом реакций (1) и (2), тоже вносит заметный вклад в этот процесс. Все это достаточно хорошо объясняет эффект гашения колебаний. Относительно

большие времена релаксации этого процесса определяются скоростью диффузионного переноса ингибитора от электрода в объем раствора.

Возникновение автоволновых процессов в системе с надкритическим уровнем концентраций компонентов объясняется как протеканием реакции (5), снижающей концентрацию бромата калия, так и параллельно идущим процессом электрохимического восстановления на катоде комплекса железа:



Этот процесс равносителен введению в систему дополнительных количеств малоновой кислоты, так что фактическое значение концентраций оказывается ниже критического уровня.

Таким образом, в системах типа Белоусова—Жаботинского автоволновые и автоколебательные процессы могут регистрироваться как оптическим методом, так и по изменению потенциала ионселективного электрода, а также управляться как оптическим, так и электрическим способом. Это создает широкие возможности для моделирования принципиально новых устройств записи, обработки и преобразования больших массивов информации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е л и н с о н М.И.— Микроэлектроника, 1977, т. 6, № 2, с. 152.
2. Ж а б о т и н с к и й А.М. Концентрационные колебания.— М.: Наука, 1974.— 320 с.
3. К а з а к о в В.П. Хемилюминесценция уранила, лантаноидов и р-элементов.— М.: Наука, 1980.— 215 с.
4. А н т р о п о в Л.И. Теоретическая электрохимия.— М.: Химия, 1969.— 560 с.
5. Ж а б о т и н с к и й А.М., О т м е р Х., Ф и л д Р. Колебания и бегущие волны в химических системах.— М.: Мир, 1988, с. 77—78.

МАСШТАБ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ ТОПОЛОГИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ПО МЕРЕ ПОВЫШЕНИЯ ИХ СТЕПЕНИ ИНТЕГРАЦИИ, БЫСТРОДЕЙСТВИЯ И СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНО ИЗМЕНЯЕТСЯ В СТОРОНУ ДОЛЕЙ МИКРОМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА. СВЕРХМАЛЫЕ РАЗМЕРЫ ТОПОЛОГИИ, МЕНЕЕ 0,1–0,05 МКМ И ВПЛОТЬ ДО АТОМАРНО-МОЛЕКУЛЯРНЫХ РАЗМЕРОВ, ПОЗВОЛЯЮТ РАССЧИТЫВАТЬ НА СОЗДАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ПАМЯТИ ТЕРАБИТНОЙ ЕМКОСТИ И УСТРОЙСТВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ С ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ПРИ СВЕРХНИЗКИХ ПИТАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯХ. В МАЛОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ ПРОЯВЛЯЮТСЯ КАЧЕСТВЕННО НОВЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ КВАНТОВЫМИ ЭФФЕКТАМИ. С НИМИ СВЯЗАНЫ ОСОБЫЕ СВОЙСТВА И СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ СОЗДАНИЯ СВЕРХМАЛОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР, В ЧАСТНОСТИ ИХ СВЕРХБОЛЬШОГО МНОЖЕСТВА НА ПОДЛОЖКЕ ИЛИ В ВИДЕ ЕДИНОГО ОБРАЗОВАНИЯ. НЕОБХОДИМОСТЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ ТАКИХ СТРУКТУР ОБЪЯСНЯЕТСЯ ПОЯВЛЕНИЕ НОВОГО НАПРАВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОНИКЕ, ОБОБЩЕННО НАЗЫВАЕМОГО НАНОЭЛЕКТРОНИКОЙ. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ ИССЛЕДОВАНИЯМИ НАНОСТРУКТУР И ИЗУЧЕНИЕМ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА ФАЗ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ ИНСТИТУТ ЗАНИМАЕТСЯ БОЛЕЕ 10 ЛЕТ, ЕГО СОТРУДНИКАМИ СФОРМУЛИРОВАН ВАЖНЫЙ ДЛЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ СТРУКТУР НАНОЭЛЕКТРОНИКИ ПРИНЦИП ОБЪЕМНОГО СООТВЕТСТВИЯ. С 1990 Г. НАЧАЛОСЬ ПЛАНОМЕРНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ СОЗДАНИЯ СТАБИЛЬНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СИСТЕМ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА. ИЗУЧАЮТСЯ ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ДЛЯ ЗАПИСИ И СЧИТЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТУННЕЛЬНЫХ ЗОНДОВ. ПОЛУЧЕНЫ УСТОЙЧИВЫЕ НА ВОЗДУХЕ УПОРЯДОЧЕННЫЕ СТРУКТУРЫ С ПЕРИОДОМ 0,3–2,5 НМ В УГЛЕРОДИСТЫХ СИСТЕМАХ. ПРИМЫКАЮЩИМ К НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ НАПРАВЛЕНИЕМ ЯВЛЯЕТСЯ МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА НА ОСНОВЕ ЛЕНГМЮР–БЛОДЖЕТТ (ЛБ) ПЛЕНОК. НАПРАВЛЕНИЕ ЭТО ПОЛОЖИЛО НАЧАЛО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ВИДУ НАНОТЕХНОЛОГИИ, КОТОРАЯ ПОЗВОЛИЛА ПОЛУЧИТЬ ХОРОШИЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИ СОЗДАНИИ РАЗЛИЧНОГО ВИДА СЕНСОРОВ, ПЛАЗМОСТОЙКИХ РЕЗИСТОВ, ПОДЗАТВОРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ И Т.П. РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ИНСТИТУТЕ В ОБЛАСТИ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ, КОТОРАЯ НАХОДИТСЯ В НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ СВОЕГО РАЗВИТИЯ, СОПОСТАВИМЫ С МИРОВЫМИ ДОСТИЖЕНИЯМИ, И К НИМ ПРОЯВЛЯЕТСЯ БОЛЬШОЙ ИНТЕРЕС СО СТОРОНЫ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ РАЗЛИЧНОГО ПРОФИЛЯ: ФИЗИКОВ, ХИМИКОВ, БИОЛОГОВ, МЕДИКОВ И ПРИБОРОСТРОИТЕЛЕЙ.

## Атомарные запоминающие среды. Пути реализации проблемы

А.В.ЕМЕЛЬЯНОВ, Э.А.ПОЛТОРАЦКИЙ, С.М.ПОРТНОВ  
В.Н.РЯБОКОНЬ, Н.С.САМСОНОВ

Самоорганизующиеся упорядоченные системы, формирующиеся на поверхности твердых тел — возможность создания запоминающих сред с плотностью записи 1 Тбит/см<sup>2</sup>. Для анализа стабильности структурной ячейки упорядоченной системы после локальной модификации туннельным зондом предлагается использовать принцип постоянства объема в кристаллических решетках.

Широкое развитие техники сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) показало возможность использования туннельного зонда в каче-

стве инструмента для локального изменения поверхности твердых тел. Воздействие зонда на поверхность позволяет изменять как ее топографию, так и различные физические и химические свойства. Успешные попытки модификации поверхности в областях нанометрового и субнанометрового размера послужили предпосылкой для постановки работ по созданию накопителей информации терабитовой емкости — атомарных запоминающих сред [1–3].

Большинство работ по локальной модификации поверхности основано на применении таких

способов воздействия, когда модифицированный участок включает большое (десятки, сотни и более) и, что наиболее существенно, неопределенное количество атомов. Поскольку величина туннельного тока экспоненциально зависит от расстояния между зондом и поверхностью (или от величины работы выхода) в заданном ее участке, при считывании СТМ массива сформированных локальных неоднородностей возникнут значительные шумы за счет флуктуаций их размеров или иных свойств. Эти шумы послужат серьезным ограничением для использования систем такого типа в качестве запоминающих сред.

В то же время имеется целый ряд примеров воспроизводимого изменения туннельным зондом участков поверхности размером не более 1 нм. Известные способы модификации поверхности в субнанометровом диапазоне условно можно разделить на группы (см. таблицу). Эти методы локальной модификации поверхности могли бы, в принципе, найти применение для создания накопителей информации терабитовой емкости. Однако одной из серьезнейших проблем на этом пути является выбор подложки.

Результаты проведенных расчетов свидетельствуют о возможности достижения плотности записи порядка 1 Тбит/см<sup>2</sup> при сохранении скорости считывания и вероятности сбоя на уровне традиционных запоминающих устройств (10<sup>5</sup> бит/с и 10<sup>-5</sup>, соответственно), если разброс вертикальных размеров элементов среды не превышает 0,02 нм (для элементов с латеральными размерами 3 нм и вертикальными — 0,2 нм) [16]. Создание элементов с вышеуказанной плотностью традиционными технологическими методами невозможно. Они могут быть получены только на основе самоорганизующихся упорядоченных систем, формирующихся в определенных условиях на поверхности твердых тел, с атомарно-идентичными элементами записи. Необходимым условием реализации запоминающей среды терабитовой емкости являются также атомная гладкость и электропроводность поверхности с упорядоченной структурой.

Запоминающее устройство на основе упорядоченных поверхностных систем может быть организовано следующим образом. Зонд СТМ, сканируя по поверхности, регистрирует существующий на ней рельеф, периодически изменяющийся с шагом упорядоченной структуры и определяющийся числом связей поверхностных атомов и их окружением. При воздействии на определенные узлы упорядоченной системы (например, «залечивании» незамкнутых связей поверхностных атомов примесями в процессе адсорбции, стимулированной электрическим полем в туннельном зазоре) происходит изменение их электронных свойств, которое отражается на величине регистрируемого туннельного тока, и соответствующее изменение структуры ячейки. Модифицированная поверхностная ячейка соответствует логической «1». Производя такое воздействие в определенной последовательности, полу-

#### Методы (механизмы) модификации поверхности зондом СТМ в субнанометровом диапазоне

Метод (механизм) воздействия зонда	Примеры локальной модификации поверхности	Источник
Удаление отдельных собственных атомов с поверхности подложки за счет полевого испарения	Формирование массивов из атомных вакансий на поверхности: — кремния; — дисульфида молибдена; — диселенида олова	[4, 5]
Стимулированное зондом локальное изменение структуры поверхности без удаления атомов	Формирование выступов субнанометрового размера на поверхности графита, покрытой слоем воды, за счет изменения гибридизации атомов на поверхности ( $sp^2 \rightarrow sp^3$ ). Формирование тримеров на поверхности диселенида вольфрама из трех соседних атомов подложки	[6, 7]
Полевая десорбция адсорбированных атомов и молекул с поверхности твердых тел при действии зонда	Локальное удаление продуктов диссоциации воды с поверхности Si(111), обработанной парами H <sub>2</sub> O. Десорбция водорода с поверхности Si(111):H, сопровождающаяся структурным превращением $1 \times 1$ в $2 \times 1$ . Десорбция адсорбированных углеродных кластеров (фуллеренов) с поверхности кремния	[8—10]
Фазовое превращение адсорбированных молекул под действием зонда	Разложение молекул декаборана на поверхности кремния, сопровождающееся локальным легированием бором поверхности подложки	[11]
Перенос вещества с зонда на поверхность подложки	Формирование островков субнанометрового размера: — из германия на Ge(111); — из кремния на Si(111)	[4, 12]
Осаждение структурных элементов из газовой или жидкой среды при ее химической активации или стимулировании химических реакций	Закрепление индивидуальных молекул диметилфталата на поверхности графита из жидкой фазы. Осаждение островков субнанометрового размера на поверхности графита за счет разложения в газовой фазе триметилалюминия	[13, 14]
Латеральный перенос физически адсорбированных атомов и молекул	Формирование упорядоченных массивов в сверхвысоком вакууме при гелиевой температуре путем: — перемещения атомов ксенона по поверхности монокристалла никеля; — перемещения молекул монооксида углерода по поверхности платины	[3, 15]

чаем записанную на поверхности информацию, считывание которой также будет производиться зондом СТМ (рис. 1,а).

Применение ячеек упорядоченных систем для записи информации поможет упростить решение проблемы адресации при считывании информации. Поверхностная гофрировка, которая в некоторых типах запоминающих устройств искус-

ственно создается для адресации, в данном случае присутствует естественно и благодаря этому обеспечивается высокая точность считывания, и наиболее высокая скорость.

При создании атомарных запоминающих сред необходимо решить проблему обеспечения временной стабильности ячеек. Ее суть заключается в ограничении структурного изменения, стимулированного действием зонда СТМ, границами фиксированного числа ячеек структуры (в предельном случае — границами одной ячейки) и необратимостью этого изменения. Предлагается использовать принцип постоянства объема в кристаллических решетках [17] для оценки стабильности элементов, полученных при модификации структуры поверхностных ячеек в упорядоченных системах.

Согласно этому принципу, перестроенная поверхностная ячейка должна быть стабильна в том случае, если суммарный объем атомов, находящийся на ее площади, равен объему атомов на площади той же перестроенной ячейки. Условие стабильности определяет следующее соотношение:

$$\sum_{i=1}^q N_{ri} V_{ri} = q N_n V_n,$$

где  $N_{ri}$  и  $N_n$  — концентрации атомов в перестроенном и перестроенном слоях структурной ячейки,  $V_{ri}$  и  $V_n$  — объем, приходящийся на один атом в этих слоях, соответственно, а  $q$  — общее количество перестраиваемых слоев. Следует отметить, что термин «объем» в данном случае выступает не как геометрический параметр, а как характеристика взаимодействия атомов в кристаллической решетке. Величины  $V_{ri}$  и  $V_n$  зависят от количества валентных электронов в атоме (собственном или примесном) и количества связей, образуемых данным атомом с ближайшими соседями [17].

С использованием результатов расчетов в рамках принципа постоянства объема можно выбирать подложки, на которых формируются упорядоченные структуры с необходимым периодом, и примеси для целенаправленного залечивания незамкнутых связей поверхностных атомов, обеспечивающего необратимое изменение структуры в пределах фиксированного числа ячеек.

В качестве наиболее простого и наглядного примера записи бита информации в ячейку упорядоченной системы можно назвать воздействие зонда СТМ в водородсодержащей среде на димеры кремния, образующиеся на реконструированной поверхности Si(100)— $2 \times 1$ . Разрыв связей в димере и образование двух Si-H связей практически не изменяет суммарного объема атомов в выбранной для локальной модификации ячейке, и поэтому такая структура должна оставаться стабильной и не вызовет перестройки окружающих структурных ячеек. В то же время следует ожидать значительного изменения величины туннельного тока в перестроенной ячейке (рис. 1, б).

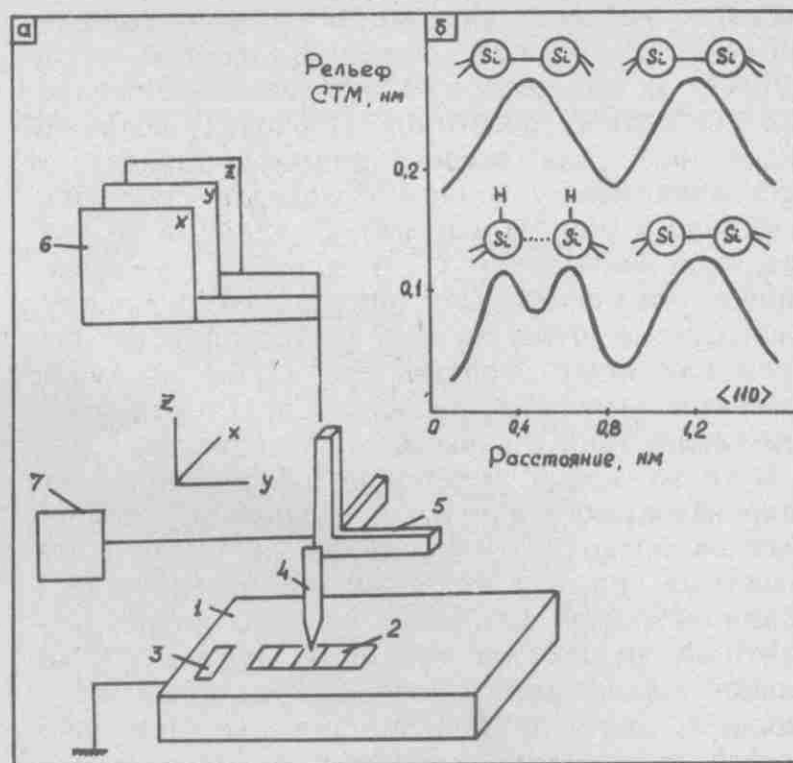


Рис. 1. Схема организации атомарного запоминающего устройства: 1 — кристаллическая подложка (запоминающая среда), 2 — ячейки памяти, 3 — метка совмещения, 4 — туннельный зонд, 5 — адресный блок, 6 — координатный блок, 7 — двигатель (а) и расчетные СТМ профили перестроенной поверхности кремния Si(100) до (верхняя кривая) и после (нижняя кривая) локальной модификации в водородсодержащей среде как пример записи бита информации в структурную ячейку упорядоченной поверхностной системы (б)

Следует отметить, что принцип постоянства объема дает «точку отсчета» для выбора запоминающей среды и должен дополняться анализом электронных состояний атомов в локально перестроенной ячейке.

Упрощение системы считывания информации из атомарной запоминающей среды определяет интерес к использованию упорядоченных поверхностных систем с достаточно большим периодом (1—5 нм), стабильных на воздухе. Наиболее удобной модельной поверхностью для формирования таких систем являются подложки из графита С(0001). Сотрудниками Государственного НИИ физических проблем им. Ф.В.Лукина разработаны методы создания упорядоченных систем на поверхности графита с использованием как физически, так и химически адсорбированных слоев [18, 19]. Период получаемых структур изменяется в широких пределах (от 0,3 до 4,5 нм). На рис. 2 представлены СТМ изображения двух синтезированных структур, период которых отличается почти на порядок величины.

Создание атомарных запоминающих устройств предполагает рассмотрение широкого спектра операций, связанных с подготовкой запоминаемой информации, ее перекодировкой, формированием запоминающей среды, определением режимов записи и считывания, и др. Характеристики всех этих операций являются взаимозависимыми, и анализ их в совокупности позволяет выявить основные параметры запоминающих сред и факторы, определяющие их величину. Среди основных параметров атомарных за-

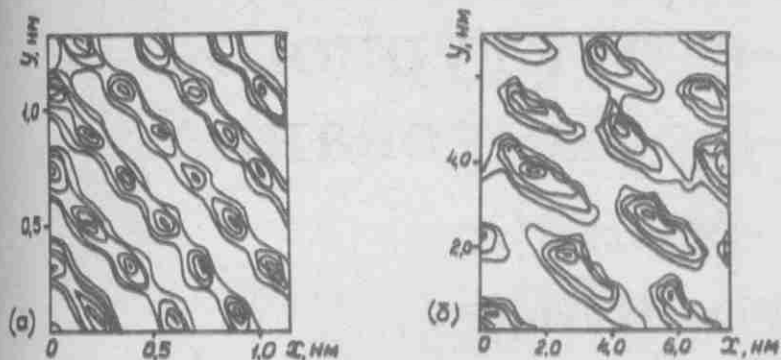


Рис. 2. СТМ-изображения поверхности графита с упорядоченными системами, полученными методом химической сборки поверхности из оксихлорида ванадия (а) и триметилхлорсилана (б)

поминающих сред можно выделить:

**Плотность записи.** Ее величина определяется в основном параметрами туннельного зонда (диаметром острия) и параметрами ячеек упорядоченной поверхностной структуры.

**Скорость записи.** Она зависит, главным образом, от параметров упорядоченной поверхностной структуры и используемого метода (механизма) записи (см. таблицу). Запись информации в единичные структурные ячейки упорядоченной системы обеспечит наивысшую скорость записи, поскольку воздействие туннельного зонда инициирует перераспределение единичных атомов в ячейке.

**Достоверность считывания.** Ее величина существенно зависит от параметров записывающего и считывающего инструментов, но в не меньшей степени и от параметров упорядоченной системы. В частности, при считывании величины туннельного тока важное значение имеет разброс элементов записи по высоте [16], поскольку при отходе зонда СТМ от поверхности всего на 0,2 нм, туннельный ток падает на порядок величины. Для увеличения достоверности считывания можно рекомендовать использование в качестве элементов записи крупных и идентичных по размеру кластеров, например, фуллеренов.

**Информационная емкость.** Она определяется размерами ячеек записи и протяженностью атомно-гладких участков поверхности с упорядоченной структурой.

**Скорость считывания.** Ее величина зависит как от характеристик инструмента считывания, так и от некоторых параметров упорядоченной системы (в частности, шума тока считывания). Последний определяет разрешение двух соседних модифицированных структурных ячеек. Для элементов протяженностью около 1 нм приемлемая скорость считывания достигается при скорости сканирования зонда порядка 1 см/с в режиме постоянной высоты зонда.

Среди параметров атомарных запоминающих сред можно назвать также время хранения информации (т.е. время снижения достоверности считывания до некоторой предельной величины) и максимальное число циклов считывания.

На сегодняшний день отсутствуют общепризнанные методы определения параметров атомарных запоминающих сред, ведутся дискуссии и

по их предельным величинам. Однако важно подчеркнуть, что разрабатываемые методы испытания атомарных запоминающих сред должны анализировать их параметры только как единого комплекса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 93-03-5372).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Shedd G.M., Russell P.E. The scanning tunneling microscope as a tool for nanofabrication.— *Nanotechnology*, 1990, vol. 1, p. 67.
2. Wiesendanger R. Fabrication of nanometer structures using STM.— *Applied Surface Science*, 1992, vol. 54, p. 271.
3. Clercy D. Nanotechnology rules.— *New Scientist*, 1992, vol. 133, N 1811, p. 42.
4. Huang D., Uchida H., Aono M. Fabrication of Atomic-Scale Structures on Si(111)—7×7 Using a Scanning Tunneling Microscope.— *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1992, vol. 31, N 12B, part 1, p. 4501.
5. Huang J.-L., Sung Y.-E., Lieber C.M. Field-induced surface modification on the atomic scale by scanning tunneling microscopy.— *Appl. Phys. Lett.*, 1992, vol. 61, N 13, p. 1528.
6. Mechanistic investigations of nanometer-scale lithography at liquid-covered graphite surfaces/R.M.Penner, M.J.Heben, N.S.Lewis, C.F.Quate.— *Appl. Phys. Lett.*, 1991, vol. 58, N 13, p. 1389.
7. Fuchs H., Schimmel T. Atomic sites of a bare surface modified with the tunneling microscope.— *Adv. Mater.*, 1991, vol. 3, N 2, p. 112.
8. Avouris Ph., Lyo I.-W. Probing and inducing surface chemistry with the STM: the reactions of Si(111)—7×7 with H<sub>2</sub>O and O<sub>2</sub>.— *Surface Sci.*, 1991, vol. 242, N 1/3, p. 1.
9. Atomic Scale Conversion of Clean Si(111):H—1×1 to Si(111)—2×1 by electron-stimulated desorption/R.S.Becker, G.S.Higashi, Y.J.Chabal, A.J.Becker.— *Phys. Rev. Lett.*, 1990, vol. 65, N 15, p. 1917.
10. Maruno S., Inanaga K., Iisu T. Threshold height for movement of C<sub>60</sub> molecules on Si(111)—7×7 with a scanning tunneling microscope.— *Appl. Phys. Lett.*, 1993, vol. 63, N 10, p. 1339.
11. Dujardin G., Walkup R.E., Avouris Ph. Dissociation of individual molecules with electrons from the tip of a scanning tunneling microscope.— *Science*, 1992, vol. 255, p. 1232.
12. Becker R.S., Golovchenko J.A., Swartzentruber B.S. Atomic-scale surface modifications using a tunneling microscope.— *Nature*, 1987, vol. 325, N 6103, p. 419.
13. Foster J.S., Frommer J.E., Arnett P.C. Molecular manipulation using a tunneling microscope.— *Nature*, 1988, vol. 331, N 6154, p. 324.
14. Nanofabrication with a scanning tunneling microscope/S.-T.Yau, D.Saltz, A.Wriekat, M.H.Nayteh.— *J. Appl. Phys.*, 1991, vol. 69, N 5, p. 2970.
15. Eigler D.M., Schweizer E.K. Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope.— *Nature*, 1990, vol. 344, N 6266, p. 524.
16. Emelyanov A.V., Poltoratsky E.A., Samsonov N.S. Some problems of integral nanoelectronics.— In: *Nanostructures: Physics and Technology, Abstracts of Invited Lectures of Int. Symposium.*— St.-Petersburg, 1993, p. 134.
17. Емельянов А.В., Портнов С.А. Анализ стабильности структур на атомарно-чистых поверхностях монокристаллов.— *Электронная промышленность*, 1993, № 10.
18. Surface modification of organic films deposited on graphite by the scanning tunneling microscope/M.O.Bashkin, V.A.Bespalov, A.V.Emelyanov et al.— *Ultramicroscopy*, 1992, vol. 42—44, p. 977.
19. Формирование поверхностных структур на графите в реакциях с галогенидами ванадия, титана, фосфора и хрома/С.Д.Дубровенский, А.В.Емельянов, А.В.Зимин и др.— *Журнал прикладной химии*, 1992, т. 65, № 10, с. 2253.

# Принцип объемно-структурного соответствия фаз и формирование элементов в микро- и наноэлектронике

А.В.ЕМЕЛЬЯНОВ, С.М.ПОРТНОВ

Разработанные в Государственном научно-исследовательском институте физических проблем принципы объемно-структурного соответствия фаз на границе раздела обеспечивают возможность как интерпретации экспериментально установленных параметров границ раздела и поверхности твердых тел, так и позволяют предсказывать ранее не обнаруженные их свойства, которые могут стать основой создания новых электронных элементов, каталитических систем и т.д. Результаты проведенных в институте за последние 10 лет работ по развитию указанных принципов и их конкретным приложениям дают основание рассматривать принципы объемно-структурного соответствия фаз как надежный инструмент для построения элементной базы субмикро- и наноэлектроники. В настоящей работе дается обзор наиболее интересных применений принципов объемно-структурного соответствия фаз, в т.ч. для развития теории межфазных границ диэлектрик/полупроводник (металл) и теории физической и химической адсорбции, разработки низкотемпературных совмещенных процессов формирования кремниевых МОП-структур, оценки предельных размеров электронных устройств и построения элементной базы наноэлектроники.

Разработка новых электронных элементов с размерами менее 0,1 мкм, а также ускоренное развитие многих отраслей науки и техники, в т.ч. гетерогенного катализа и защиты от коррозии, требуют детального понимания природы процессов, протекающих на границах раздела фаз. Отсутствие надежных теоретических представлений о закономерностях формирования границ раздела не позволяет создавать последние с необходимыми характеристиками, обуславливая эмпирический перебор множества факторов, влияющих на параметры границ раздела.

## Теория межфазных границ полупроводник (металл)—диэлектрик

Известно, что электрофизические параметры границ раздела диэлектрик/полупроводник (металл) в значительной степени определяются их структурой. Определенные достижения в установлении оптимальной структуры указанных границ раздела были связаны с разработкой принципа

кристаллохимического соответствия, согласно которому кристаллическая решетка диэлектрика ориентируется относительно решетки подложки таким образом, чтобы между расположением атомов в обеих решетках было максимальное сходство и атомы новой решетки претерпевали минимальное смещение. С использованием этого принципа, в частности, был проведен структурный анализ границ раздела InSb и GaAs с гомоморфными диэлектриками [1]. Однако совпадения плоских групп симметрии и близости параметров сопрягающихся двумерных решеток оказалось недостаточно для формирования границ раздела с оптимальными параметрами. В частности, наилучшим структурным соответствием с подложкой InSb(100), согласно работе [1], характеризуется соединение InSbO<sub>4</sub> с ориентацией (001), тогда как экспериментальные данные свидетельствуют о наилучших электрофизических параметрах для границы раздела диэлектрик/полупроводник состава In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+α—Sb/InSb. Этот факт можно объяснить тем, что граница раздела образуется не в результате механического наложения кристаллических решеток, а за счет встраивания решетки (или решеток — в случае сложных полупроводников) диэлектрика в решетку подложки.

Необходимость учета объемных соотношений между растущей и исходной фазами положена в основу принципа объемно-структурного соответствия фаз [2]. Принцип базируется на предположении о наличии в контакте с подложкой упорядоченной прослойки диэлектрика (как правило, оксида) с искаженной структурой за счет встраивания ее в решетку подложки. Это искажение описывается набором эмпирических правил: при изменении формы элементарной ячейки диэлектрика ее объем остается постоянным; встраивание происходит слоями, кратными высотам элементарных ячеек подложки и диэлектрика, за счет изменения в определенных пределах (до 10—15%) длин и углов связей в диэлектрической фазе; сохраняется объем монослоя атомов, приходящихся на единицу площади поверхности в решетке подложки; объем структурного элемента на границе раздела определяется как сумма объемов его отдельных связей. Схематично встраивание кристаллической решетки диэлектрика в кристаллическую решетку подложки показано на рис. 1.



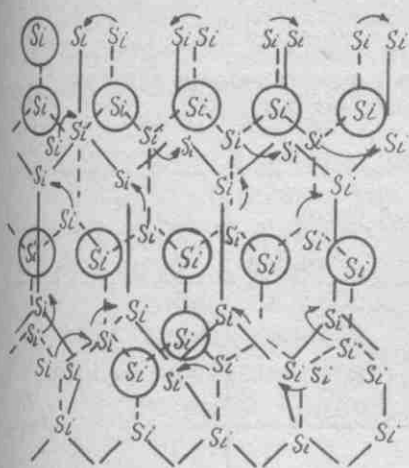


Рис. 1. Схематичное изображение встраивания в кристаллическую решетку кремния (111) кристаллической решетки диоксида кремния ( $\beta$ -тридимита) в направлении  $10\bar{1}0$ . Штриховыми линиями показана решетка кремния, а сплошными — встроившаяся в нее решетка оксида; в кружках изображены атомы Si, принадлежавшие решетке кремния и выпавшие в междоузлие; стрелками обозначен переход атомов Si из позиций в решетке кремния в позиции решетки оксида

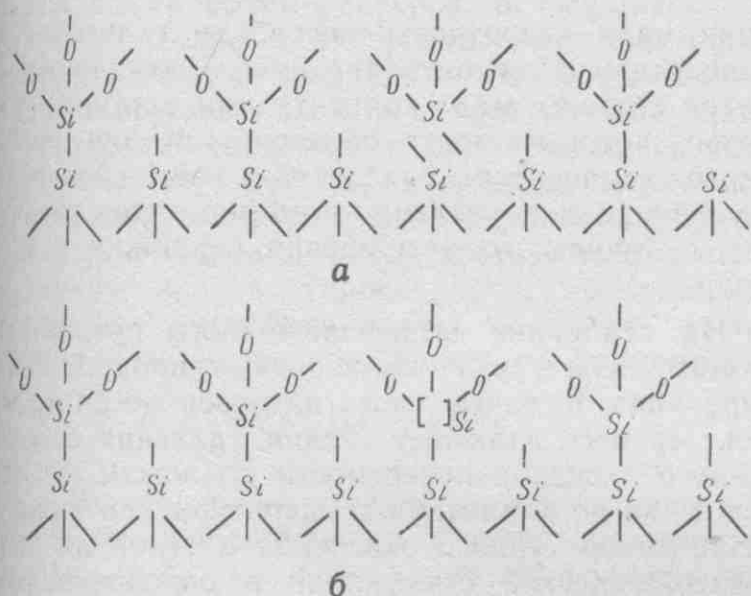


Рис. 2. Дефекты, возникающие из-за несоответствия объемов в слое кремния, принадлежащем оксиду, типа сверхстехиометрических атомов (а) и вакансионного типа (б)

С использованием вышеуказанных правил встраивания можно рассчитать концентрацию атомов с незамкнутыми связями, образующихся из-за несоответствия площадей ( $N_s^{н.с.}$ ) и объемов ( $\Delta N_v^{н.с.}$ ) элементарных ячеек диэлектрика и подложки [2—5]. Так, для границы раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  определена концентрация атомов кремния с незамкнутыми связями, образующихся при встраивании различных модификаций  $\text{SiO}_2$  в кристаллическую решетку подложки, и показано, что величина  $N_s^{н.с.}$  коррелирует с плотностью быстрых поверхностных состояний, а величина  $\Delta N_v^{н.с.}$  — с плотностью медленных состояний на границе раздела [2—5]. В зависимости от соотношения концентрации атомов кремния на границе раздела со стороны оксида, рассчитанных с учетом изменения площади элементарной ячейки оксида и с учетом сохранения объема монослоя [2—5], на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  формируются два раз-

личных по природе типа центров (дефектов): вакансионного типа и типа сверхстехиометрических атомов кремния (рис. 2). Эти дефекты представляют собой сложные дипольные центры, имеющие противоположную направленность. Изменение типа дефекта при каком-либо воздействии на границу раздела, сопровождающемся изменением ее структуры, будет вызывать смену знака встроенного заряда на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ .

Принцип объемно-структурного соответствия может использоваться и для расчета концентрации электрически активных дефектов на границе раздела гомоморфный диэлектрик/полупроводниковое соединение [6]. В этом случае диэлектрик является многофазным, а встраивание решеток составляющих его фаз в решетку подложки происходит слоями таким образом, что сумма высот элементарных ячеек встраиваемых фаз кратна высоте элементарной ячейки полупроводника. Установлена взаимосвязь между величиной встроенного заряда на границе раздела и величиной свободного объема, образующегося при встраивании. Наличие большего свободного объема способствует более полному залечиванию дипольных дефектов атомами примеси и улучшению электрофизических параметров границы раздела. Приведенные в табл. 1 данные показывают взаимосвязь расчетных величин свободного объема и экспериментально полученных значений встроенного заряда для границ раздела гомоморфный оксид/полупроводник  $\text{A}^3\text{B}^5$ . Оптимизация фазового состава границ раздела диэлектрик/полупроводниковое соединение в рамках принципа объемно-структурного соответствия позволила, в частности, существенно снизить плотность поверхностных состояний на границе раздела  $\text{CdTe}/\text{оксид}/\text{InSb}$  [7].

Принцип объемно-структурного соответствия нашел применение и для анализа взаимосвязи строения и электрофизических параметров границы раздела полупроводниковых соединений с гетероморфными фазами. Так, анализ границы раздела  $\text{NbN}/\text{GaAs}$  показал, что оптимальные электрофизические параметры в этой системе

Таблица 1

Зависимость величины встроенного заряда на границе раздела диэлектрик/полупроводник  $\text{A}^3\text{B}^5$  от величины свободного объема при встраивании диэлектрика в матрицу полупроводника

Система	Свободный объем, $\text{нм}^3$	Встроенный заряд, $\text{Кл}/\text{см}^2$
$\alpha\text{-Sb-In}_2\text{O}_3/\text{InSb}(111)$	$12,0 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-8}$
$\alpha\text{-As-In}_2\text{O}_3/\text{InAs}(111)$	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$
$\alpha\text{-As-Ga}_2\text{O}_3/\text{GaAs}(111)$	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-7}$

будут достигнуты при наличии прослойки арсенида ниобия, и позволил дать рекомендации по выбору условий формирования контакта Шоттки с такой структурой [8].

С использованием принципа объемно-структурного соответствия был проведен расчет концентрации электрически активных дефектов на границе раздела гомоморфный диэлектрик/металл [9, 10]. Полученные результаты позволили объяснить особенности хода кривой работы выхода электронов (а также изменения коэффициента прилипания адсорбата и перераспределения примеси между поверхностным слоем и объемом металла) изменением типа или концентрации дефектов на начальных стадиях хемосорбции. Определенные в рамках принципа объемно-структурного соответствия параметры упорядоченных поверхностных структур, образующихся при стыковке двумерной решетки металла и искаженной (в соответствии с правилами встраивания) двумерной решетки диэлектрика на границе раздела хорошо соответствовали экспериментально регистрируемым характеристикам структур, возникающих на начальных этапах хемосорбции кислорода и халькогенов.

**Разработка низкотемпературных процессов для субмикронной технологии. Роль «залечивания» ненасыщенных связей атомов на межфазных границах в «совмещенных» процессах**

Результаты расчета концентрации дефектов с незамкнутыми связями, образующихся из-за несоответствия объемов на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  с различными модификациями оксида (табл. 2), показывают, что при образовании в переходном слое высоко- и низкотемпературных модификаций оксида возникают дипольные центры разной направленности [5].

На основе анализа природы электрически активных дефектов на границе раздела в рамках принципа объемно-структурного соответствия предложен способ контролируемого изменения концентрации таких дефектов, а следовательно, величины встроенного заряда на границе раздела низкотемпературный оксид/кремний, состоящий во введении в переходную область определенной концентрации галогенов. Механизм управления величиной заряда основан на стимулированном примесью структурно-фазовом превращении упорядоченной прослойки  $\alpha$ -кварца на границе раздела с кремнием. Уменьшение плотности быстрых поверхностных состояний при низкотемпературном окислении может быть обеспечено путем уменьшения энергии бомбардирующих поверхность полупроводника ионов, стимулирующих процесс окисления, и насыщения незамкнутых связей атомов, образующихся из-за несоответствия площадей элементарных ячеек  $\text{Si}$  и  $\text{SiO}_2$  на границе раздела  $N_s^{\text{н.с.}}$ , атомами или ионами галогена. При низкотемпературном окис-

Концентрация дефектов с незамкнутыми связями на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$

Подложка	Встраиваемый оксид	$\Delta N_s^{\text{н.с.}} \times 10^{-14}, \text{ см}^{-2}$
Si(111)	$\alpha$ -кварц (0001)	-0,84
	$\beta$ -тридимит (0001)	+0,56
	$\beta$ -кristобалит (111)	+0,57
Si(100)	$\alpha$ -кварц (0001)	-0,10
	$\alpha$ -кristобалит (100)	+1,15
	$\beta$ -кristобалит (111)	+0,17

лении мала вероятность десорбции галогена, а следовательно, неконтролируемого окисления. С другой стороны, мала концентрация незамкнутых связей, которые могут образоваться при переходе от температуры окисления к комнатной температуре за счет различия коэффициентов линейного термического расширения подложки и оксида.

На основании вышеизложенного предложен низкотемпературный совмещенный процесс формирования оксидных слоев на поверхности кремния. Процесс включает стадии удаления естественного оксида с поверхности подложки, ее охлаждения до комнатной температуры или ниже и низкотемпературного окисления в условиях низкоэнергетической стимуляции с одновременным залечиванием незамкнутых связей поверхностных атомов в галогенсодержащей среде. Все стадии должны осуществляться в едином цикле в сверхвысоком вакууме. В зависимости от требований технологического процесса в дальнейшем производится нанесение различных функциональных слоев, в частности, металлизации. С помощью такого процесса получена граница раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  с электрофизическими параметрами на уровне термических оксидов при толщине слоя диэлектрика менее 15 нм.

**Анализ процессов перестройки атомарно-чистых поверхностей твердых тел; новый подход к физической и химической адсорбции**

Установленные зависимости между структурой границ раздела и их электрофизическими параметрами (определяемыми дипольными центрами, возникающими из-за объемного несоответствия сопрягающихся фаз) дают основание рассматривать объем структурных элементов на границе раздела не как некий геометрический параметр, а как характеристику, отражающую взаимодействие «пограничных» атомов. Чтобы подчеркнуть это обстоятельство, вместо термина «объем» вводится понятие «объем-фактора» — характеристики межатомного взаимодействия.

С учетом этого факта сформулирован принцип постоянства объема применительно к перестройке атомарно-чистых поверхностей монокристаллов (как частный случай принципа объемно-структурного соответствия) [13, 14]. Согласно принципу постоянства объема, в реконструированной кристаллической решетке сумма объем-факторов поверхностного и нижележащего перестроенного слоев, участвующих в образовании упорядоченной структуры, равна сумме объем-факторов этих слоев до ее образования.

С позиций принципа постоянства объема интерпретируются и процессы перестройки поверхности при физической и химической адсорбции атомов. При физической адсорбции общий объем-фактор поверхностного атомного слоя, модифицированного адсорбатом, определяется как сумма объем-факторов, относящихся к атомам подложки и адсорбата. Этот объем-фактор остается таким же, как и объем-фактор немодифицируемого слоя, и данное условие является критерием стабильности формирующихся поверхностных структур. В качестве примера расчета параметров систем с физадсорбционным взаимодействием можно рассмотреть поверхность металлов или полупроводников, содержащих в качестве адсорбата атомы, входящие в состав подложки. Расчет проводится по формуле:

$$\sum_{i=1}^q N_{p.c.}(i) V_{p.c.}(i) = q N_{н.с.} V_{н.с.},$$

где  $N_{p.c.}(i)$  и  $N_{н.с.}$  — концентрация атомов в  $i$ -том реконструированном и нереконструированном слоях, а  $V_{p.c.}(i)$  и  $V_{н.с.}$  — объем-факторы атомов в этих слоях, определяемые как

$$V_{p.c.}(i) = n V_0 / k_{r(i)};$$

$$V_{н.с.} = n V_0 / k_{r(н.с.)},$$

где  $n$  — число валентных электронов в атоме,  $k_{r(i)}$  и  $k_{r(н.с.)}$  — количество связей данного атома в  $i$ -том реконструированном и нереконструированном слоях,  $q$  — количество перестроенных слоев. Величина  $V_0$ , названная нами нормированным объем-фактором, представляет собой характеристику элемента периодической системы, не зависящую, в отличие от объем-фактора, от расположения атомов данного элемента в какой-либо кристаллической решетке. Справедливость предлагаемого подхода подтверждается на примере расчета параметров упорядоченных структур на поверхности Si(111) и (100), GaAs(100), Pt(110) и др. [13, 14]. Результаты расчета параметров упорядоченных структур в указанных выше системах свидетельствуют, что модельные структуры, для которых соблюдаются требования принципа постоянства объема, отвечают реально наблюдаемым реконструированным поверхностям металла или полупроводника. В частности, для модели «димер-ад-атом-дефект упаковки» поверхностной структуры Si(111)— $7 \times 7$  (рис. 3) суммарный объем-фактор реконструи-

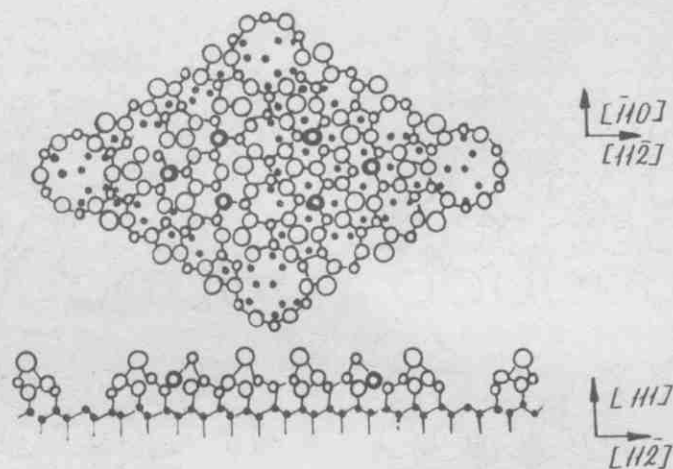


Рис. 3. Модель упорядоченной структуры Si(111)— $7 \times 7$

рованных слоев на площади элементарной ячейки отличается от суммарного объем-фактора тех же нереконструированных слоев менее чем на 1%, что и обуславливает стабильность данной структуры.

При химической адсорбции в суммарном объеме модифицированного адсорбатом слоя учитывается вклад «обменного» взаимодействия между адсорбентом и адсорбатом. Расчет объем-факторов в системе с химадсорбционным взаимодействием проводится по формуле:

$$V_{A,B} = n V_A + m V_B - \frac{1}{1/(n V_A) + 1/(m V_B)},$$

где символ  $A$  относится к атомам адсорбата, а  $B$  — адсорбента;  $n$  и  $m$  обозначают количество взаимодействующих атомов. Величины объем-факторов определяются к к

$$V_A = n_A V_0 / k_{rA};$$

$$V_B = n_B V_0 / k_{rB}.$$

Справедливость такого подхода можно показать на примере хемосорбции углерода на поверхности W(100). По мере увеличения концентрации углерода наблюдается последовательное

Таблица 3

Величина избыточного объем-фактора для поверхностных структур, образующихся при хемосорбции углерода на поверхности W(100)

Структура	Модель	Избыточный объем, $\Delta V$ , %
c- $2 \times 2$	рис. 4,а	8,7
c- $3V2 \times V2-R45^\circ$	рис. 4,б	3,8
$5 \times 1$	рис. 4,в	4,8
	рис. 4,г	-0,6

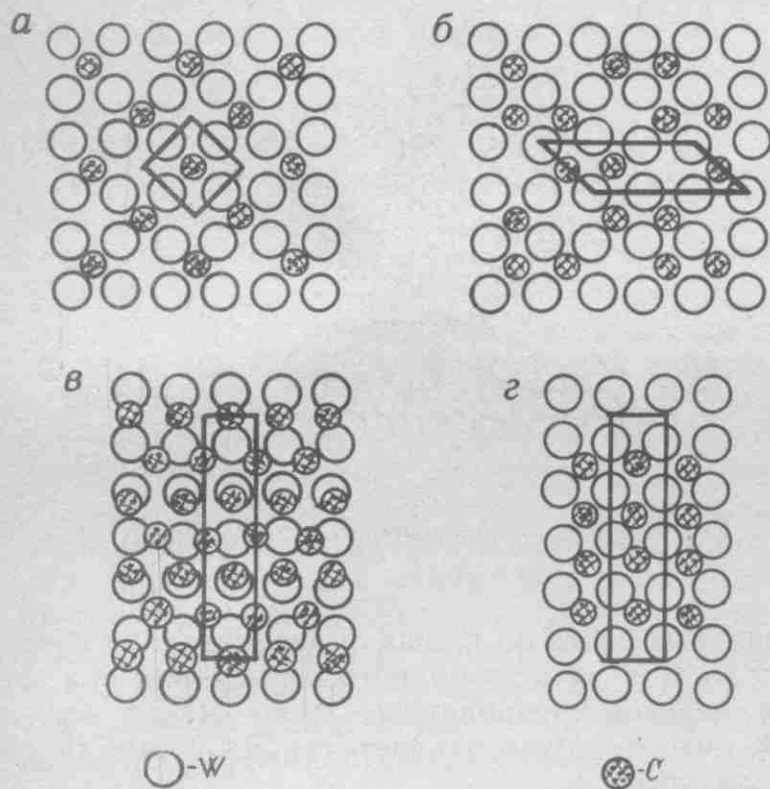


Рис. 4. Модели упорядоченных структур, возникающих при адсорбции углерода на поверхности (100) вольфрама:  $c-2 \times 2$  (а),  $c-3\sqrt{2} \times \sqrt{2}-R45^\circ$  (б),  $5 \times 1$  (в, с).

формирование структур  $c-2 \times 2$ — $c-3\sqrt{2} \times \sqrt{2}-R45^\circ$ — $5 \times 1$ . Результаты расчета превышения суммарного объем-фактора реконструированных слоев над объем-фактором нереконструированных слоев ( $\Delta V$ ) для модельных упорядоченных структур приведены в табл. 3. Наиболее устойчивой системой является структура  $5 \times 1$ , модель с отсутствующим рядом (рис. 4, с) и это подтверждается результатами экспериментального исследования методами дифракции электронов низкой энергии и дифракции атомов гелия.

#### Анализ предельных размеров электронных элементов и проблемы создания элементов нанoeлектроники

Возможности принципов объемного соответствия могут быть реализованы при создании элементов нанoeлектроники, в частности, элементов памяти атомарных запоминающих устройств. Проведенный анализ возможных путей достижения плотности записи информации на уровне 1 Тбит/см<sup>2</sup> [15] показывает, что минимальными размерами и при этом стабильными свойствами будут обладать элементы, записанные в единичных ячейках упорядоченных поверхностных структур. Важнейшими особенностями ячеек упорядоченных структур как основы для формирования накопителей атомарных запоминающих устройств являются следующие: периодическое изменение потенциального или геометрического рельефа, которое может регистрироваться зондом сканирующего туннельного микроскопа

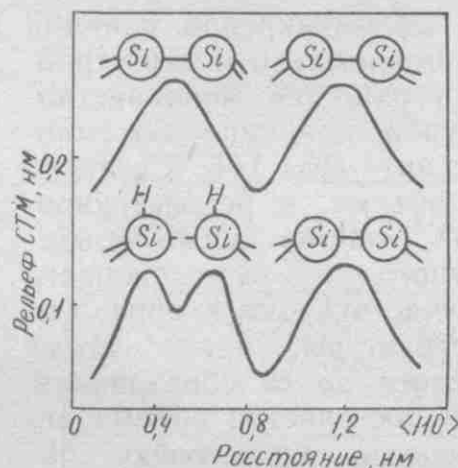


Рис. 5. Расчетные СТМ профили перестроенной поверхности Si(100) до (верхняя кривая) и после (нижняя кривая) локальной модификации в водородсодержащей среде как пример записи бита информации в единичную ячейку упорядоченной поверхностной структуры

(СТМ), с шагом от десятых долей нанометра до десятков нанометров: возможность локального изменения структуры в одной из ячеек при неизменности структуры соседних ячеек; временная стабильность параметров.

Запоминающее устройство на основе упорядоченных структур может реализоваться следующим образом. Зонд СТМ, сканируя по поверхности, регистрирует существующий на ней рельеф, который зависит от числа химических связей поверхностных атомов и их окружения. Локальное воздействие на определенные узлы структуры, в частности, залечивание незамкнутых связей поверхностных атомов различными примесями в процессе локальной адсорбции, стимулированной действием зонда, приводит в общем случае к изменению величины объем-фактора поверхностных атомов, и следовательно, к структурному превращению в ячейке. Производя такое воздействие в определенной последовательности, получим записанную на поверхности информацию, считывание которой также производится зондом СТМ. В рамках принципа постоянства объема могут быть выбраны подложки, на которых образуются упорядоченные структуры с заданным периодом, и залечивающие примеси, которые позволят изменить структуру выбранных ячеек (в процессе локально-стимулированной физической или химической адсорбции) при сохранении неизменной структуры соседних ячеек.

В качестве наиболее простого и наглядного примера записи бита информации в ячейку упорядоченной структуры можно назвать воздействие зонда СТМ в водородсодержащей среде на димеры кремния, образующиеся на атомарно-чистой поверхности Si(100)- $2 \times 1$ . Разрыв связей в димере и образование двух связей кремний—водород практически не изменяет объем-фактор атомов в выбранной ячейке, что обуславливает стабильность полученной структуры и неизменность структуры соседних ячеек. В то же время произойдет значительное изменение величины туннельного тока в месте локального действия зонда (рис. 5).

Приведенный в настоящей работе обзор возможных применений принципов объемно-струк-

турного соответствия фаз характеризует эти принципы как мощный инструмент для интерпретации известных и предсказания новых характеристик поверхностей и границ раздела твердых тел, создания новых процессов и элементной базы микро- и нанoeлектроники.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 93-03-5372).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кристаллохимические аспекты формирования МДП структур на основе соединений А В /А.В.Емельянов, Г.М.Кузьмичева, В.П.Лаврищев, В.Б.Уфимцев.— Доклады АН СССР, 1980, том 254, № 3, с. 636—640.
2. Емельянов А.В. Граница раздела — ключ к построению приборов функциональной электроники.— Электронная промышленность, 1983, вып. 8(125), с. 36—42.
3. Емельянов А.В., Егоркин В.В., Бочкарев Э.П. Роль принципов объемного соответствия в формировании границы раздела Si/SiO<sub>2</sub>.— Доклады АН СССР, 1984, том 278, № 6, с. 1371—1375.
4. Емельянов А.В. Дефекты на границе раздела Si—SiO<sub>2</sub>.— Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1985, вып. 2(114), с. 3—10.
5. Зарядовые свойства границы раздела кремний — низкотемпературный диоксид кремния/М.О.Башкин, А.В.Емельянов, О.Д.Меньшиков и др.— Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1990, вып. 1(135), с. 32—35.
6. Емельянов А.В., Уфимцев В.Б., Фомин С.Н. Структура и физико-химические свойства границы

III V  
раздела А В — собственный оксид.— Электронная техника. Сер. Материалы, 1985, вып. 4(203), с. 45—48.

7. Исследование структурных искажений на границе раздела полупроводник—диэлектрик/Л.А.Вьюков, А.В.Емельянов, А.В.Ермолов и др.— Кристаллография, 1990, том 35, вып. 1, с. 142—146.
8. Инкин В.Н., Кирпиленко Г.Г., Портнов С.М. Особенности структуры межфазной границы NbN—GaAs.— Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1991, вып. 4(143), с. 32—35.
9. Емельянов А.В., Егоркин В.В., Бочкарев Э.П. Реконструкция поверхности кремния и некоторых металлов при адсорбции кислорода.— Доклады АН СССР, 1985, том 281, № 4, с. 866—869.
10. Егоркин В.В., Портнов С.М. Объемные соотношения фаз в системах металл—оксид (халькогенид) и особенности начальных стадий формирования границ раздела между ними.— Известия АН СССР. Сер. Неорганические материалы, 1990, том 26, № 7, с. 1467—1471.
11. Поведение примеси хлора в структурах кремний—низкотемпературный диоксид кремния/М.О.Башкин, А.В.Емельянов, О.Д.Меньшиков, С.М.Портнов.— Известия АН СССР. Сер. Неорганические материалы, 1991, том 27, № 12, с. 2476—2479.
12. Низкотемпературное формирование оксидных слоев в субмикронной технологии/М.О.Башкин, А.В.Емельянов, С.М.Портнов, Н.С.Самсонов.— Электронная промышленность, 1992, № 6, с. 2—5.
13. Емельянов А.В. Принципы реконструирования поверхностных слоев полупроводников на атомарном уровне.— Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1987, вып. 4(124), с. 68—80.
14. Емельянов А.В., Портнов С.М. Анализ стабильности структур на атомарно-чистых поверхностях монокристаллов.— Электронная промышленность, 1993, № 10, с. 3—6.

## Методы формирования и исследования пленок Ленгмюр—Блоджетт и молекулярная нанотехнология

В.А.БЫКОВ

С появлением эффективных методов моделирования и исследования поверхностных структур с атомарным разрешением начала развиваться новая область техники — нанoeлектроника. Для ее развития требуются новые материалы и технологии. Одно из возможных направлений технологии — молекулярная нанотехнология на базе ЛБ-пленок, так называемая ЛБ-технология, причем получаемые материалы совместимы с техникой исследования и моделирования наноструктур на базе сканирующей зондовой микроскопии.

ЛБ-технология отличается простотой, экологической чистотой и не требует, по крайней мере на стадии моделирования нанометровых структур,

больших материальных затрат для обеспечения работы одной группы исследователей.

Получаемые структуры даже при нанометровых размерах единичных элементов устойчивы на воздухе, что подтверждается результатами исследования наноструктур.

Особенностью молекулярной нанотехнологии является сочетание бесконечного разнообразия органических молекул с невозможностью достоверно предсказать свойства получаемых элементов, что делает необходимой для достижения конечного результата обеспечение параллельной работы многих исследовательских групп, что в свою очередь требует значительных материальных затрат на развитие этого направления.

Пленки Ленгмюра—Блоджетт (ЛБ-пленки) [1, 2] могут быть молекулярно гладкими проводниками [3], подзатворными диэлектриками в МОП-технологии [4], высокоразрешающими плазмостойкими резистами субмикронного диапазона [5], пирозлектрическими сенсорами [6], биосенсорами [7] и этим не ограничивается круг их применения [8]. С познавательной точки зрения ЛБ-пленки необычайно интересны в качестве объекта исследования методами сканирующей зондовой микроскопии, включающей в себя широкий диапазон методов сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии и спектроскопии с возможностью электрического и контактного воздействия на объект.

Учитывая высокую стабильность ЛБ-пленок на воздухе и устойчивое существование структур с толщиной проводящих областей 0,7—0,1 нм при комнатных температурах, а также возможность необратимого уменьшения проводимости под воздействием света и электронов, становится понятным интерес к этим структурам и технологии их получения, именуемой ЛБ-технологией.

### ЛБ-технология

ЛБ-технология представляет собой разновидность технологий молекулярного наслаивания и включает в себя ряд методов получения структур с заданным чередованием мономолекулярных слоев, формируемых предварительно на границе раздела фаз вода—воздух.

Свободная поверхность воды имеет поверхностную энергию 72,75 эрг/см<sup>2</sup> при 20°C, в то время как бензол — около 22 эрг/см<sup>2</sup>, этанол — около 23 эрг/см<sup>2</sup>, парафины — около 22 эрг/см<sup>2</sup> [9]. Такая высокая величина поверхностной энергии обусловлена тем фактом, что из восьми водородных связей, образуемых двумя молекулами воды в объемной фазе, только семь могут быть насыщены на поверхности. Вещества, способные взаимодействовать с водой, замкнув на себе разорванную систему водородных связей, и уменьшать поверхностную энергию воды называются поверхностно-активными (ПАВ). Молекулы таких веществ дифильны, т.е. как правило в них можно выделить:

— сильно взаимодействующую с водой молекулярную группу, так называемую гидрофильную. Она может быть ионогенной, типа (COO<sup>-</sup>Na<sup>+</sup>, —SO<sub>3</sub><sup>-</sup>K<sup>+</sup>, —NH<sub>3</sub><sup>+</sup>Cl<sup>-</sup>) или неионогенной, типа (—OH, —NO<sub>2</sub>, —O—CO—, —NH<sub>2</sub>);

— группу с полностью насыщенной системой валентных связей, например (—C<sub>n</sub>H<sub>2n+1</sub>, —C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>, >C60) — гидрофобная группа.

Поверхностно-активное вещество характеризуется давлением растекания  $\pi_r$  (5—15 дин/см<sup>2</sup>) и давлением коллапса  $\pi_k$  (30—70 дин/см<sup>2</sup>). Давление растекания — это равновесное значение разности поверхностных натяжений свободной поверхности и поверхности, покрытой Ленгмюровским слоем, образовавшимся от растекания

кусочка объемной фазы в присутствии нерастекшейся объемной фазы. Давление коллапса — это давление, при котором на поверхности воды начинает зарождаться объемная фаза, в промежуточной области поверхностных давлений монослой устойчив. Если в воду со сформированным на поверхности мономолекулярным слоем ПАВ начать погружать несмачиваемую (гидрофобную) пластину, поддерживая поверхностное давление постоянным, то монослой ПАВ начнет адсорбироваться на поверхность такой пластинки, т.к. это приводит к уменьшению межфазной поверхностной энергии на границе раздела фаз подложка—вода. Заметим, что линия мениска в этом случае является особой линией, на которой имеет место скачок свободной поверхностной энергии — часть подложки уже погруженная в воду является гидрофильной, в то время как «воздушная» часть подложки гидрофобна. Вследствие этого на линии мениска имеется два устойчивых значения краевого угла смачивания:

$\varphi_0$  — угол оттекания — когда подложка идет вверх и  $\varphi_n$  — угол натекания, когда подложка идет вниз.

Краевые углы и высота поднятия мениска определяются значениями межфазных поверхностных энергий и связаны с ними известными соотношениями [9]:

$$\sigma_1 \cos \varphi = \sigma_2 - \sigma_{12}, \quad (1)$$

где  $\sigma_1$  — поверхностное натяжение воды;  $\sigma_2$  — поверхностная энергия подложки;  $\sigma_{12}$  — межфазное свободное поверхностное натяжение.

$$h_l = \alpha \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_l}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — капиллярная постоянная.

При изменении направления движения подложки мениск стоит относительно подложки до тех пор, пока значение краевых углов смачивания не достигнет своих предельных значений  $\varphi_{up}$  и  $\varphi_{down}$  соответственно. После этого начинается нанесение мономолекулярного слоя. При движении подложки вверх возможны два случая:  $\varphi_{up} \neq 0$  и  $\varphi_{up} = 0$ , т.е. полное смачивание подложки. Значение  $\varphi_{up}$  определяется природой мономолекулярного слоя. Если  $\varphi_{up} = 0$ , ЛБ-пленки получают низкого качества и нанесение слоев требует сушки после нанесения каждого слоя. При нанесении поверхностное давление  $\pi$  должно быть больше давления растекания. Если  $\pi_s < \pi_r$ , то монослой, адсорбированный на подложку при движении последней, сползет с подложки снова на воду.

Величина предельного поднятия/опускания мениска

$$\Delta h = h_{up} + h_{down}$$

обычно порядка 1 мм, т.е. много больше толщины монослоя (~20 Å).

Тип установки	Площадь ванны, см <sup>2</sup>	Объем ванны, см <sup>3</sup>	Максим. площадь, мм <sup>2</sup>	Число барьеров и П-датчиков	Материал ванны
<b>LB-4001 MDT</b> технологическая установка для нанесения ЛБ-пленок на подложки большой площади	66×38= =2508	2500	150×370	1	Полистирол или дюралюминий с с тефлоновым покрытием
<b>LB-4002 MDT</b> учебная ЛБ-ванна для получения моно- и мультислоев	66×15= =990	1000	90×65	1	Тот же
<b>LB-4003 MDT</b> исследовательская установка для получения моно- и мультислоев с возможностью получения альтернативных мультислоев из двух различных монослоев поверхностно-активных веществ	45×11= =495	500	60×(30-50)	2	Дюралюминий с тефлоновым покрытием
<b>LB-4004 MDT</b> исследовательская установка для получения моно- и мультислоев на ванне с малым объемом субфазы. Предназначена для работы с биологическими объектами	122×6=72	100	30×22	1	Тефлон или полистирол

$$h_i \sim a_i = \sqrt{\sigma_{12}/\rho g}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{12}$  — межфазное свободное поверхностное натяжение до осаждения слоев на подложку;  $\rho$  — плотность воды;  $g$  — ускорение свободного падения.

То, что  $\Delta h$  столь велико, имеет фундаментальное значение, т.к. именно это обстоятельство определяет устойчивость мономолекулярных слоев и технологии их нанесения к вибрациям, т.е. наличие вибраций и волн на поверхности практически не влияет на качество получаемых структур, что резко удешевляет себестоимость технологии.

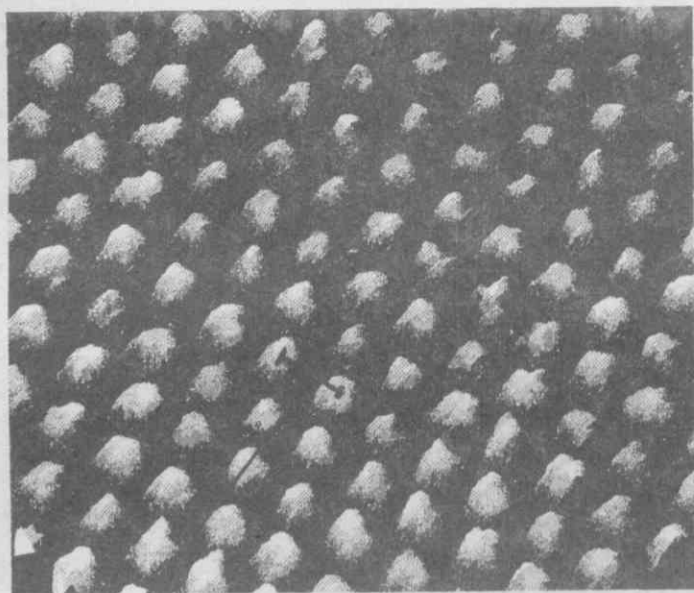
Для изучения свойств мономолекулярных слоев на поверхности воды и формирования из них ЛБ-пленок используется специализированное оборудование — установки нанесения ЛБ-пленок. В настоящее время существует уже более пяти фирм, производящих такие приборы. В России ЛБ-установки высокого качества производятся Исследовательской корпорацией МДТ. В таблице указаны их параметры.

Современная ЛБ-установка должна обеспечивать следующие возможности: — точность измерения и поддержания поверхностного давления 0,1 дин/см; — точность определения площади монослоя до 1%; — определение зарядового состояния монослоя; — определение поверхностной вязкости; — обеспечивать возможность послойного формирования сложных в т.ч. нецентросимметричных структур с определением коэффициента переноса; — обеспечивать возможность быстрой и эффективной очистки рабочей поверхности воды, собственно ЛБ-ванн, барьеров.

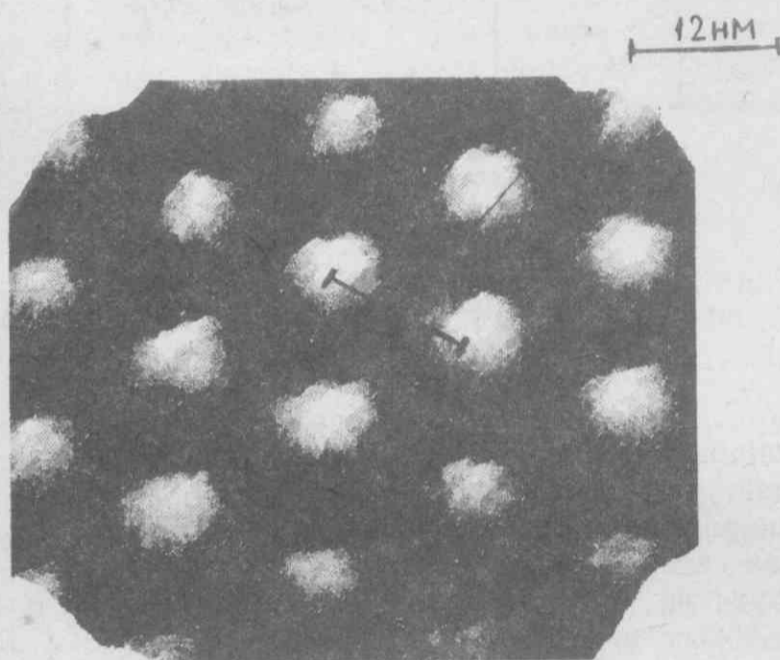
### Сканирующая зондовая микроскопия ЛБ-пленок

С появлением и развитием сканирующей зондовой микроскопии [10] (СЗМ), включающей сканирующую туннельную и атомносиловую микроскопии и спектроскопии, появилась реальная возможность исследования поверхностных структур с атомарным разрешением. Очень удобным объектом исследования методами СЗМ оказались ЛБ-пленки. На них удается наблюдать хорошо воспроизводимые упорядоченные структуры прямо на воздухе. Как уже подчеркивалось ЛБ-пленки формируются из ПАВ, причем процесс осаждения обуславливается стремлением системы понизить свою поверхностную энергию. При этом поверхностная энергия практически достигает своего минимума. Поэтому адсорбционная способность ЛБ-пленок очень мала, что и делает их удобным объектом для СЗМ.

Большинство ЛБ-пленок — диэлектрики. Поэтому методом СЗМ удается изучать пленки толщиной не более трех молекулярных слоев на проводящей подложке. Следует отметить, что подложка для исследования ЛБ-пленок методом СЗМ должна быть молекулярно гладкой и однородной по величине туннельного тока. В качестве таких подложек могут выступать либо монокристаллы благородных металлов, либо монокристаллический графит (Highly Oriented Pyrolytic Graphite — НОРГ). Применение НОРГ удобно, но следует обращать большое внимание на его качество т.к. известно, что на поверхности могут существовать линейные дислокации,



2,5 Å



12 nm

Рис. 1. СТМ-изображение НОРГ

цепочечные структуры, связанные с разориентацией плоскостей НОРГ. На рис. 1 показано СТМ-изображение НОРГ (а) с атомарным разрешением и сверхструктура на НОРГ с периодом 12 нм и гексагональной упаковкой, обусловленная сильной (до 16°C) разориентацией плоскостей НОРГ (б). Для исследования ЛБ-пленок следует применять НОРГ с углом разориентации плоскостей не более одного градуса.

Для исследования ЛБ-пленок методом СТМ требуется прибор, способный работать с низким уровнем шумов при величинах туннельного тока порядка  $10^{-11} \div 10^{-9}$  А (при значениях туннельного напряжения 100 мВ, знак выбирается таким, чтобы шумы были минимальны). Так как при увеличении тока усиливаются адсорбционно-десорбционные процессы, а при адсорбции на иглу вещества с подложки резко увеличивается

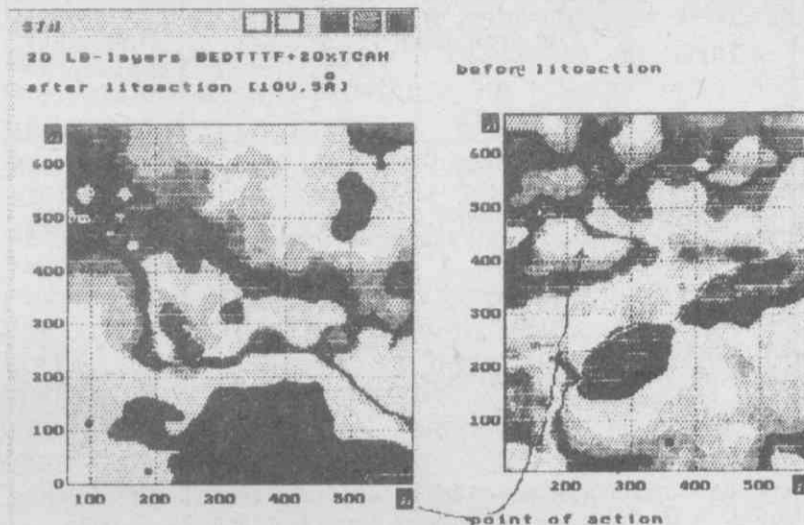


Рис. 2. СТМ-изображение проводящей ЛБ-пленки на основе смеси  $C_{18}H_{37}BEDTTTF$  и  $C_{18}H_{37}TCNA$

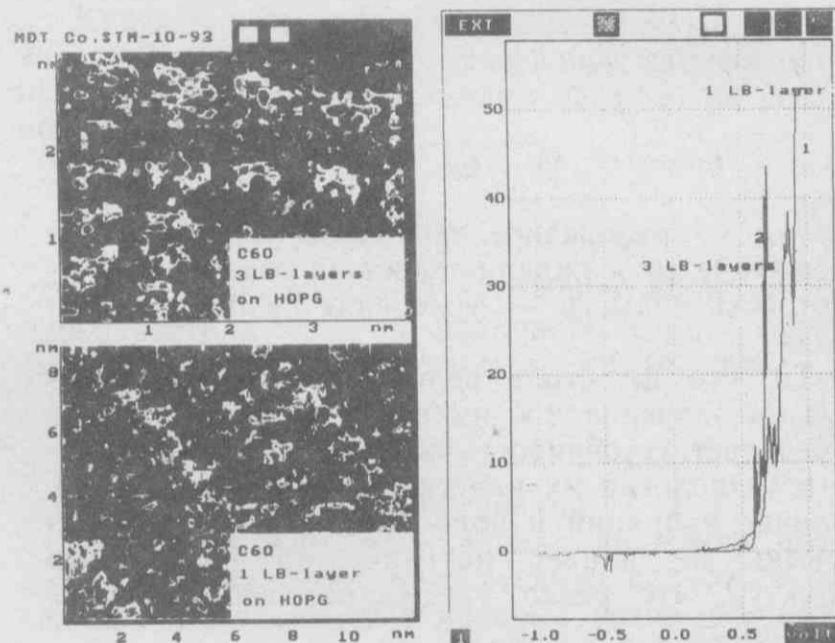


Рис. 3. СТМ-изображение C60 на НОРГ

шум в широкой полосе частот (восстановить работоспособность прибора можно прокаливанием иглы в пламени спиртовки).

Чрезвычайно важно иметь предельно низкие значения дрейфа прибора, так как наилучшие и повторяемые результаты при исследовании ЛБ-пленок наблюдаются на малых (порядка 100 А/с) скоростях сканирования. Это по-видимому обусловлено значительными временами релаксационных процессов в ЛБ-пленках и зависит от агрегатного состояния пленок. В современных приборах собственный дрейф лежит в диапазоне 0,1—1 А/мин. Параметры используемых нами приборов и некоторые результаты



исследования ЛБ-пленок, в т.ч. ЛБ-пленок резисторов, проводящих ЛБ-пленок и др. представлены в работе [11], а в работе [12] были приведены ряд результатов исследования ЛБ-пленок резисторов, проводящих ЛБ-пленок ионрадикальных соединений, молекулярных слоев фуллеренов C<sub>60</sub>, полученных с применением ЛБ-технологии.

### Нанотехнология

В нанометровой области размеров центральной становится проблема получения стабильных элементов с воспроизводимыми характеристиками — мезоскопическая проблема [12].

По мнению автора для получения воспроизводимых характеристик нанометровые структуры должны строиться из веществ с низкой адсорбционной способностью, иметь полностью насыщенные химические связи и быть химически тождественными по составу, то есть быть молекулами. Можно выдвинуть тезис: если наноэлектроника возможна, то она должна быть молекулярной. Но это вопрос будущего.

В настоящее время на основе существующих материалов уже возможно моделировать процессы и элементы нанометровых размеров и исследовать их характеристики. Разработка процессов направленного локального воздействия на нанометровые структуры является центральной проблемой в этой области. Решение этой проблемы позволит перейти к исследованию свойств связанных систем элементов нанометровых размеров.

Для моделирования наноэлектронных активных элементов очень большой интерес представляют проводящие ЛБ-пленки. В настоящее время разработано несколько технологических приемов их получения [3]. При изучении макроскопических свойств пленок трудно получить ответ на вопрос о том какой из способов наиболее пригоден для получения молекулярно-однородных слоев, необходимых для моделирования наноструктур. На рис. 2 приведено СТМ-изображение проводящей ЛБ-пленки на основе смеси донора — C<sub>18</sub>H<sub>37</sub>VEDTTTF и органического акцептора C<sub>18</sub>H<sub>37</sub>TCNA. Оптически качество этих пленок близко. Электрические их свойства сравнимы. Сравнение же СТМ-изображений однозначно показывает непригодность пленок смесей, по крайней мере полученных по использованной технологии, в качестве среды для формирования наноэлементов.

На рис. 3 показано СТМ-изображение молекулярных слоев C<sub>60</sub> на НОРГ и вольт-амперные характеристики (ВАХ) в системе Pt<sub>0,8</sub>Ro<sub>0,2</sub>—C<sub>60</sub>—НОРГ («+» — на образце). При напряжениях 0,5 В заметны характерные особенности спектров C<sub>60</sub>. Пока их удалось зарегистрировать только при наблюдении C<sub>60</sub> в присутствии ЛБ-пленки, причины появления этих особенностей пока не выяснены.

При исследовании «толстых» ЛБ-пленок весьма перспективным представляется применение

атомносиловых микроскопов, хотя режим высокого разрешения на ЛБ-пленках трудно реализуем.

В настоящее время мы вплотную подошли к решению проблем наноэлектроники. Имеются интересные материалы, технологии и инструменты для начала работ по моделированию процессов и элементов. Заметим, что усилий небольшой (1—3 человека) исследовательской группы достаточно для получения законченных результатов в области молекулярной наноэлектроники. Для разработки данного направления нужно много таких исследовательских групп, поскольку особенностью этих исследований является чрезвычайно широкий набор возможных материалов, синтез которых потребует немалых затрат.

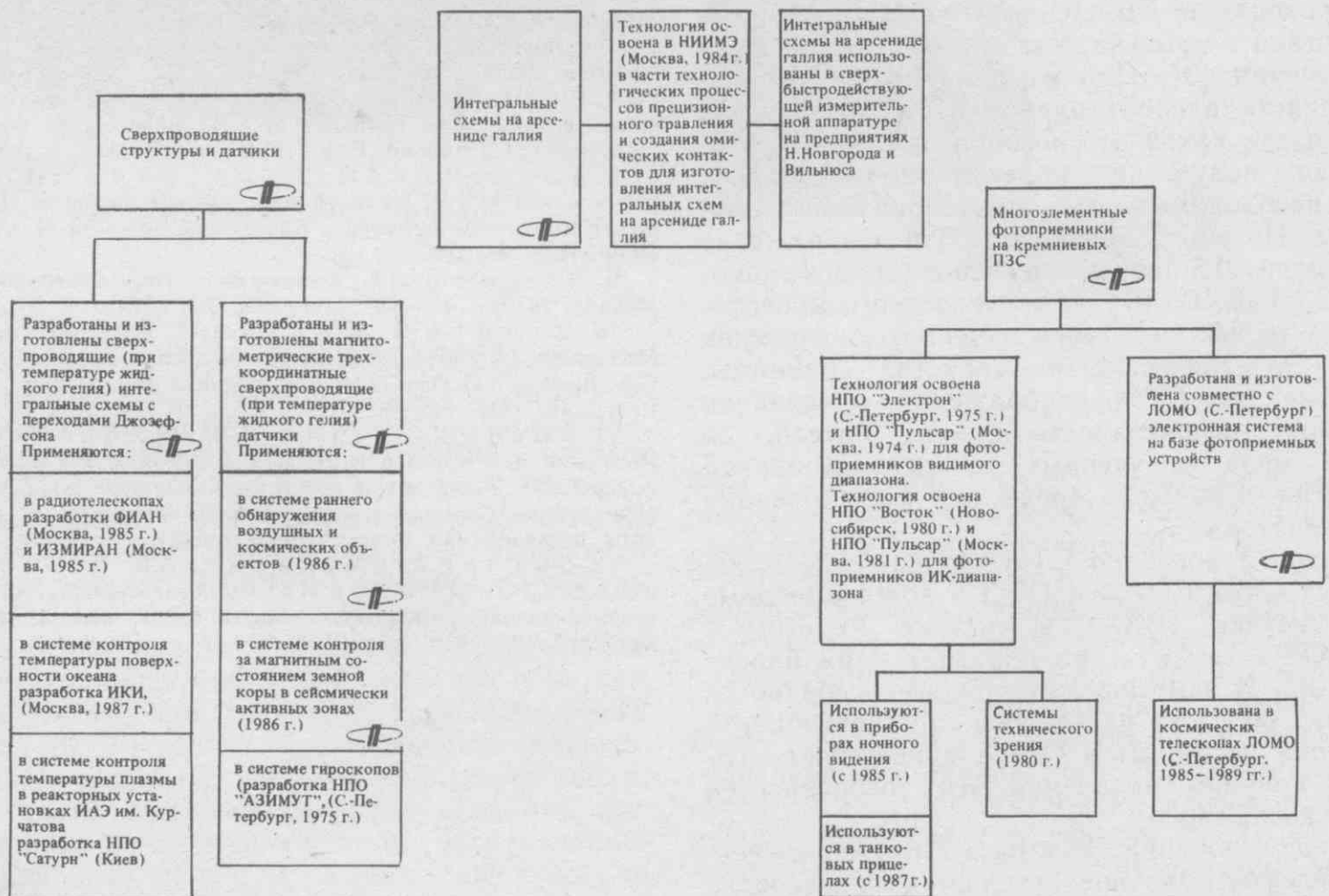
### ЛИТЕРАТУРА

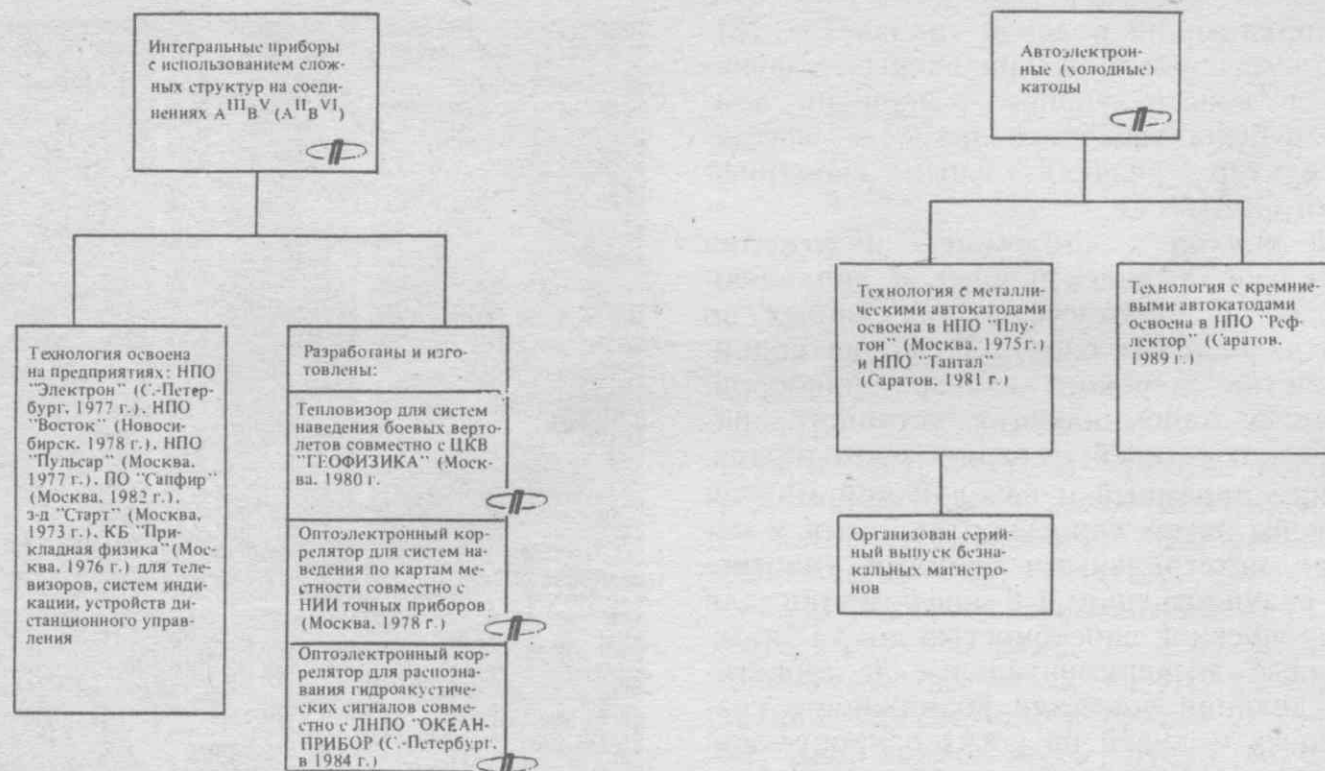
1. Адам Н.К. Физика и химия поверхностей// перевод с третьего английского издания, Москва, 1947 г., стр. 31—129, 236—274.
2. Блинов Л.М. Ленгмюровские пленки// УФН. 1988, т. 155, вып. 3, с. 443—480.
3. Троицкий В.И. и др. Macromol. Chem., Macromol. Symp., 1991, v. 46, 223—227.
4. Мягков И.В. и др. «Field effect transistor with MTDS junctions and gate dielectric on the base of Langmuir films», Письма в ЖТФ, 1989, т. 15, с. 15—18.
5. Matveeva N.K. and Bokov Y.S. Preparation of cyanoacrylate Langmuir-Bldgett films and their ultraviolet and resist application.// Thin Solid Films, 210/211 (1992) 477—479. Н.К.Матвеева и др. «Plasma — resistant electron-beam masking material». Thin solid films, in press.
6. Myagkov I.V., Novak V.R., Lvov Y.M., Terrik G.A. Polar multilayer films built up by Langmuir-Schaefer method.// Second Int. Conf. «Molecular Electronics and Biocomputers», abstracts, p. 89—90, September, 1989, Moscow, USSR; G.G.Roberts «Polar LB thin film layers for nonlinear optical and piezoelectric applications», Ferroelectrics, 1989, v. 91, p. 21—38.
7. Pettу M.C. Application of multilayer films to molecular sensors: some examples of bioengineering at the molecular level.// J.Biomed. Eng., 1991, vol. 13, May, p. 209—214.
8. Алексеев А.С., Валянский С.И., Савранский В.В. Нелинейно-оптические свойства Ленгмюра-Блоджетт-монослоев Бактериородопсина.// Труды ИОФАН, т. 38, 1992, с. 131—150.
9. Адамсон А. Физическая химия поверхностей.// Москва, 1979, с. 11—161, 268—290, 366—374.
10. Binnig G., Rohrer H. Scanning Tunneling Microscopy.// Helv. Phys. Acta, 55, 726 (1982); G.Binnig, C.F.Quate, Ch.Gerber. The Atomic Force Microscope.// Phys. Rev. Lett., 1986, 56, 930.
11. Быков В.А., Беляев А.В., Еремченко М.Д., Жижимонтов В.В., Иконников А.В., Кацур С.Ф., Редченко В.В., Саулин С.А. Новый сканирующий туннельный микроскоп и некоторые результаты исследования молекулярных пленок.— См. наст. вып.
12. Быков В.А., Емельянов А.В., Полторацкий Э.А., Самсонов Н.С. Наноэлектроника как перспектива развития микроэлектроники.// Электронная промышленность, 1993, вып. 11—12, с. 42—46.

ДЛЯ ПРИБОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК, ПРОВОДИМЫХ В ИНСТИТУТЕ, ХАРАКТЕРНО ОБРАЩЕНИЕ В ОСНОВНОМ К НЕТРАДИЦИОННЫМ НАПРАВЛЕНИЯМ ЭЛЕКТРОНИКИ. В ХОДЕ ПРИБОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАТРАГИВАЕТСЯ ВЕСЬ КОМПЛЕКС РАЗРАБОТОК, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРИБОРОВ В ЗАКОНЧЕННОМ ВИДЕ ЭТО СХЕМОТЕХНИКА, ТЕХНОЛОГИЯ, ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ, ИСПЫТАНИЯ И АПРОБАЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИБОРОВ.

БОЛЬШОЕ ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПРИОБРЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА СОЗДАНИЕ:

- ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С ВЫСОКОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ (ДО 50 Гбит/с);
- ПРИБОРОВ НА СОЕДИНЕНИЯХ А<sup>III</sup> В<sup>V</sup> И А<sup>IV</sup> В<sup>VI</sup> ;
- ГАММА-ПРИБОРОВ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ (ПЗС) РАЗЛИЧНОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ;
- ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПЗС ВИДИМОГО И ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНОВ, ФОТОПРИЕМНИКОВ С БОЛЬШИМ ЧИСЛОМ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗЛОЖЕНИЯ, ПЗС ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ;
- ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПТ-СКВИДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОРЦЕВЫХ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ ПЕРЕХОДОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СВЕРХМАЛЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ТОКА И ДР.;
- СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ЦИФРОВЫХ ИС ДЛЯ ЛОГИЧЕСКИХ И ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ, А ТАКЖЕ СТРУКТУР НА ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ ПЕРЕХОДАХ ДЛЯ МИКРОПРОЦЕССОРОВ И КОМПЬЮТЕРОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ВЫСОКИЕ ТАКТОВЫЕ ЧАСТОТЫ (ДО 750 МГц) И МАЛУЮ РАССЕИВАЕМУЮ МОЩНОСТЬ (ДО 0,005 Вт);
- МИКРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ АВТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ СИСТЕМ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ, АВТОЭЛЕКТРОННЫХ КАТОДОВ ДЛЯ МАГНЕТРОНОВ, ВАКУУМНЫХ ИС И ДРУГИХ ПРИМЕНЕНИЙ.





## Особенности развития интегральных схем на арсениде галлия

Э.А.ПОЛТОРАЦКИЙ, Э.А.ИЛЬИЧЕВ, Г.С.РЫЧКОВ

Перспективным направлением в области арсенид-галлиевых ИС является использование многослойных  $\delta$ -легированных структур, резонансно-туннельных эффектов и структур для волоконно-оптических линий передачи информации.

Серьезные разработки ИС на GaAs начались в конце 70-х — начале 80-х годов. До этого материал использовался в дискретных оптоэлектронных и СВЧ приборах. Потребность в развитии интегральных схем на арсениде галлия в конечном счете была связана с повышением производительности систем обработки и передачи информации.

В качестве первых объектов были выбраны интегральные оконечные устройства для волоконно-оптических линий передачи информации (ВОЛПИ). Это было связано с тем, что в системах обработки тракты становились все более узким местом, а в институте был большой опыт разработки оптоэлектронных изделий.

Основу приемного модуля составила интегральная схема, которая включала фотоприемник, усилитель и формирователь (рис. 1). Такие ИС были разработаны, изготовлены и конструк-

тивно оформлены в виде модуля с оптическим входом и высокочастотным выходом, обеспечивая в ВОЛПИ пропускную способность более 1 Гбит/с. [1, 2]. Сочетание в одном кристалле фотоприемника и усилителя дало возможность повысить быстродействие, не теряя чувствительности, так как при этом удалось избежать влияния паразитной емкости, присущей гибридным вариантам.

Передающий модуль был также разработан в виде монолитного интегрального устройства, включающего лазерный диод в качестве излу-

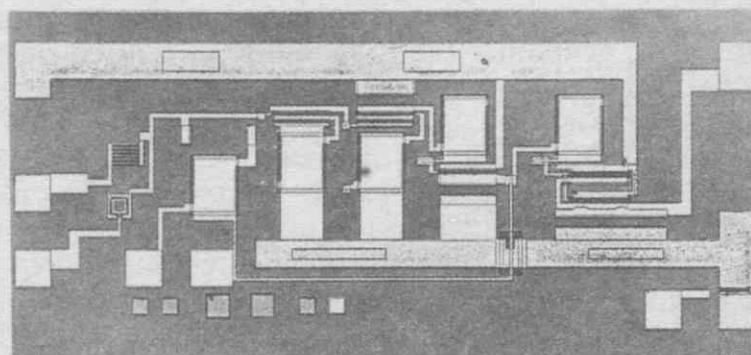


Рис. 1. Внешний вид ИС фотоприемного модуля

чателю и управляющий полевой транзистор [3]. Проблема совмещения таких различных в функциональном и конструктивном отношении приборов была решена за счет разработки эпитаксиальных структур с разделительными изолирующими слоями GaAlAs:O.

Развитый подход к «объемной» интеграции элементов (когда оптоэлектронные и управляющие элементы располагаются в различных по глубине эпитаксиальных слоях) позволил подойти к разработке широкого спектра приборов: оптоэлектронных запоминающих устройств, оптических переключателей, матриц светодиодов. Разработанные приемный и передающий модули были дополнены затем спроектированными и изготовленными интегральными схемами уплотнения 8:1 и разуплотнения 1:8 информации для ВОЛПИ с пропускной способностью до 2 Гбит/с.

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования показали возможность создания приемных модулей на GaAs с пропускной способностью до 50 Гбит/с, где в качестве цифровых логических схем предполагалось использовать разработанные в институте схемы с емкостными связями, которые по сравнению с буферной логикой более быстродействующие, менее сложны и потребляют меньше энергии, а по сравнению с логикой с непосредственными связями, обладают большей устойчивостью к разбросу пороговых напряжений.

Наряду с прямым повышением быстродействия в системах передачи информации казалось целесообразным использовать оптические тракты и для обработки информации. С этой целью было разработано и изготовлено динамическое ЗУ, использующее оптические волокна в качестве среды для хранения информационных массивов. Сделанные оценки показали возможность разработки таких ЗУ емкостью до  $10^{12}$  бит при скорости вывода информации  $10^{10}$  бит/с [4].

Во второй половине 80-х годов уровень интеграции в ИС стал отставать от требований, предъявляемых разработчиками систем. Анализ существующей ситуации и возможных дальнейших путей развития ИС на GaAs был предпринят на примере БИС ЗУ. Было проведено математическое моделирование элементной базы ЗУ и его функционирования, разработана и изготовлена ИС ЗУ емкостью 64 Кбит, фрагмент которой показан на рис. 2. Теоретический анализ, экспериментальное изучение элементной базы, сравнение с литературными данными позволили наметить основные направления исследований, необходимые для дальнейшего совершенствования элементной базы на арсениде галлия [5—7].

В частности, было показано, что для оптимизации ЗУ по рассеиваемой мощности, быстродействию и выходу годных из нескольких десятков параметров транзисторов, используемых в расчетах, можно выделить несколько главных, определяющих не только предельные характеристики, но и направления исследований. К этим параметрам относятся: разброс пороговых нап-

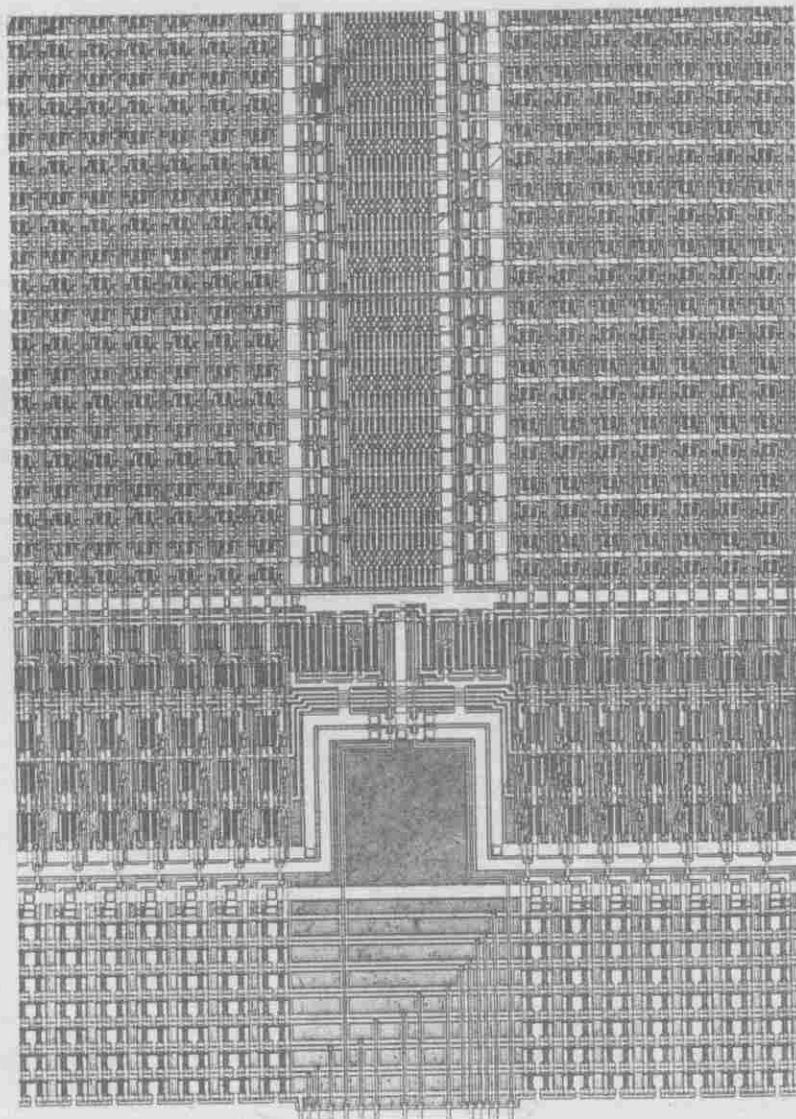


Рис. 2. Фрагмент ИС ОЗУ емкостью 64 Кбит

пряжений, сопротивление исток-сток, токи утечки, линейные размеры.

Базовый технологический процесс, определившийся к тому времени, основывался на использовании однородно легированных каналов в транзисторах, получаемых с помощью ионной имплантации. Дальнейшее развитие ИС связывалось с совершенствованием технологических процессов и качества исходных структур [8].

Результаты исследований показали целесообразность перехода от однородно- к сложнелегированным структурам, в частности  $\delta$ -легированным (с одним или несколькими  $\delta$ -слоями).

Такой слой в канале ПТШ, обеспечивая достаточно высокое значение подвижности ( $3000\text{--}3500\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  при  $300^\circ\text{К}$ ), позволяет расположить его близко к электроду затвора, увеличив тем самым собственную крутизну транзистора, а использование «решеток» из  $\delta$ -слоев позволяет резко уменьшить контактное сопротивление стока, истока и паразитных областей. Отношение значений крутизны для двух типов ПТШ составляет  $d_{\text{одн}} \mu_{\delta} / 2d_{\delta} \mu_{\text{одн}}$ , что при глубине залегания  $\delta$ -слоя  $d_{\delta} = 200\text{ \AA}$  дает для крутизны  $\delta$ -ПТШ превышение порядка трех.

Уменьшение дисперсии пороговых напряжений в таких структурах может быть достигнуто наращиванием дополнительного  $p^+$  подзатворного слоя. К этому выводу приводят результаты теоретических и экспериментальных исследований

токов утечки в барьерах Шотки [9—10].

Разработка структур новой архитектуры на основе  $\delta$ -слоев и  $p^+-n$ -переходов обеспечила возможность получить ключи с утечками  $10^{-9}$ — $10^{-10}$  А и повысить диапазон рабочих напряжений у нормально закрытых транзисторов до 1—1,2 В. Транзисторы с такими характеристиками позволяют перейти к разработке ИС ОЗУ емкостью до 1 Мбит при времени выборки 1—3 нс, причем ЗУ может быть не только статического типа, но и динамического, что было невозможно при использовании прежних структур GaAs.

Рассмотренные приборные структуры со сложным легированием естественным образом приводят к более широкому использованию логики с емкостными связями [11]. При использовании  $p^+-n$ -перехода не требуется омического контакта к  $p^+$ -слою. Контакт реализуется через емкостную связь, образуемую контактом Шотки к  $p^+$ -области. При определенных обстоятельствах такая реализация логики обеспечивает передачу постоянной составляющей сигнала, т.е. реализует все преимущества логики «с непосредственными связями». Объединение преимуществ этих двух типов логических схем приводит к тому, что схемы становятся более помехозащищенными и менее энергопотребляющими. Степень интеграции при тактовой частоте 1 ГГц может быть поднята до 100—200 тысяч вентилях на кристалл [12—14].

Логика с емкостными связями дает возможность трехмерного объединения ИС. Кристаллы упаковываются в виде этажерки, а передача информации между ними осуществляется посредством емкостной связи, когда роль обкладок конденсатора выполняют металлические площадки на обеих сторонах кристалла. Гальваническая связь между верхней и нижней сторонами осуществляется через сильнолегированные колодцы [15].

Разработанные структуры с управляющим  $p^+-n$ -переходом перспективны не только для систем обработки информации, но и для измерительных устройств, работающих в условиях повышенных температур или спец-воздействий. В частности, эффективность структуры продемонстрирована на примере разработанной и изготовленной ИС усилителя-формирователя, устойчиво работающего в диапазоне температур 80—500 К.

Уменьшение размеров активных элементов приводит к усилению паразитной роли резонансно-туннельных эффектов, что в совокупности с увеличивающимся разбросом характеристик транзисторов делает классические интегральные схемы неработоспособными при переходе в нанометровый диапазон. В этой связи встает вопрос о разработке новых принципов в подходе к созданию более производительных интегральных схем для цифровой электроники.

Один из таких подходов заключается в том, чтобы новую элементную базу разработать на основе резонансно-туннельных явлений, используя как статические, так и динамические свой-

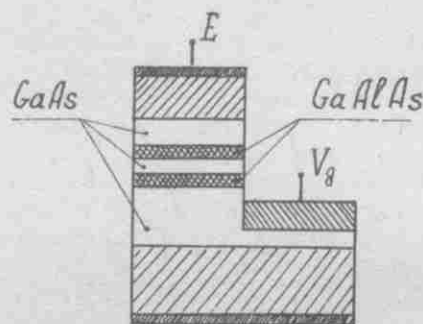


Рис. 3. Конструкция резонансно-туннельного диода с боковым управляемым электродом

ства наноструктур. В качестве исходных приборов такого класса взяты резонансно-туннельные диоды (РТД), имеющие  $N$ -образные ВАХ. Технологически РТД на GaAs хорошо сочетаются с разработанной технологией для ИС на этом материале, что само по себе расширяет функциональные возможности ИС на GaAs. С точки зрения перспективы развития ИС, такое сочетание дает возможность глубже изучить специфические свойства резонансно-туннельных приборов и построить на их основе элементную базу в нанометровом диапазоне.

Ближайшая цель заключается в разработке смешанных ИС, существенно увеличивающих производительность цифровых схем. Замечательным достоинством таких схем является вертикальная интеграция РТД как с биполярными, так и полевыми транзисторами. Более того, сам РТД выполняет функцию такой комбинации, если он имеет управляемый полевой электрод, расположенный как это показано на рис. 3. Вертикальная интегрируемость и  $N$ -образность ВАХ позволяет получить статический триггер, близкий по своим размерам к топологическому пределу обычных ИС, что существенно увеличивает степень интеграции статических ЗУ.

Структура РТД позволяет успешно использовать электрополевою связь для передачи информации близко расположенным аналогичным элементам. Это свойство оказывается весьма благотворным для применения принципов клеточной логики. Перспективной, с точки зрения функциональной полноты, представляется пара последовательно соединенных диодов — резонансно-туннельный двойной диод (РТД<sup>2</sup>). Конструкция РТД<sup>2</sup> представлена на рис. 4,а, из которого видно, что она хорошо реализует вертикальную интеграцию. Из свойств ВАХ диодов следует, что такая пара имеет три состояния равновесия, из которых два являются устойчивыми (точки А и В на рис. 4,б) и одно неустойчивое (точка С), что дает возможность РТД<sup>2</sup> хранить бит информации. Наличие электрополевою или гальванической связи между РТД<sup>2</sup> позволяет передавать информацию из одного РТД<sup>2</sup> в другой, если он находился в неустойчивом состоянии [16, 17].

Созданы математические модели двух и трехтактных многоразрядных регистров на основе РТД<sup>2</sup>. Предложена память, в которой в качестве основной ячейки используется регистр на РТД<sup>2</sup>, способный хранить код в  $10^2$ — $10^4$  бит (см.рис. 4).

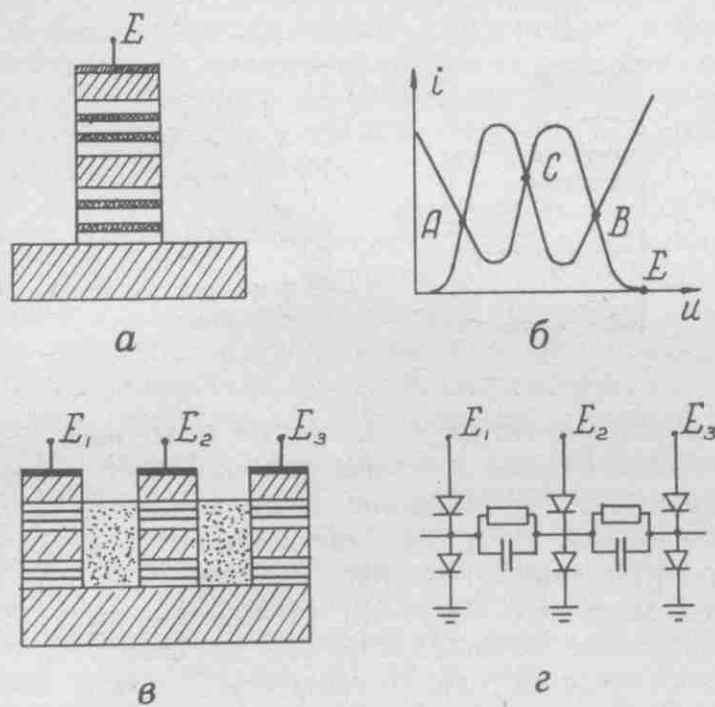


Рис. 4. Сдвиговый регистр на двойном резонансно-туннельном диоде (РИД<sup>2</sup>): а — конструкция РТД<sup>2</sup>; б — состояние равновесия РТД<sup>2</sup> на плоскости ( $U, i$ ); в — конструкция сдвигового регистра на РТД<sup>2</sup>; г — эквивалентная электрическая схема регистра

Память с такой ячейкой просто реализуется по классической схеме статических ЗУ, только из ячейки считывается не один бит, а массив данных. Такой подход к построению ЗУ дает возможность как бы сжать матрицу накопителя в столбец и тракт считывания «ячейка-шина-усилитель» организовать на качественно новом уровне за счет разработки высокочувствительного усилителя считывания. Полученные расчетным путем основные характеристики такого ЗУ представлены на рис. 5, где даны зависимости площади ИС ОЗУ и емкости памяти от времени считывания. При этом полагается, что мощность рассеивания на весь кристалл не превышает 1 Вт и минимальный размер элемента составляет 0,1 мкм. Из представленных зависимостей следует возможность создания ИС ОЗУ с объемом памяти в 1 Гбит. Одним из достоинств РТД<sup>2</sup> является то, что такая пара сохраняет свои функциональные свойства при изменении ее горизонтальных размеров. Это делает ее устойчивой к топологическим разбросам, которые могут достигать 30%. Большие допуски на топологические размеры достигаются большой однородностью слоев, образующих диоды в паре.

Для формирования слоев применяется молекулярно-лучевая эпитаксия, позволяющая изготавливать слои с точностью до атомарного слоя, что дает разброс параметров ВАХ в одной паре не более 10%. На первом этапе использования нанозадающих элементов этого вполне достаточно для организации ИС ЗУ емкостью до 1 Гбит, но при дальнейшем уменьшении топологических размеров потребуются самоорганизующиеся структуры. Самоорганизация — это фундамент, на котором должна развиваться нанoeлектроника [18].

Явления самоорганизации достаточно хорошо известны. Например, сверхструктуры на чистой

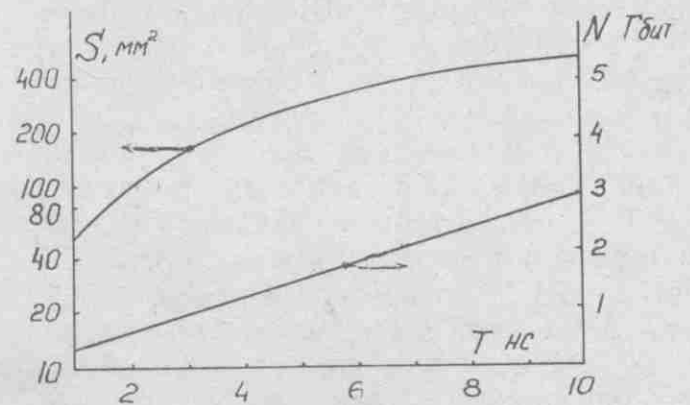


Рис. 5. Зависимость емкости  $N$  и занимаемой площади  $S$  интегральной схемы ЗУ на РТД<sup>2</sup> от времени считывания

поверхности кремния  $7 \times 7$  [111] или  $2 \times 1$  [18]. Проведенный комплекс исследований фазовых превращений в твердых растворах GaAlAs позволил установить, что в таких растворах могут возникать самопроизвольные расслоения фаз с образованием регулярных структур («сверхрешеток») с периодом модуляции (80—120) Å и ориентацией как в направлении роста [001], так и в плоскости роста [19]. На основе таких структур предложена конструкция квантового интерференционного полевого транзистора [20].

Разрабатываемые нанозадающие элементы из-за своих динамических свойств принципиально отличаются от элементов традиционных цифровых схем. Попытка строить на новой элементной базе системы обработки информации на классических принципах допустима только до некоторого предела, пока не будут использованы совершенно другие принципы обработки, хранения и передачи информации, присущие динамическим системам. Некоторые подходы в этом направлении наметились довольно ясно. Интерес представляют динамические состояния систем и их зависимость от параметров системы. Теория динамических систем показывает, что у существенно нелинейных динамических систем зависимость числа их динамических состояний от количества параметров представляет некоторую степенную зависимость. Это позволяет записывать большой объем информации в динамическую систему посредством изменения ее параметров, а считывать с помощью анализа дискретного спектра колебаний, которые возбуждаются при внешнем воздействии на систему.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Интегральное фотоприемное устройство субнаносекундных импульсов/В.А.Березкин, Л.М.Бессчастнова, Э.А.Полторацкий и др.— П. Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического совещания «Состояние и перспективы развития оптоэлектроники и ее применение в системах связи», Черкассы, 1983, с. 17.
2. Березкин В.А., Рычков Г.С. Интегральный фотоприемник.— Тезисы докладов конференции. «ВОЛС-88», М., 1988.
3. Объемная интеграция в излучающих оптоэлектронных интегральных схемах/А.А.Васенков, А.В.Емельянов, Э.А.Ильичев и др.— Электронная промышленность, 1988, вып. 6, с. 3—5.

4. А.с. № 1360452. Оптоэлектронное запоминающее устройство/Э.А.Полторацкий, Г.С.Рычков.— Приоритет от 17.2.1986 г.

5. Анализ динамических характеристик ЗУ сверхбольшой емкости при использовании ВТСП в качестве разводки/Э.А.Полторацкий, С.Е.Решетников, Г.С.Рычков, М.А.Трушникова.— Тезисы доклада I Всесоюзной конференции «Физические основы твердотельной электроники», Л., 1989, с. 112.

6. Анализ основных характеристик ИС ЗУ на арсениде галлия/Э.А.Полторацкий, С.Е.Решетников, Г.С.Рычков, М.А.Трушникова.— Отраслевая конференция «Проблемы развития полупроводниковых ИС на основе арсенида галлия», Москва, 1988.

7. Физико-технические аспекты разработки арсенид-галлиевых ССИС/А.В.Емельянов, Э.А.Ильичев, Э.А.Полторацкий и др.— Электронная промышленность, 1990, вып. 4.

8. K i r k r a t r i k S.G. Making GaAs Integrated Circuits.— Proc. IEEE, 1988, vol. 76, N 7, p. 792—815.

9. Частотная дисперсия крутизны в полевых транзисторах на основе  $\delta$ -легированных структур/В.А.Гергель, Э.А.Ильичев, Э.А.Полторацкий и др.— ФТП, 1991, т. 25, в. 11, с. 1870—1876.

10. Паразитное управление по подложке в полевых транзисторах арсенида галлия/В.А.Гергель, Э.А.Ильичев, А.И.Лукиянченко и др.— ФТП, 1992, т. 26, в. 5, с. 794—800.

11. Р е ш е т н и к о в С.Е., Р ы ч к о в Г.С. Анализ статической помехоустойчивости логических схем с емкостными связями.— Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1990, вып. 4.

12. Logical Elements on GaAs Compound-Doped Structures/E.A.Ilijchov, E.A.Poltoratskiy, A.V.Rodionov et al.— Electronic Engineering. Ser. Microelectronics. 1992. Issue (2).

13. Логические элементы на сложнелегированных струк-

турах арсенида галлия/Э.А.Ильичев, Э.А.Полторацкий, А.В.Родионов и др.— Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1992, вып. 2, с. 14—16.

14. Патент № 1806421. Полторацкий Э.А., Решетников С.Е. Рычков Г.С. Интегральная схема на основе арсенид галлия. Приоритет 24.1.1991 г.

15. Перспективы использования емкостной связи в трехмерных интегральных схемах на арсенид галлия/Н.С.Самсонов, Э.А.Полторацкий, В.Н.Инкин и др.— Электронная промышленность, 1990, вып. 3, с. 24—27.

16. Заявка № 4749052/24. Полторацкий Э.А., Понимасов В.Н., Решетников С.Е., Рычков Г.С. Регистры сдвига. Приоритет от 16.10.1989.

17. П о л т о р а ц к и й Э.А., П о н и м а с о в В.Н., Р ы ч к о в Г.С. Резонансно-туннельные приборы как элементы для создания логических схем с пикосекундным переключением. Тезисы доклада I Всесоюзной конференции «Физические основы твердотельной электроники», Л. 1989, с. 115.

18. E m e l y a n o v A.V., P o l t o r a t s k i y E.A., S a m s o n o v N.S. Some Problems of Integral Nanoelectronics. Int. Symp. «Nanostructures: physics and technology», 1993, St.-Petersburg, Russia, Abstracts of Invited Lectures and Contributed Papers, p. 134—135.

19. Спонтанная модуляция состава изолирующих гетерослоев GaAlAs/Э.А.Полторацкий, Э.А.Ильичев, Е.Н.Нагдаев и др.— В кн. тезисов I Всесоюзной конференции по физическим основам твердотельной электроники.— Л., 1989, т. 8, с. 29—30.

20. И л ь и ч е в Э.А., П о л т о р а ц к и й Э.А., С а в ч е н к о А.Н. Квантовый интерференционный транзистор. Заявка № 4364432/25, приоритет от 18.12.87, пол.реш. от 27.01.89.

## Опыт по созданию приборов с зарядовой связью

Ю.И.ТИШИН, В.А.ЗИМОГЛЯД

Создание на основе ПЗС устройств различного функционального назначения обеспечивает их перспективы использования на большом историческом пути развития. Опыт, накопленный по схемотехнике, технологии и конструкции функциональных устройств на ПЗС, используется для аппаратуры и приборов широкого назначения.

Разработки ИС на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС) и устройств с применением ПЗС проводятся в НИИФП начиная с 1971 г., с момента появления первого сообщения Бойла и Смита [1]. Менее чем за год, к началу 1972 г., в институте были изготовлены первые образцы линейных ПЗС с поверхностным каналом, и работы в области ПЗС были развернуты сразу по нескольким направлениям:

- фоточувствительные ПЗС (ФПЗС) видимого диапазона;
- ФПЗС инфракрасного (ИК) диапазона;
- ИС на ПЗС для хранения и обработки информации.

Образцы ПЗС, изготовленные в начале 70-х годов, были выполнены по технологии однослойной металлизации с зазорами между тактовыми электродами и поверхностным каналом. Это однозначно определило их неудовлетворительные основные параметры: эффективность переноса заряда, как правило, составляла 0,999—0,997, а срок эксплуатации не превышал нескольких недель. Для улучшения этих параметров были выполнены теоретические [2] и экспериментальные [3] исследования по созданию ПЗС со скрытым каналом (ПЗС СК) и отработке технологии ПЗС с поликремниевыми электродами [4]. Введение скрытого канала в ПЗС позволило на первых образцах линейных фотоприемников на 256 и 512 элементов с зазорами между тактовыми электродами получить приемлемое качество видеосигнала. С самого начала работ по ПЗС СК основные усилия были сосредоточены на получении достаточно мелкого (менее 1 мкм) канала, что обеспечивает минимальные время и температуру термообработок и максимальную

величину выходного сигнала. Полученные результаты по ПЗС СК были переданы на ряд предприятий отрасли.

Технология ПЗС с поликремниевыми электродами развивалась в институте по двум направлениям. Первое в хронологическом порядке направление предполагает использование двухслойного ( $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$ ) рабочего диэлектрика под тактовыми электродами. Наличие верхнего слоя нитрида кремния, выдерживающего многократные операции окисления и травления при формировании двух- и трехслойной разводки из поликристаллического кремния, приводит к тому, что область переноса заряда, наиболее чувствительная к различного рода загрязнениям, закрывается в самом начале технологического маршрута и не подвергается далее воздействию технологических сред. Дополнительным преимуществом такого варианта технологии является простота технологических операций при формировании поликремниевых электродов. В то же время данная технология имеет ряд существенных недостатков, ограничивающих ее применение. Один из них — высокая плотность поверхностных состояний на границе раздела  $\text{Si}-\text{SiO}_2$  (более  $10^{11} \text{ см}^{-2}$ ) в структуре с верхним слоем  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , не устраняемая отжигом в водороде из-за низкого коэффициента диффузии водорода в нитриде кремния.

Этот факт является серьезным препятствием на пути создания таких приборов на основе ПЗС с поверхностным каналом, когда требуется небольшое количество актов переноса заряда (менее  $10^3$ ) и большая величина самого заряда, а также на пути создания высококачественных ПЗС СК большого формата ( $1024 \times 1024$  и более элементов), например для телевидения высокой четкости. Другим ограничивающим фактором является нестабильность зарядового состояния МДП-структуры со слоем  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при длительном воздействии электрического поля высокой напряженности, что имеет место в ПЗС. Это может приводить к изменению оптимальной области работоспособности прибора в процессе его эксплуатации, а именно, ухудшению параметров или сокращению срока эксплуатации, а также усложняет проблему создания ПЗС со встроенными в один кристалл схемами электронного обрамления. Тем не менее, технология с двухслойным рабочим диэлектриком использовалась при разработке ряда ПЗС, описанных ниже, и позволяла достичь удовлетворительных характеристик этих приборов.

Второе направление практически полностью использует технологию динамических оперативных ЗУ (ДОЗУ) с несколькими слоями поликремния. В этом варианте область переноса заряда ПЗС неоднократно вскрывается и окисляется перед нанесением каждого слоя поликремния, что является потенциальным источником дополнительных загрязнений. В ПЗС относительная доля площади кристалла, занимаемая областями переноса, больше, чем суммарная площадь затворов транзисторов в ДОЗУ. Поэто-

му наличие загрязнений во время проведения этих операций сильнее сказывается на снижении процента выхода годных ПЗС, чем ДОЗУ. В то же время хорошая отработанность операций, входящих в маршрут ДОЗУ, предполагает их успешное использование в технологии ПЗС. Граница раздела  $\text{Si}-\text{SiO}_2$  в данном варианте изготовления имеет меньшую плотность поверхностных состояний и лучшую полевою и временную стабильность, что проверено при эксплуатации миллиардов СБИС ДОЗУ, и позволяет создавать высоконадежные ИС, содержащие как ПЗС, так и схемы на МДП-транзисторах.

**ФПЗС видимого диапазона.** Наряду с наиболее широкой областью применения ПЗС — телевизионные и бытовые видеокамеры, существуют различного рода системы технического зрения, в которых использование особенностей функционирования ПЗС позволяет существенно улучшить характеристики этих систем. Одна из задач ряда систем технического зрения — выделение некоторых важных параметров наблюдаемого изображения, например определение координат простых объектов — точки, пятна или определение направления расположения вытянутого объекта. Причем данная задача должна быть решена как можно быстрее, за время порядка 10 с, что существенно меньше времени телевизионного кадра. Процесс получения параметров объекта можно ускорить в десятки раз, если преобразовывать видеоинфляцию непосредственно в фотоприемнике. Наиболее легко осуществимой операцией в ПЗС является аналоговое суммирование, которое в матричных приемниках, снабженных выходным регистром, может производиться в последнем или в выходном усилительном устройстве. Разработанный в НИИФП ФПЗС, допускающий работу в режимах суммирования зарядовых пакетов по диагоналям и столбцам матрицы, описан в [5]. Он состоит из матрицы форматом  $256 \times 192$  элемента, расположенных с шагом 24 мкм, выходного регистра, емкость тактовых электродов которого в десять раз превосходит емкость электродов матрицы, двух выходных усилителей по обеим сторонам регистра и схем обрамления, вырабатывающих все вспомогательные импульсные и постоянные напряжения, обеспечивающие работоспособность выходных усилителей и электродов переноса заряда матрица-регистр и регистр-усилитель. Для контроля температуры кристалла в его верхней части расположен резистивный датчик температуры. С целью упрощения контроля готового кристалла в него встроен режим электронной миры, позволяющий без подачи на него оптического сигнала исследовать процесс переноса заряда по всей матрице и определять эффективность переноса заряда отдельно по регистру и по матрице. Перечисленные конструктивные особенности позволяют с высокой эффективностью использовать фотоприемник, например, для определения параметров положения объектов по методу характерных точек.



Другой пример удачного совмещения свойств фотоприемника и устройства предварительной обработки информации — матричный ПЗС, работающий в режиме временной задержки и накопления (ПЗС ВЗН), обеспечивающий высокое качество изображения при значительном рассогласовании направления вектора скорости движения изображения с направлением столбцов матрицы [6]. В обычных ПЗС ВЗН направление движения изображения должно точно совпадать с направлением столбцов матрицы. В противном случае мелкие детали изображения будут расплываться, а его контрастность снижаться. Следовательно, для обеспечения наилучшего качества приема изображения необходимо либо механически ориентировать фотоприемник, либо изменять направление переноса заряда в матрице в соответствии с вектором скорости движения изображения. Первый способ является довольно медленным. Для реализации второго способа конструкция фотоприемника должна допускать возможность сдвига всех зарядовых пакетов строки матрицы в поперечном столбцам направлении. Причем достаточно ограничиться возможностью сдвига заряда в один из соседних столбцов, что существенно упрощает конструкцию переключателя, обеспечивающего такой сдвиг. При этом может быть два варианта его реализации. Первый пропускает заряд по данному столбцу без сдвига либо сдвигает заряд в один из соседних. Второй позволяет сдвигать заряд только в один из двух столбцов, следующих за данным и сдвинутых относительно него на половину шага в поперечном столбцам направлении. Конструктивно переключатели выполнены таким образом, что их введение не приводит к увеличению периода следования столбцов матрицы.

Такая конструкция переключателей была реализована в матрице ПЗС ВЗН, состоящей из восьми секций, разделенных переключателями, имеющей основные размеры  $l_x = l_y = 12$  мкм и эффективность переноса заряда 99,99%. Теоретические расчеты основной компоненты частотно-контрастной характеристики матрицы (ЧКХ) в зависимости от угла рассогласования ( $A$ ) между направлением движения изображения и направлением столбцов матрицы показали, что без использования переключателей ЧКХ падает на порядок при  $A > 1,5^\circ$ , а при оптимальной траектории движения заряда для каждого конкретного значения  $A$ , получаемой за счет включения нужных переключателей, ЧКХ падает не более, чем в два раза, вплоть до  $A = 10^\circ$ . Сравнение теоретических и экспериментальных результатов, полученных на разработанной матрице, показывает их достаточно хорошее совпадение (максимальное различие не превышает 20%). Такие матрицы могут широко использоваться в автоматизированных измерительных системах с электронной адаптацией к параметрам движущегося изображения.

Одна из основных трудностей, возникающих

при применении ПЗС, — большое количество подстроек уровней сигналов, подаваемых на прибор (обычно не менее пяти), а также значительное число самих импульсных сигналов. Все это затрудняет настройку устройств с применением ПЗС, особенно при массовом производстве. Обычно данную проблему стараются решить за счет использования специализированных ИС тактового генератора и формирователя импульсных сигналов ПЗС. Однако такие ИС рассчитаны на телевизионный режим работы ПЗС, а их применение в других режимах под силу только высококвалифицированному специалисту в области ПЗС. Для того, чтобы частично устранить это противоречие, разрабатываемые в НИИФП кристаллы ПЗС имеют встроенные схемы электронного обрамления, формирующие либо часть импульсных и постоянных сигналов, необходимых для обеспечения работы ПЗС, либо все эти сигналы.

Все кристаллы, как линейные, так и матричные, имеют двухкаскадный выходной усилитель со схемой выборки и хранения, формирующий огибающую выходного сигнала ПЗС, схемы формирования из регистровых импульсов сигналов установки и выборки для выходного усилителя и схемы формирования постоянных уровней сигналов на вспомогательных электродах ПЗС — электродах переноса заряда из матрицы в регистр, из регистра в усилитель, из входного диода в регистр. Наличие этих схем дает возможность подавать на ПЗС только матричные и регистровые импульсы и два постоянных напряжения — на усилитель и подложку. Кардинальным решением данной проблемы является включение в состав кристалла ПЗС всех схем электронного обрамления, обеспечивающих его работоспособность. Однако разработка таких схем должна вестись с учетом рассеиваемой кристаллом мощности, поскольку перегрев ПЗС приводит к существенному ухудшению его характеристик. С учетом этого условия наиболее привлекательны для интеграции со схемами обрамления линейные ПЗС.

Разработанные ИС линейного фотоприемника на 2048 и 2716 элементов на основе ПЗС подробно описаны в одной из работ, включенных в настоящий сборник. Для обеспечения работоспособности этих схем требуется подача на них двух (+12 В, -3 В) или трех (+5 В, +12 В, -3 В) постоянных напряжений и одного синхросигнала с ТТЛ уровнем, определяющим частоту импульсов переноса заряда и время экспозиции. Дополнительно время экспозиции может меняться подачей импульса напряжения на затвор антиблуминга, что позволяет отказаться от использования затвора и диафрагмы в объективе. ИС обладают стандартными допусками по положительным напряжениям ( $\pm 10\%$ ), а по отрицательному работают в диапазоне от 0 до -5 В. Подстройка этих напряжений может потребоваться только для выбора оптимальных режимов работы во всем диапазоне условий эксплуата-

ции. Таким образом, данные схемы по простоте обращения практически не отличаются от цифровых схем.

Матричные ПЗС, разработанные в институте, имеют как кадровую организацию [5], так и строчно-кадровую [7]. Причем все варианты первой схемы были разработаны для применения в малокадровых цифровых системах, вторая схема может быть также использована и в телевизионных видеокамерах. Ее фоточувствительные элементы выполнены в виде диодных структур либо полностью обедненных  $n$ -областей, что увеличивает фоточувствительность приемника, особенно в коротковолновой области. Закрытые алюминием вертикальные и горизонтальный регистры обеспечивают отсутствие смаза изображения при его выносе из матрицы. Высокочувствительный выходной усилитель с большим коэффициентом передачи по напряжению (0,8—0,85) обеспечивает сигнал насыщения 1 В и динамический диапазон более 60 дБ, что позволяет использовать данный фотоприемник в измерительных цифровых системах.

Поскольку введение в кристалл матричного ПЗС всех схем электронного обрамления может ухудшить его характеристики, были разработаны два кристалла, один из которых формирует импульсные сигналы управления ПЗС, а второй — телевизионные синхросигналы [8]. Первый кристалл обеспечивает работу строчно-кадровых матриц в режимах непрерывной генерации и малокадровом. Применение обоих кристаллов дает возможность создавать видеокамеры с использованием кадровых и строчно-кадровых матриц с выдачей ТВ-синхросигналов.

Разработанные ИС ФПЗС нашли применение в ряде измерительных устройств, созданных в институте. На основе матричного ПЗС формата  $256 \times 192$  был изготовлен измеритель линейных размеров на фотошаблонах и полупроводниковых пластинах с субмикронным разрешением [9]. Обычно в таких измерителях используются линейные ПЗС. Применение специализированного матричного ПЗС, предназначенного для работы в режиме суммирования зарядов, позволяет на два порядка снизить освещенность объекта измерения и за счет увеличения динамического диапазона повысить точность измерения. Снижение освещенности, достигаемое за счет применения режима суммирования, позволяет отказаться от мощных источников света и использовать для освещения светодиоды с необходимой длиной волны в импульсном режиме. Импульсное освещение с длиной волны не более 0,7 мкм упрощает систему освещения микроскопа и исключает смаз изображения в матрице при его считывании. Такие видеокамеры легко стыкуются с имеющимися микроскопами как отечественного, так и импортного производства, и при небольшой их доработке обеспечивают полностью автоматизированный режим измерения.

Эта же матрица послужила основой для уст-

ройства считывания рисунка капиллярных линий непосредственно с пальца человека. В этом устройстве, как и в измерителе размеров, подсветка пальца осуществляется импульсными светодиодами, что позволяет получать высококонтрастное изображение без смазов и перекрестных наводок. Получаемые с его помощью изображения хорошо стыкуются с имеющимся программным обеспечением распознавания отпечатков пальцев.

Линейный ПЗС на 2716 фоточувствительных элементов использован для создания считывателя штриховых кодов (СШК), широко применяемого за рубежом при идентификации товаров и грузов [10]. Эта сфера применения ПЗС очень перспективна, поскольку другие типы СШК — карандашные и лазерные, обладают существенными недостатками и поэтому имеют ограниченную область использования. Разработанный линейный ПЗС со схемами обрамления дает возможность сократить количество интегральных схем, применяемых в считывателе, снизив тем самым габариты и энергопотребление считывателя, и существенно упростить его настройку. Представляется реальным ввести на кристалл фотоприемника и ряд других схем обработки видеосигнала, что еще больше упростит и удешевит считыватель.

**ФПЗС инфракрасного диапазона.** Работы по созданию ИК ПЗС начались в НИИФП в 1974 г. Особенностью этих работ являлось то, что разрабатывались почти исключительно монокристаллические кремниевые ПЗС с примесной чувствительностью, как наиболее технологичные. Из этих же соображений в качестве примесей, ответственных за фоточувствительность, избраны элементы III группы (Tl, In, Ga). Длинноволновая граница фоточувствительности определяется энергетическим уровнем примеси и составляет, соответственно, 5, 8 и 18 мкм.

Эти разработки являются, по-видимому, единственным исключением среди прочих сугубо эмпирических подходов к проблеме примесных фотоприемников, в которых теория нестационарных процессов применялась лишь для вскрытия причин возникающих трудностей и борьбы с ними. В нашем же случае результаты теории положены в основу проектирования приборов, что не только позволило избежать упомянутых трудностей, но и сделало возможным упрощение конструкций ИК ПЗС даже по сравнению с обычными ПЗС с собственной фоточувствительностью.

В таблице приведены параметры некоторых из разработанных приборов. Первыми были ИК ПЗС с индием с небольшой степенью интеграции. Конструкция фоточувствительной ячейки в них такова, что их отличает высокое быстродействие: принципиальное ограничение для чувствительных элементов связано с временем жизни основных носителей заряда, очень малым в компенсированном кремнии.

Основные параметры монокристаллических ИК ПЗС

Год разработки	1976	1976	1977	1979	1980	1982	1985	1985
Примесь	In	Барьер Шотки Si—Au	In	Tl	In	Tl	Tl	Ga
Спектральный диапазон, мкм	2,5—5,0	1,5—3,0	2,0—5,0	2,0 4,7	2,0—7,0	2,0—4,7	2,0—4,7	2,5—18,0
Число фоточувствительных элементов	1×32	1×32	64×64	64×64	256×320	768×256	128×128	1×128
Шаг следования ячеек, мкм	60×60	40×250	60×60	60×60	20×20	30×30	45×45	60×100
Коэффициент заполнения ячейки фоточувствительным элементом, мкм	—	—	34	34	100	60	60	—
Порог чувствительности, мкВт/см <sup>2</sup>	5	4,5	0,4 (BLIP)	100	0,3 (BLIP)	0,4	0,09 (BLIP)	1
Время накопления, мс	30	40	40	40	40	40	40	1
Фоновая облученность	T=300K FOV90°	T=300K FOV90°	T=300K FOV90°	—	T=300K FOV90°	3·10 <sup>-6</sup> Вт/см <sup>2</sup>	T=300K FOV90°	—
Рабочая температура, К	30—50	77	45	77	30—50	86	83	22

До 1976 г. разрабатывались и ИК ПЗС на барьерах Шотки. Однако в связи с тем, что на существовавшем технологическом уровне параметры примесных ИК ПЗС оказались лучше по всем статьям (спектральная характеристика, коэффициент заполнения ячейки фоточувствительным элементом, квантовая эффективность и даже рабочая температура), работы над ПЗС с барьерами Шотки далее не велись.

Понимание особенностей нестационарных процессов в примесных фотопроводниках использовано при создании матричных ИК ПЗС большого формата на кремнии с таллием, которое оказалось возможным за счет более простой и совершенной конструкции ячейки. Следует отметить, что технология того времени не позволяла делать обычные ПЗС такой степени интеграции, а тем более интегральные схемы с такой площадью кристалла (около 2 см<sup>2</sup>). В кристалле все контактные площадки расположены вдоль одной короткой стороны, что дает возможность собирать «сверхматрицу» с количеством элементов 1532×неограниченное число. Рабочая температура ИК ПЗС с таллием заметно превышает температуру жидкого азота.

Из таблицы видно, что ряд ПЗС имеет порог чувствительности, ограниченный фоном. Межэлементные связи в матрицах не наблюдались.

Во время разработки ИК ПЗС выполнены некоторые пионерские эксперименты по проверке теории нестационарных процессов в высокоомных полупроводниках, методики и результаты которых пока не опубликованы. Созданы оригинальные методы определения параметров фо-

топриемников, например способ физического моделирования облученности от объекта и фона и соответствующее устройство с инжекционным излучателем, реализуемое непосредственно в дьюаре и позволяющее изменять облученность на длине волны 3 мкм на 4 порядка за время не более 10 мкс, начиная с исключительно малой фоновой облученности.

**ПЗС для хранения и обработки информации.**

На начальном этапе развития ПЗС считалось, что они заменят не только вакуумные фотоприемные трубки, но и динамические оперативные запоминающие устройства на МОП-транзисторах. Однако довольно быстро выяснилось, что присущие ПЗС особенности — последовательный режим вывода информации и высокая чувствительность к дефектам кристаллической структуры подложки и качеству проведения технологических процессов, не позволяют создавать дешевые универсальные кристаллы оперативной памяти.

Другой тип кристаллов памяти, которые могут быть созданы на основе ПЗС, — постоянные запоминающие устройства с электрической и электрооптической перезаписью информации. В 1973—1982 гг. нами был предложен ряд конструкций запоминающих элементов таких устройств и накопителей на их основе для построения полупостоянных ЗУ большой емкости с последовательным считыванием информации по принципу ПЗС [11—17]. В качестве запоминающего элемента в этих ЗУ использовалась либо МНОП- [11—15], либо МОП- [16, 17] структура с пла-

вающим электродом. На основе МНОП-элементов было разработано ЗУ последовательно-параллельно-последовательного типа емкостью 128 Кбит. Высокая плотность записи информации в данном ЗУ, близкая к предельной для использованного уровня технологии, достигалась за счет расположения в каждой ячейке ПЗС шестнадцати МНОП-конденсаторов. Основная трудность, возникшая на пути развития этого направления, состояла в сложности сочетания в одном технологическом маршруте операций изготовления МНОП-структур и ПЗС. В результате процент выхода годных МНОП ПЗС ЗУ в экспериментальных партиях был низок и производство оказывалось нерентабельным.

Технология МОП-структур с плавающими электродами близка к технологии ПЗС, и поэтому был проведен цикл исследований по созданию электрически репрограммируемых ПЗС ЗУ с плавающими электродами [16, 17]. В результате этих работ были созданы и исследованы прототипы таких ЗУ. Основные их достоинства — высокая надежность хранения информации и монополярный режим ее перезаписи. Недостатки — несколько больший по сравнению с МНОП ПЗС ЗУ размер ячейки и меньшее количество циклов перезаписи.

Однако главная причина, по которой ПЗС ЗУ не получили своего развития — быстрый прогресс классических вариантов ЗУ на МОП-транзисторах, которые быстро догнали первые по емкости и значительно их превосходят по ряду параметров.

Более плодотворным оказалось применение ПЗС для задержки аналоговых сигналов. Предпосылками к этому служат большой динамический диапазон аналогового сигнала, передаваемого по ПЗС, малые потери информации при ее переносе по ПЗС в виде заряда, простота регулировки времени передачи сигнала от входа к выходу. В то же время в процессе передачи аналогового сигнала по ПЗС его параметры изменяются в результате преобразования напряжения в заряд на входе ПЗС и обратного преобразования на выходе, из-за наличия темновых токов меняется величина и шум сигнала, неэффективность переноса вызывает увеличение времени задержки и искажение амплитуды сигнала. В отличие от ФПЗС, которые, как правило, работают при температуре кристалла не выше 25—30°C, ПЗС ЛЗ должны функционировать в тех же условиях, что и другие ИС, входящие в состав электронной аппаратуры, например телевизора. Следовательно, они должны сохранять свои параметры при нагреве до 80°C. Для применений в малогабаритной аппаратуре требуется также, чтобы напряжение питания не превышало +5 В, что трудновыполнимо в ПЗС. Все эти проблемы были решены при разработке ПЗС ЛЗ для многосистемного блока цветности карманного телевизора [18]. В состав кристалла ПЗС ЛЗ входят две линии задержки со всеми схемами электронного обрамления, обеспечивающими не только перенос заряда по каналу ПЗС,

но также и передачу от входа до выхода постоянной составляющей сигнала и поддержание коэффициента передачи переменного сигнала на уровне единицы. При напряжении питания +5 В потребляемая ИС мощность не превышает 50 мВт. Данная ИС может служить основой для разработки однокристалльного блока цветности.

Еще одна перспективная область применения ПЗС — тестирование кремниевой МДП-технологии. Это является следствием высокой чувствительности ПЗС к различного рода дефектам кристаллической структуры полупроводника и границы раздела полупроводник—диэлектрик. При этом контролируемые параметрами являются: величина термотока неосновных носителей с учетом ее зависимости от температуры, напряжения на полевом электроде, рельефа границы раздела полупроводник—диэлектрик; величина тока или заряда неосновных носителей, обусловленная аномальной генерацией в результате локального пробоя полупроводника, ее температурная и полевая зависимость, локализация места пробоя; величина плотности поверхностных либо объемных состояний в зависимости от типа ПЗС. Полученные численные значения параметров служат исходными данными для расчета процента выхода годных ИС, изготавливаемых по данному технологическому маршруту.

Тестовые ПЗС структуры использовались для контроля технологии динамических оперативных ЗУ. Методика расчета по параметрам ПЗС вероятности появления негодных кристаллов ДОЗУ приведена в работе [19].

Подводя итог выполненным в институте работам в области ПЗС, можно отметить, что все они проводились и проводятся на уровне, соответствующем лучшим мировым разработкам на момент их выполнения, а накопленный в институте опыт позволяет проводить разработки однокристалльных систем на ПЗС для различных областей науки и техники.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Boyle W.S., Smith G.E. Charge coupled semiconductor devices. — Bell Syst. Tech. J., 1970, vol. 49, p. 587—593.
2. Гергель В.А. Перенос заряда в ПЗС на структурах со скрытым каналом. — Микроэлектроника, 1973, т. 2, № 5, с. 415—420.
3. Линейные фотоэлектрические преобразователи изображения на основе ПЗС со скрытым каналом/П.Е.Кандыба, В.М.Красовский, В.В.Поспелов и др. — Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1976, вып. 2, с. 26—30.
4. ПЗС. Состояние и перспективы развития./П.Е.Кандыба и др. — В кн.: «Микроэлектроника». М.: Сов. радио, 1974, № 7, с. 55—79.
5. Функциональные фотоприемники на приборах с зарядовой связью/В.В.Ракитин, А.Г.Сафонов, Б.И.Седунов, Ю.И.Тишин. — М.: Радио и связь, 1989, вып. 10, с. 41—52.
6. Тишин Ю.И., Сафонов А.Г. Формирователь видеосигнала на ПЗС с адаптацией к изображению для автоматизированных измерительных систем. — Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1990, вып. 4, с. 3—6.
7. Тишин Ю.И., Лепендин А.В., Глухов Ю.Ф. Строчно-кадровый ФПЗС формата 512×512 элементов. — IV конф. «Приборы с зарядовой связью и системы на их основе», Геленджик. Тезисы докладов, окт. 1992, с. 29.

8. Лепендин А.В., Тишин Ю.И. Интегральный п-канальный генератор текстовых импульсов для ФПЗС.— Электронная промышленность, 1993, вып. 6—7, с. 54—55.

9. Коккин С.А., Тишин Ю.И. Установка для измерения линейных размеров с датчиком на ПЗС.— Всесоюз. научно-техн. конф. «Метрологические проблемы микроэлектроники», Менделеево, Моск. обл. Тезисы докладов, июнь 1991, с. 44—45.

10. Автоматическое считывание с помощью ФПЗС и идентификация штриховой маркировки транспортных грузов/В.А.Автономов, Е.М.Тишкин, Ю.И.Тишин, В.А.Шилин.— IV конф. «Приборы с зарядовой связью и системы на их основе», Геленджик. Тезисы докладов, окт. 1992, с. 118.

11. Мас'алов В.В., Поспелов В.В., Тишин Ю.И. Фотоэлектрическое считывание и запись в МДП-структурах.— Материалы всесоюзной конф. «Физика диэлектриков и перспективы ее развития», Л., 1973, т. 2, с. 176—177.

12. Поспелов В.В., Тишин Ю.И. Накопительная среда для оптоэлектрических ЗУ на основе МДП-структуры.— Тезисы докл. симпозиума «Оптоэлектронные системы записи и обработки информации», М., 1975, с. 27.

13. Поспелов В.В., Тишин Ю.И. Фоточувствительная матрица с памятью.— Тезисы докл. и рекомендации

научно-техн. конференций, совещаний и семинаров по электронной технике. Сер. 10. Квантовая электроника, 1975, вып. 1, с. 148—149.

14. Работы по созданию оптоэлектронного ЗУ на основе МНОП структуры/Б.С.Борисов, В.В.Поспелов, В.Н.Рябокоть и др.— Микроэлектроника, 1976, № 6, с. 489—494.

15. Накопитель ЗУ на МНОП ПЗС последовательно-параллельного типа/В.И.Золотарев, А.А.Лавренов, В.В.Ракитин и др.— Тезисы докл. и рекомендации научно-техн. конференций. Сер. 2. Полупроводниковые приборы, 1979, вып. 2(128), с. 19—20.

16. Ракитин В.В., Сафонов А.Г., Тишин Ю.И. Матричный фотоприемник с памятью на ПЗС.— Электронная промышленность, 1983, № 8, с. 81—83.

17. Характеристика электрически запрограммируемых МДП-элементов памяти с плавающими электродами/С.Н.Беляев, В.А.Колясников, В.В.Ракитин и др.— Микроэлектроника, 1982, т. 11, вып. 2, с. 152—157.

18. Кузьмин С.В., Тишин Ю.И. Линия задержки на ПЗС для цветного телевизора.— Электронная промышленность, 1993, № 6—7, с. 27—28.

19. Тишин Ю.И. Тестовые структуры на основе приборов с зарядовой связью.— Микроэлектроника, 1991, т. 20, вып. 5, с. 440—445.

## Линейные фотоприемники на ПЗС с большим числом элементов разложения

А.Г.САФОНОВ, Ю.И.ТИШИН, А.В.ЛЕПЕНДИН, Ю.Ф.ГЛУХОВ

Одной из наиболее трудно решаемых проблем при использовании отечественных фотоприемников на ПЗС является изготовление потребителями схем управления и синхронизации. Необходимость формировать большое число управляющих импульсов с параметрами, требующими регулировки в широком диапазоне, приводит к увеличению габаритов аппаратуры и усложняет наладку устройств, удорожает процесс изготовления и эксплуатации.

В НИИФП предпринята попытка решить упомянутые проблемы и дать потребителю микросхему, работающую в режиме, близком к режиму работы цифровых микросхем: стандартное напряжение питания без регулировок, со стандартными допусками на отклонение от номинала, один управляющий сигнал на входе, один информационный сигнал на выходе. При работе в основном режиме потребитель не должен выполнять никаких специфических требований, может не знать принципы работы ПЗС, может использовать микросхему фотоприемника так же, как он привык использовать микросхемы памяти или операционные усилители. Для решения этой задачи все схемы управления ПЗС и выходным усилителем размещены на том же кристалле, что и фотоприемные элементы. Современный уровень технологии вполне позволяет это сделать. В то же время микросхема может использоваться и в режимах, отличных от основного. В этом случае для потребителя открываются дополнительные возможности, но требуется подача дополнительных внешних импульсов и регулируемых напряжений.

Основной областью применения описываемых микросхем являются электронные сканеры для считывания

штриховых кодов. Исходя из специфических требований, предъявляемым к таким сканерам, выбраны параметры и конструкция фоточувствительных ячеек, число элементов разложения. Микросхемы могут также использоваться в традиционных для линейных многоэлементных фотоприемников областях: оптических системах высокого разрешения, системах считывания документации, бесконтактных измерительных устройствах, системах специального назначения. При конструировании обеих микросхем был использован общий схемотехнический подход и общая библиотека элементов, они имеют одинаковое расположение и назначение выводов корпуса. Однако в целом конструкции микросхем существенно отличаются.

В микросхеме БЛ-2716 чувствительными элементами фотоприемника являются фотодиоды, расположенные в два ряда с расстоянием между центрами рядов 33 мкм. Расстояние между центрами фотодиодов в ряду составляет 12 мкм. Центры фотодиодов в рядах сдвинуты относительно друг друга на 6 мкм, что увеличивает эквивалентную разрешающую способность фотоприемника до 8 мкм. Ширина фотодиодов 25 мкм. Количество фотодиодов в каждом ряду — 1358, общая длина фоточувствительной секции — 16,3 мм. Между рядами фотодиодов располагается сток антиблуминга, отделенный от фотодиодов затворами. Фотография регулярной части микросхемы на рис. 1, а дает представление о геометрии и взаимном расположении фоточувствительных элементов. На кристалле расположены также два регистра переноса заряда на ПЗС со скрытым каналом, выходной усилитель со схемой выборки-хранения, схемы формирова-

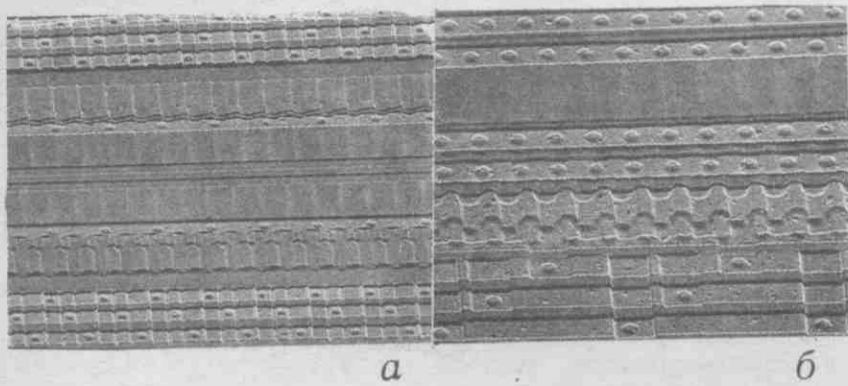


Рис. 1. Фотография регулярной части микросхем БЛ-2716 (а) и Л-2048 (б)

ния временной диаграммы, формирователи импульсов управления выходным устройством и импульсов управления регистрами ПЗС, устройства формирования постоянного смещения затворов антиблуминга и выходного устройства.

Свет, воздействующий на фотодиоды, вызывает в каждом из них накопление заряда, пропорционального времени воздействия и интенсивности света. Если количество накопленного заряда превышает уровень насыщения фотодиодов, избыточный заряд поглощается стоком антиблуминга и эффект пересветки в широком диапазоне освещенностей не возникает. В конце каждого периода интегрирования заряды из фотодиодов перетекают под воздействием импульса  $\Phi_{\text{КАДР}}$  в регистры переноса и начинается считывание информации выходным усилителем. Заряды перетекают из обеих линеек фотодиодов в соответствующий регистр одновременно, после чего начинается новый период интегрирования. Длительность периода интегрирования в номинальном режиме составляет не менее 2716 периодов видеосигнала, однако может быть уменьшена подачей импульса  $\Phi_{\text{ГАВ}}$  на затвор устройства антиблуминга в соответствующий момент времени.

Работа выходного устройства синхронизована таким образом, что зарядовые пакеты считываются из регистров переноса поочередно. На выходе видеосигнал имеет форму огибающей с "вложенными" друг в друга сигналами двух рядов фотодиодов, т.е. сигналы с каждого ряда появляются на выходе поочередно. Выходной усилитель рассчитан на работу с нагрузкой не менее 3–5 кОм и емкостью не более 12 пФ.

Схема для своей работы требует синхросигнала амплитудой 5 В, частота которого должна быть в три раза выше частоты видеосигнала, а скважность  $2 < Q < 5$ . Синхронно или несинхронно с синхросигналом нужно подавать такой же амплитуды кадровый импульс, длительность которого должна быть не меньше 6-ти периодов синхросигнала, а от конца заднего фронта до начала переднего фронта следующего импульса должно пройти не менее 2716 периодов выходного видеосигнала. Для удобства пользователей на выходе  $Q_{\text{SH}}$  имеется сигнал, совпадающий по фазе с сигналом выборки выходного усилителя, амплитудой 12 В. Он может быть использован, например, для стробирования АЦП.

Временная диаграмма внешних управляющих импульсов для работы микросхемы в основном режиме приведена на рис.2, а. В этом режиме пользователь должен подать на выводы микросхемы напряжения в соответствии с таблицей и сформировать кадровый

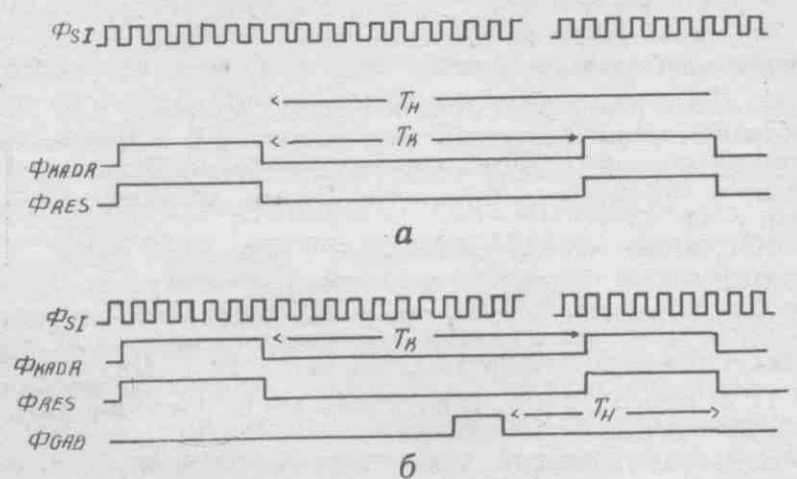


Рис. 2. Временные диаграммы управляющих импульсов в основном режиме работы микросхемы БЛ-2716 (а) и в режиме работы с укороченной экспозицией (б)

импульс, который подается на выводы  $\Phi_{\text{КАДР}}$  и  $\Phi_{\text{RES}}$ . В основном режиме работы схемы время накопления  $T_{\text{H}}$  (экспозиции) почти равно времени считывания кадра  $T_{\text{K}}$  и определяется выражением

$$T_{\text{H}} = 3N/F + t_{\text{КАДР}}$$

где  $N$  — число периодов видеосигнала между кадровыми импульсами;  $F$  — входная синхрочастота;  $t_{\text{КАДР}}$  — длительность кадрового импульса. В основном режиме  $N$  не может быть меньше числа светочувствительных элементов, т.е. меньше значения 2716. Время накопления может быть увеличено, если взять  $N > 2716$ . В этом случае часть видеоимпульсов не будет содержать информации. Время экспозиции может регулироваться также изменением входной синхрочастоты.

#### Назначение выводов и параметры питания микросхем в основном режиме работы

Номер вывода	Обозначение	Наименование вывода	Режим, В
4	V <sub>B</sub>	Подложка	—0,5
11	$\Phi_{\text{ГАВ}}$	Затвор антиблуминга	—
16	$\Phi_{\text{КАДР}}$	Кадровый импульс	+5,0
17	$\Phi_{\text{RES}}$	Установка в «0»	+5,0
17*		Питание логики	+5,0
18	$\Phi_{\text{SI}}$	Синхроимпульс	+5,0
19	$\Phi_{\text{S/H}}$	Выход импульсной выборки	—
21	E	Питание	+12,0
22	GND	Общий	0
23	OUT	Выход	—

\* Для микросхемы Л-2048.

Режим укороченной экспозиции используется при наличии высокоинтенсивного источника излучения в том случае, если время накопления приходится делать меньше времени вывода кадра ( $T_n < T_k$ ). Временная диаграмма управляющих импульсов для этого режима приведена на рис. 2, б. На затвор антиблуминга подается дополнительный импульс амплитудой 12 В. Время экспозиции в этом случае равно временному интервалу между задним фронтом импульса  $\Phi_{KADR}$  и задним фронтом импульса  $\Phi_{GAB}$ . Заряд, накопленный в фоточувствительных элементах до прихода этого импульса, будет поглощен диодом антиблуминга. Ограничение, накладываемое выражением (Ж) на интервал между двумя импульсами  $\Phi_{KADR}$ , сохраняется и в этом режиме.

Фотоприемник может использоваться и с импульсными источниками освещения, а также в режиме вычитания фона. В этих случаях его временная диаграмма также может быть оптимизирована соответствующим образом.

Отличительной особенностью микросхемы Л-2048 является конструкция регистра переноса ПЗС, в котором заряд перемещается по зигзагообразной траектории. Последнее обстоятельство позволило при четырехтактном управлении регистром сделать шаг фоточувствительных элементов равным 10 мкм, причем фотодиоды расположены в одну линию, с одной стороны которой находится регистр переноса заряда, а с другой — сток антиблуминга. Число фоточувствительных элементов — 2048, ширина 25 мкм, длина фоточувствительной секции — 20,5 мм. Фотография фрагмента микросхемы с фоточувствительными элементами приведена на рис. 1, б. Состав и работа микросхемы аналогичны БЛ-2716. Схема имеет раздельное питание для логических схем и формирователей импульсов. Использо-

вание источника питания +5 В для логической части схемы позволяет снизить потребляемую мощность. Другой отличительной особенностью схемы является встроенный счетчик на 2048, формирующий кадровый импульс. Если потребителя устраивает соотношение между периодом кадров и тактовой частотой, задаваемое выражением (Ж), он может использовать для управления микросхемой единственный входной синхросигнал.

Функциональные характеристики микросхем приведены ниже. Необходимо отметить, что мощность, потребляемая схемами, квадратично растет с ростом тактовой частоты. Максимальная частота выходного видеосигнала составляет 3 МГц и ограничена работоспособностью встроенных схем управления. Схемы собраны в корпус, имеющий 24 вывода, с точным позиционированием кристалла.

Динамический диапазон	1000:1
Спектральный диапазон, мкм	0,4—1,1
Чувствительность, мкДж/см <sup>2</sup>	1,0
Неоднородность фоточувствительности, %	3
Напряжение насыщения, В	0,4
Средний темновой сигнал*, мВ	3
Неоднородность темн. сигнала*, мВ	1,5
Макс. частота видеосигнала, МГц	3,0
Потребляемая мощность на максимальной частоте, мВт	350

Линейные фоточувствительные микросхемы БЛ-2716 и Л-2048 представляют собой функционально законченные изделия для применения в различных фотоприемных устройствах. Наличие встроенных схем обрамления позволяет свести к минимуму затраты на проектирование и наладку устройств на их основе. Однако дополнительный разогрев кристалла, вызываемый работой схем обрамления, накладывает ограничения на повышение рабочей частоты фотоприемников.

## Высокостабильные интегральные ПТ-сквиды: конструкция, характеристики, области применения

В.В.МАСАЛОВ, А.А.ЗУБКОВ, А.Н.САМУСЬ, А.Л.ГУДКОВ

Тонкопленочная интегральная технология джозефсоновских структур позволила создать высокостабильные ПТ-сквиды, исследовать их потенциальные свойства и оценить перспективность их применения в новых областях диагностики и многофункциональных измерительных приборах.

В последнее время широкое распространение в области сверхпроводниковой электроники получили приборы на основе сквидов [1, 2]. Основным потребителем является направление биомагнитных исследований [3], особенно магнитокартирование головного мозга человека [4] с целью создания принципиально новых методов

диагностики и исследований процессов высшей нервной деятельности. По прогнозам ведущих зарубежных специалистов область биомagnetизма будет продолжать интенсивно развиваться с возрастающим потреблением сквидов [5]. Не менее интенсивное развитие рынка сбыта сквидов прогнозируется и в других областях, таких как микроэлектроника, прецизионное приборостроение, фундаментальные физические исследования и др.

В основе такого бурного развития лежит пересмотр взглядов на конструкцию самого чувствительного элемента — отказ от использования радиочастотных объемных сквидов с точечными джозефсоновскими контактами и ориентация ве-

душих разработчиков сквидов на планарную тонкопленочную конструкцию с использованием в качестве чувствительного элемента сквида постоянного тока (ПТ-сквида). Такой подход позволил в  $10^2$ — $10^3$  раз улучшить шумовые характеристики приборов на основе ПТ-сквидов с одновременным достижением высокой надежности и воспроизводимости основных электрических параметров, что обеспечило переход к разработке и созданию многоканальных криосистем [6].

Основными поставщиками ПТ-сквидов являются такие ведущие фирмы США как IBM, NBS, Sperry, Conductus; стоимость кристалла лежит в диапазоне от 500 до нескольких тысяч долларов в зависимости от конструкции и характеристик. Ведущими производителями измерительных систем на основе сквидов являются фирмы ВТ (США) и СТФ (Канада).

Переход к промышленному выпуску сквидов потребовал повышения их надежности и заставил отказаться от легкоплавких сверхпроводниковых материалов (сплавы на основе свинца) в пользу тугоплавких (в основном ниобий и его соединения). В НИИФП была разработана технология изготовления сверхпроводниковых интегральных схем (СПИС) на основе ПТ-сквидов с использованием только тугоплавких материалов и джозефсоновских переходов с непосредственной проводимостью. В конструкциях ПТ-сквидов использовались два типа джозефсоновских переходов: торцевой джозефсоновский переход Nb/a-Si/Nb [7] и планарный джозефсоновский переход Nb/YO<sub>x</sub>/Nb [8], что позволило перекрыть широкий диапазон возможных применений.

**Конструкция СПИС на основе ПТ-сквидов.** Требования к конструкции СПИС и ее чувствительному элементу — ПТ-сквиду — вытекают из конкретных практических задач. Тем не менее, для большинства применений можно выделить основные требования и на их основе разработать наиболее приемлемые конструкции СПИС.

Для достижения оптимальных параметров ПТ-сквидов необходимо выполнить следующие самосогласованные физические условия:

— безразмерная индуктивность сквида  $l \approx 1$  [9],

$$l = 2L_0 I_c / \Phi_0,$$

где  $L_0$  — геометрическая индуктивность сквида;  $2I_c$  — критический ток сквида;  $\Phi_0 = 2,07 \cdot 10^{-15}$  Вб — квант магнитного потока;

— глубина модуляции критического тока сквида не менее 50%, что выполнимо при  $l \leq 1$ ;

— симметричность плеч сквида  $I_{c1} L_1 = I_{c2} L_2$  ( $I_{c1} + I_{c2} = 2I_c$ ,  $L_1 + L_2 = L_0$ ), обеспечивающая инвариантность положения рабочей точки по отношению к рабочей температуре и току смещения;

— безгистерезисная вольт-амперная характеристика (ВАХ) джозефсоновских переходов (параметр Стюарта—Маккамбера)  $\beta_c < 1$  [10],

$$\beta_c = 2\pi R_n^2 I_c C / \Phi_0 < 1,$$

где  $C$  — геометрическая емкость джозефсоновского перехода;  $R_n$  — нормальное сопротивление перехода;

— безразмерный шумовой параметр, характеризующий тепловое размытие резистивной ветви ВАХ,  $\Gamma \approx 0,05$  [11],

$$\Gamma = 2\pi k_B T / I_c \Phi_0 \approx 0,05,$$

где  $T$  — рабочая температура сквида;  $k_B$  — постоянная Больцмана;

— достаточно большие значения характерного напряжения  $V_c = I_c R_n$ , по крайней мере не менее нескольких сотен микровольт, обеспечивающие приемлемые значения глубины модуляции выходного напряжения сквида  $\Delta V$ .

Из флуктуационного значения индуктивности  $L_I \sim 10^{-9}$  Гн (при  $T = 4,2$  К) и перечисленных выше физических условий можно оценить величины основных параметров ПТ-сквида:  $L_I \gg L_0 \leq 10^{-10}$  Гн;  $2I_c \approx 20$  мкА;  $R_n = (10-30)$  Ом;  $C < 10^{-13}$  Ф.

Кроме того, конструкция ПТ-сквида должна быть разработана таким образом, чтобы все геометрические резонансы на ВАХ находились вне рабочей области.

В большинстве практических применений ПТ-сквид используется для регистрации сигнала с источников с относительно большим полным импедансом. Поэтому конструкция СПИС кроме ПТ-сквида должна содержать следующие элементы:

— согласующий сверхпроводящий трансформатор магнитного потока, обеспечивающий малые потери на согласование с измеряемым объектом;

— сверхпроводящие контактные площадки для обеспечения монолитного сверхпроводящего соединения между входной катушкой трансформатора магнитного потока и источником сигнала с малым или нулевым активным импедансом;

— контур обратной связи, необходимый для использования сквида в составе электронного блока потокозапирающего типа.

Следует отметить, что использование СПИС в качестве чувствительных элементов магнитометрических систем, особенно в составе многоканальных, приводит к тому, что они должны работать в непосредственной близости друг от друга и/или других источников помех, что может вызвать значительное их взаимовлияние. Относительно высокий уровень внешних электромагнитных помех, даже при использовании внешних сверхпроводящих экранов, в настоящее время является одним из основных препятствий для разработчиков такого рода приборов, и, несомненно, что в будущем эта проблема станет еще более острой. Помимо решения задачи защиты СПИС от источников внешних помех, также должна быть гарантирована их работа в составе магнитометрической аппаратуры в реальных условиях, т.е. при наличии другого окружающего оборудо-



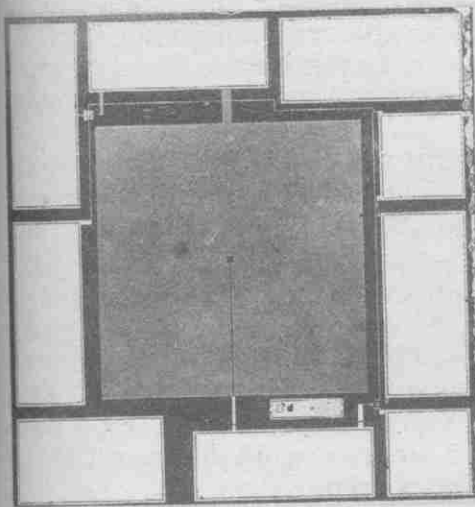
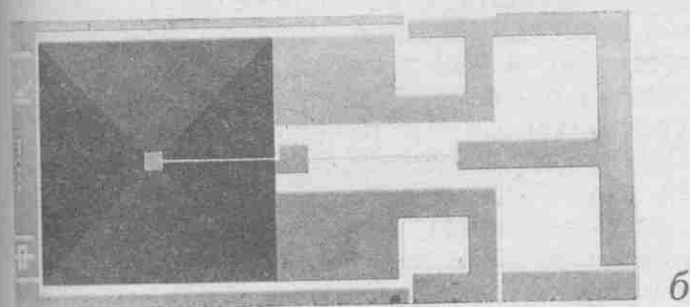


Рис. 1. Общий вид сверхпроводниковой СПИС: а — типа ФПИ; б — типа ФПК



дования. Это означает, что магнитометрическая аппаратура не должна быть подвержена влиянию источников внешних шумов и сама не должна быть источником шума. Полное устранение или, что более реально, компенсация внешних электромагнитных помех должна быть в этом случае основной целью при проектировании СПИС для магнитометрических систем. Очевидно, что использование любого сверхпроводящего экрана в конструкции СПИС для защиты от помех нецелесообразно, поскольку это приводит к дополнительному усложнению технологии и даже к ухудшению характеристик СПИС.

Исходя из вышесказанного в НИИФП разработаны две базовые конструкции СПИС.

На рис. 1 показан внешний вид гибридной СПИС, состоящей из двух кристаллов ФПИ (а) и ФПК (б). СПИС ФПИ содержит симметричный планарный ПТ-сквид с размером сверхпроводящего контура  $2,5 \times 2,5$  мм и индуктивностью  $L_0 \sim 2 \cdot 10^{-10}$  Гн, которая определяется в основном размером внутреннего контура и паразитной индуктивностью щели. Кроме рабочего сквида СПИС содержит тестовый интерферометр, два одиночных тестовых джозефсоновских перехода и тестовый асимметричный интерферометр с квазиодномерным джозефсоновским переходом. Рабочий сквид и все тестовые элементы схемы индуктивно связаны с общей управляющей шиной, которая используется также как контур обратной связи при включении СПИС ФПИ без трансформатора магнитного потока. Джозефсоновские переходы в СПИС ФПИ планарные — типа «сэндвич» со структурой Nb/YO<sub>x</sub>/Nb. Разработан также вариант СПИС с торцевыми джозефсоновскими переходами со структурой Nb/α-Si/Nb.

На кристалле ФПК (см. рис. 1, б) сформирован тонкопленочный трансформатор магнитного потока и контур обратной связи, который используется вместо аналогичного контура на СПИС ФПИ в гибридном варианте. Были разработаны и изготовлены два варианта схемы ФПК, отличающиеся числом витков трансформатора магнитного потока: 66 витков при входной индуктивности  $L_i \sim 10^{-6}$  Гн и 200 витков при входной индуктивности  $L_i \sim 10^{-5}$  Гн. Особенностью СПИС ФПК является наличие в ней сверхпроводящих контактных площадок из сплава MoRe [12], предназначенных для реализации сверхпроводящего соединения с внешними источниками сигналов методом пайки с использованием легкоплавких сверхпроводящих сплавов на основе Рb. Расчетный коэффициент связи между сквидом и трансформатором магнитного потока в этой конструкции относительно небольшой ( $K \sim 0,4-0,5$ ). Это связано с наличием паразитного индуктивного вклада зазора между кристаллами.

Размеры кристаллов СПИС ФПИ и ФПК соответственно  $5,2 \times 5,2$  мм и  $3,2 \times 6,3$  мм. Размер сверхпроводящих контактных площадок трансформатора магнитного потока  $1,1 \times 1,1$  мм.

Основным назначением гибридной СПИС ФПИ—ФПК является применение ее в составе магнитометрической аппаратуры с небольшим числом измерительных каналов, поскольку необходимо индивидуальное экранирование каждой гибридной СПИС.

Существенно лучшими метрологическими характеристиками обладает СПИС типа МСФП-32 (рис. 2). Эта схема изготовлена на основе 32-контурного ПТ-сквида, причем контуры включены так, что образуют планарную градиентометрическую систему пятого порядка, позволяющую достигнуть весьма эффективной помехозащитности даже в случае сильно локализованных и близко расположенных источников электромагнитных помех. Отсутствие в СПИС паразитных индуктивных элементов позволило получить коэффициент связи  $K \sim 0,9-0,92$  при входной индуктивности  $L_i \sim 10^{-7}$  Гн и улучшить энергетическое разрешение, приведенное ко входу, в 4—5 раз по сравнению с СПИС ФПИ—ФПК. Топология МСФП-32 содержит два тестовых элемента: сверхпроводящий межслойный переход и тестовый интерферометр. В СПИС использованы планарные джозефсоновские переходы типа Nb/YO<sub>x</sub>/Nb. Разработаны два варианта схемы, ориентированные для токовых измерений или для использования в качестве магниточувствительного элемента без дополнительных внешних цепей. Особенностью СПИС является наличие всего двух функциональных сверхпроводящих уровней разводки.

Разработанная СПИС МСФП-32 может быть использована в составе многоканальных информационно-измерительных систем.

**Изготовление СПИС.** СПИС ФПИ—ФПК и МСФП-32 формировались на стандартных пластинах монокристаллического Si диаметром 76 мм. Поскольку в СПИС ФПИ и МСФП-32 использовались два типа джозефсоновских переходов с прослойками α-Si и YO<sub>x</sub>, то и при изготовлении СПИС использовались два технологических маршрута, которые являются базовыми.

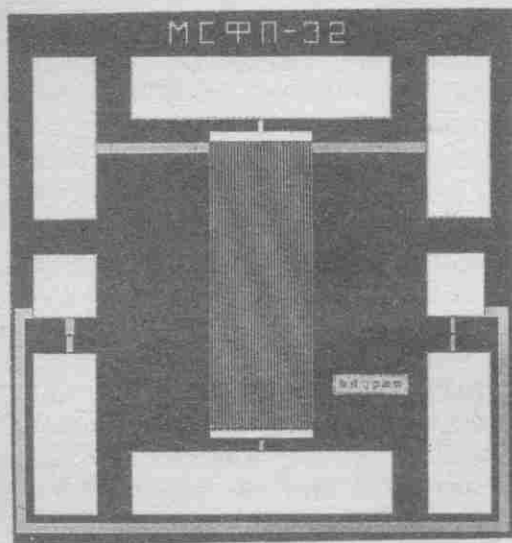


Рис. 2. Общий вид сверхпроводниковой СПИС типа МСФП-32

СПИС с переходами  $Nb/\alpha\text{-Si}/Nb$  изготавливались следующим образом. На поверхность Si-пластины, предварительно обработанной ионами аргона (для улучшения адгезии), наносилась первая пленка  $Nb^1$  толщиной  $t \sim 250$  нм ионно-плазменным методом распыления в Аг. В следующем процессе эта пленка покрывалась методом электронно-лучевого испарения изолирующим слоем  $Al_2O_3$ , из которого стандартными методами фотолитографии формировалась маска, соответствующая по форме первому электроду. Открытые участки пленки  $Nb^1$  удалялись ионно-химическим травлением (ИХТ) в смеси фреона с кислородом: при этом у оставшейся части пленки под маской  $Al_2O_3$  формировались торцы с углом  $\alpha \sim 70^\circ$  к поверхности пластины. Перед нанесением  $\alpha\text{-Si}$  и  $Nb^2$  поверхность торцов пленки  $Nb^1$  подвергалась высокочастотной чистке ионами Аг. Пленка  $\alpha\text{-Si}$  толщиной  $d$  от 3 до 15 нм и пленка  $Nb^2$   $t \sim 250$  нм наносились сразу же после чистки ионно-плазменным методом в Аг. На поверхности пленки  $Nb^2$  формировалась фоторезистивная маска (ФРМ), через которую методом ИХТ формировался второй электрод. После чего ФРМ удалялась в кислородной плазме. В тех местах, где второй электрод узкими участками шириной  $\omega \sim 3$  мкм заходил на первый электрод, на торцах этого электрода формировались торцевые джозефсоновские переходы  $Nb/\alpha\text{-Si}/Nb$  с площадью  $S = \omega t / \cos \alpha \sim 0,7$  мкм<sup>2</sup>. Изготовление СПИС завершалось формированием V/Cu-контактных площадок после предварительной высокочастотной чистки ионами Аг поверхности обоих электродов.

Изготовление СПИС с планарными джозефсоновскими переходами  $Nb/YO_x/Nb$  начиналось с формирования трехслойной джозефсоновской структуры  $Nb^1/YO_x/Nb^2$ . Для чего на Si-пластину методом электронно-лучевого испарения наносилась первая пленка  $Nb^1$  толщиной  $t \sim 200$  нм. В том же вакуумном цикле на ее поверхность тем же методом наносилась пленка Y с  $d$  от 2 до 5 нм. После чего проводилось ее окисление при комнатной температуре в атмосфере воздуха при нормальном давлении в течение 2 мин. Затем на поверхность наносилась вторая пленка  $Nb^2$  с  $t \sim 70$  нм.

Из полученной трехслойной структуры методом ИХТ через ФРМ формировались площадки из  $Nb^2$  и  $YO_x$  размером  $6 \times 6$  мкм, соответ-

ствующие площади джозефсоновских переходов. Причем слой  $YO_x$  на открытой поверхности удалялся ионно-лучевым травлением в Аг. Рисунок первого электрода формировался также методом ИХТ через ФРМ.

В качестве изоляции в СПИС использовались пленки  $Al_2O_3$ , осажденные электронно-лучевым методом. В СПИС МСФП-32, где площадь перекрытия между верхним и нижним слоями разводки (между петлями сквида и катушкой связи (см. рис. 2)) около 1 мм<sup>2</sup>, применялась двойная изоляция  $SiO_2/Al_2O_3$ . В изоляции жидкостным химическим травлением вскрывались окна над переходами  $Nb^1/YO_x/Nb^2$  размером  $3 \times 3$  мкм и больших размеров в местах образования сверхпроводящих межслойных переходов.

Сверхпроводящий слой  $Nb^3$  наносился ионно-плазменным методом в атмосфере Аг с предварительной высокочастотной чисткой ионами Аг поверхности  $Nb^2$  и  $Nb^1$  в окнах изоляции. В слое  $Nb^3$  методами фотолитографии и ИХТ создавался рисунок разводки верхнего электрода ПТ-сквида. Изготовление СПИС завершалось формированием MoRe/Pb-контактных площадок, нанесенных на поверхность  $Nb^1$  и  $Nb^3$  с предварительной ее очисткой.

Интегральные катушки связи ФПК изготавливались с применением описанных методов с двумя слоями ниобия. Из второго слоя  $Nb^2$  формировалась шина вывода из центра катушки, изготовленной из слоя  $Nb^1$  (см. рис. 1, б), и соединенная с  $Nb^1$  сверхпроводящим контактом. Шина вывода и катушка разделены по площади пересечения двойной изоляцией  $SiO_2/Al_2O_3$ . Контактные площадки MoRe/Pb формировались с предварительной очисткой Аг поверхности ниобия.

**Электрические характеристики СПИС.** Качество изготовленных СПИС определялось путем измерения их основных электрических характеристик, проводимых при температуре  $T = 4,2$  К с использованием сверхпроводящего ниобиевого экрана. Исследование СПИС проводилось в два этапа, включающие измерение сигнальных параметров по методике, описанной в работе [13], и измерение шумовых характеристик в составе системы обработки сигнала потокозапирающего типа по методике, описанной ниже. Особое внимание при проведении всех измерений уделялось защите СПИС от воздействия радиочастотных широкополосных помех путем использования фильтров по цепям питания измерительного стенда и его дополнительного экранирования.

Измеренные ВАХ изготовленных СПИС качественно соответствуют ВАХ одиночных джозефсоновских переходов, подробно описанных в [7, 8]. Отбраковка СПИС проводилась по величинам основных параметров ( $I_c$ ,  $R_N$ ,  $V_c$ ) в соответствии с требованиями, изложенными выше. Дальнейшее изучение сигнальных характеристик осуществлялось путем измерения глубины модуляции критического тока сквида  $\Delta I_c$ , выходного напряжения  $\Delta V$  при токах смещения  $I > I_c$ . На рис. 3 показана характерная зависимость выходного напряжения от магнитного потока для СПИС ФПИ.

Из множества измеренных значений  $\Delta I_c$  выбиралось максимальное отношение  $\Delta I_c / I_c$ , соот-

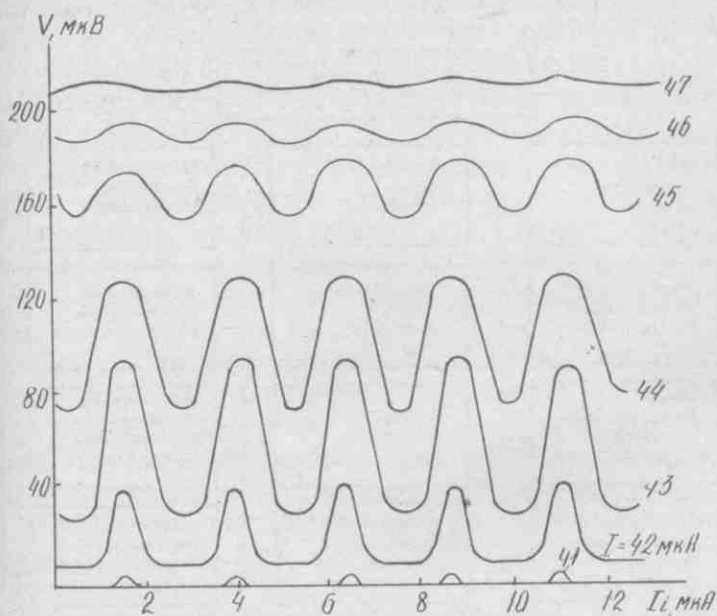


Рис. 3. Зависимость выходного напряжения от магнитного потока для СПИС типа ФПИ

ветствующее ПТ-сквиду с минимальной асимметрией плеч. По выбранному значению определялась полная индуктивность ПТ-сквида, которая примерно на 5—10% превышала расчетное значение геометрической индуктивности. Это отклонение, очевидно, связано с паразитным вкладом кинетической индуктивности джозефсоновских переходов.

Эффективность трансформатора магнитного потока определялась путем измерения его входной индуктивности с учетом влияния индуктивности сквида и периода по току  $\Delta I_i$ , из значений которых рассчитывался коэффициент связи  $K$ , приведенный в табл. 1. Полученные значения  $K$  оказались несколько ниже теоретических, что связано с рассеянием магнитного потока на паразитных элементах топологии и вкладом кинетической индуктивности джозефсоновских переходов. Экспериментально установлено незначительное влияние плотности прижима кристаллов ФПИ—ФПК на величину  $K$ .

Схемы, изготовленные с двумя типами джозефсоновских переходов — торцевыми и планарными, имели эквивалентные статические характеристики в слабых магнитных полях. В «сильных» полях ( $(1-5) \times 10^{-4} T$ ) СПИС с планарными переходами имеют более слабую зависимость крутизны преобразования от поля по сравнению с торцевыми переходами.

Таблица 1

Основные параметры СПИС различных типов

Основные параметры	ФПИ-ФПК	ФПИ-ФПК	МСФП-32
$L_0$ , Гн	$\sim 2 \times 10^{-10}$	$\sim 2 \times 10^{-10}$	$\sim 2 \times 10^{-11}$
$L_i$ , Гн	$\sim 2 \times 10^{-6}$	$\sim 1,5 \times 10^{-5}$	$\sim 10^{-8}$
$\Delta I_i$ , мкА	$\sim 1,5$	$\sim 0,45$	$\sim 1,05$
$K$	$\sim 0,4$	$\sim 0,4$	$\sim 0,9$

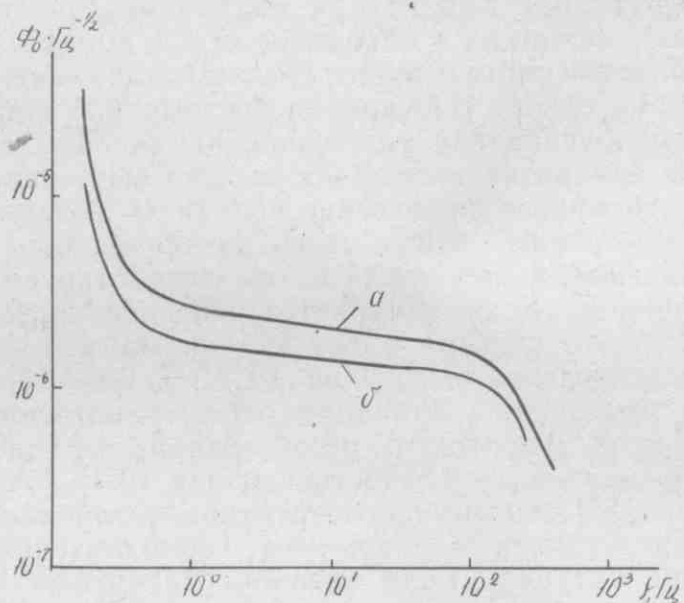


Рис. 4. Спектральная плотность шума СПИС на основе ПТ-сквидов с джозефсоновскими переходами Nb/ $\alpha$ -Si/Nb (а) и Nb/YO<sub>x</sub>/Nb (б)

Низкочастотные шумы ПТ-сквидов исследовались на специализированном стенде в составе персональной ЭВМ и интерфейсного блока. Измерения проводились в диапазоне частот от  $10^{-2}$  до  $10^3$  Гц. По результатам измерений шумового напряжения определялась спектральная плотность шумов и энергетическое разрешение ПТ-сквида на разных частотах. В процессе измерений данные обрабатывались программно-организованным цифровым фильтром. Измерение спектральной плотности шума проводилось с накоплением данных и их последующим усреднением. На рис. 4 показано энергетическое разрешение для двух образцов ПТ-сквидов: с переходами Nb/ $\alpha$ -Si/Nb (а) и переходами Nb/YO<sub>x</sub>/Nb (б).

Проведенные исследования показали, что шум ПТ-сквидов в диапазоне частот от 0,1 до 300 Гц почти белый и имеет среднеквадратичное значение менее  $5 \times 10^{-6} \Phi_0 / \Gamma_c^{1/2}$  для ПТ-сквидов с переходами Nb/ $\alpha$ -Si/Nb и не хуже  $2 \times 10^{-6} \Phi_0 / \Gamma_c^{1/2}$  для ПТ-сквидов с переходами Nb/YO<sub>x</sub>/Nb. Уменьшение шума выше 200 Гц связано с ограниченной полосой пропускания потокозапирающей электронной системы обработки сигнала ПТ-сквида. Шумовое напряжение на низких частотах (ниже частоты среза избыточного шума) существенно возрастает, то есть спектры приобретают вид, характерный для шума типа  $1/f$ . Величина частоты среза избыточного шума у ПТ-сквидов с планарными джозефсоновскими переходами примерно в несколько раз ниже, чем у ПТ-сквидов с торцевыми переходами и для различных приборов лежит в пределах от 0,5 до 2 Гц.

В процессе проведения настоящих исследований было изучено влияние амплитуды и формы сигнала модуляции магнитного потока на шумовые свойства ПТ-сквидов. Установлено, что использование синусоидального или меандрового сигнала модуляции не внесло заметного влияния на спектральную плотность шума ПТ-сквидов для обоих типов джозефсоновских переходов. Наилучшие шумовые характеристики были

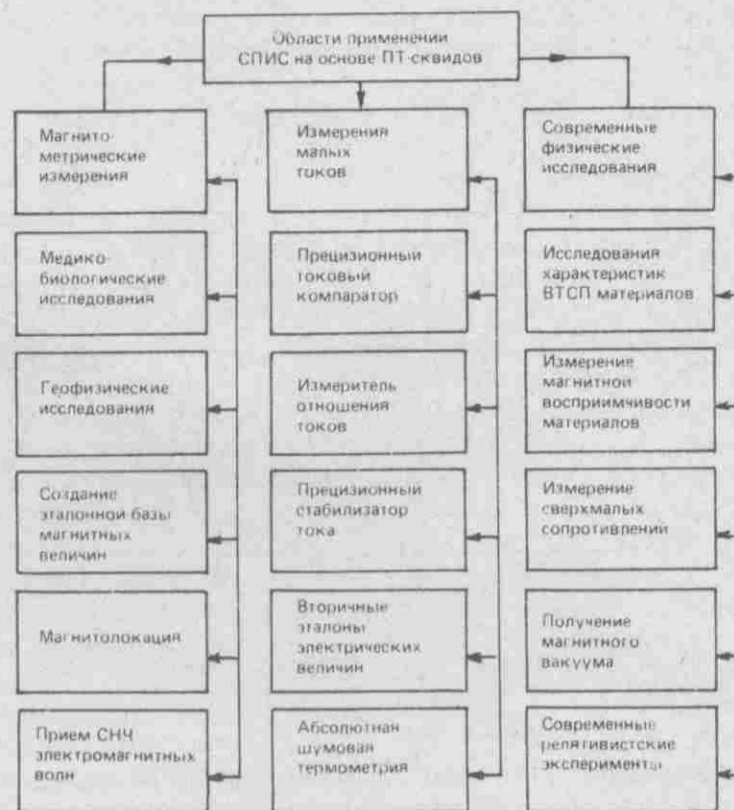
достигнуты при амплитудах модуляции (двойной размах), лежащих в диапазоне от 0,1 до 0,25  $\Phi_0$ .

**Области применений.** Области применений СПИС на основе ПТ-сквидов чрезвычайно широки, что обусловлено универсальностью ПТ-сквида как измерительного прибора. Это вытекает из того, что многие физические величины, подлежащие измерению, могут быть преобразованы в эквивалентный магнитный поток, регистрируемый ПТ-сквидом. Если измеряется внешнее магнитное поле, то система работает как магнитометр с чувствительностью лучше  $10^{-14} \text{ Т/Гц}^{1/2}$  [14]. Для измерений вариаций пространственных градиентов магнитного поля созданы градиентометры с чувствительностью лучше  $10^{-12} \text{ Т/м} \times \text{Гц}^{1/2}$  [15], которые конструктивно отличаются от магнитометров наличием дополнительной входной катушки. Если внешний магнитный поток создается протекающим во входной катушке током, то система будет работать как гальванометр с разрешением по току до  $10^{-14} \text{ А/Гц}^{1/2}$  и нулевым входным сопротивлением [22]. Если же этот ток вызывается напряжением, приложенным через резистор к входной катушке, то внешний магнитный поток пропорционален приложенному напряжению и система является вольтметром. Этот метод позволяет также измерять сверхмалые сопротивления. Достигнутая максимальная чувствительность составляет  $10^{-14} \text{ В/Гц}^{1/2}$  по напряжению и  $10^{-10} \text{ Ом/Гц}^{1/2}$  по сопротивлению [22]. На основе ПТ-сквида создан низкочастотный усилитель с шумовой температурой  $5 \times 10^{-8} \text{ К}$  [21]. Приведенные примеры не исчерпывают всех возможностей ПТ-сквидов как измерительных приборов.

Наиболее широко СПИС с ПТ-сквидами используются в магнитометрических системах (см. табл. 2). Уже с 1970 г. в США мелкосерийно выпускаются такие системы для медико-биологических исследований, для записи магнитокардиограмм и магнитоэнцефалограмм [3]. В настоящее время фирма Biomagnetic Technologies выпускает нейромагнитометры на основе сквидов, пригодных для ранней диагностики очагов эпилепсии, болезни Паркинсона. Стоимость нейромагнитометра составляет сотни тысяч долларов.

Еще одна обширная область применения магнитометров — исследование магнитного поля Земли [20]. Эта методика оказывается полезной при разведке месторождений полезных ископаемых, поиска предвестников землетрясений и др.

Другое важное применение систем на основе ПТ-сквидов — слежение за перемещением магнитных объектов (магнитолокация). Впервые такая система слежения на основе трех магнитометров и пяти градиентометров, снабженная управляющим электронным оборудованием, была продемонстрирована в 1975 г. [21]. В настоящее время исследовательские центры Военно-Морского ведомства США изучают сквиды в качестве чувствительных элементов для целей обнаружения, а также для обеспечения сверхнизкочастотной подводной связи. По имеющимся сообщениям [23] чувствительность градиентометров на основе ПТ-сквидов на несколько порядков выше, чем у обычных устройств обнаружения.



Широкое применение нашли измерители магнитной восприимчивости на основе ПТ-сквидов, которые регистрируют вариации магнитного поля внутри замкнутого объема [16] при внесении магнитного образца. В последнее время эта методика вышла за рамки чисто научных лабораторных исследований и используется в коммерческих целях. Так, фирма Conductus предлагает магнитометрическую систему для контроля денежных знаков, а фирма Quantum Design выпускает измерительные системы для контроля магнитных свойств горных пород и процесса коррозии металлов [24]. Последняя методика представляет особенно большой интерес для самых различных отраслей промышленности, от нефтеперерабатывающей до аэрокосмической.

Еще одна важная область использования ПТ-сквидов в магнитометрии относится к созданию эталонной базы магнитных величин. Это прежде всего связано с необходимостью создания с помощью сверхпроводящих экранов замкнутого объема, где влияние внешних магнитных помех (в том числе и магнитного поля Земли) уменьшается в  $10^5$ – $10^7$  раз. Необходимость такого «магнитного вакуума» обусловлена задачами метрологии и фундаментальных физических исследований [21]. Очень важная область использования сверхпроводящих экранов связана с созданием гироскопических приборов нового типа для современных систем инерциальной навигации [21]. В том числе, следует отметить возможность создания прецизионного гироскопа на основе ПТ-сквида. Работы в этом направлении ведутся исследовательским центром Военно-Морского ведомства США с 1971 г. Создание таких гироскопов требует решения задачи получения магнитного поля с относительной неоднородностью лучше, чем  $10^{-4}$  и временной стабильностью  $10^{-16} \text{ Т}$ . Реализация этих условий может быть осуществлена лишь с применением ПТ-сквидов как контролирующих датчиков.

Перспективным является использование ПТ-сквидов в абсолютной шумовой термометрии, где абсолютная температура определяется из флуктуаций частоты колебаний тока джозефсоновского перехода [25]. Это позволяет связать абсолютную температуру с легко измеряемой частотой через простые соотношения, содержащие фундаментальные константы. Такой способ измерений дает возможность создания на основе сквида первичного эталона температурной шкалы.

Особенно привлекательной является область использования ПТ-сквидов в современных физических исследованиях. Прежде всего это исследование электронного и ядерного магнетизма в твердых телах при сверхнизких температурах [17], магнитной восприимчивости биологических объектов [27]. С помощью сквидов удобно исследовать свойства высокотемпературных сверхпроводников, что позволяет определить их фазовый состав и другие основные электрофизические характеристики, включая исследование движения магнитных вихрей, вплоть до наблюдения движения одиночного вихря [26]. Проводится целый ряд экспериментов, связанных с измерениями в сверхмалых магнитных полях, от исследования слабых электромагнитных взаимодействий до изучения влияния магнитного поля на рост микроорганизмов [27].

Приведенные примеры показывают большие возможности СПИС на основе ПТ-сквидов как многофункциональных измерительных приборов.

Достигнутые в настоящее время успехи в области высокотемпературной сверхпроводимости позволяют значительно расширить области применений сквидов (для решения задач, не требующих предельных характеристик) за счет повышения рабочей температуры от 4,2 до 77 К. Изготовленные экспериментальные образцы ВТСП ПТ-сквидов позволяют регистрировать магнитные поля величиной до  $10^{-11}$  Тл/Гц<sup>-1/2</sup> при температуре жидкого азота [28, 29]. Ближайшая перспектива — создание активного элемента джозефсоновского типа для ВТСП-сквида с воспроизводимыми и высококачественными электрофизическими характеристиками, сохраняющими свои свойства при многократных термоциклированиях и в течение длительного времени эксплуатации.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бахтин П.А., Васенков А.А., Масалов В.В. и др. — Микроэлектроника, 1984, т. 13, № 6, с. 529.
- Лихарев К.К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. — М.: Наука, 1985, 320 с.
- Высокостабильный широкополосный магнитометр на основе ПТ-сквида с торцевыми джозефсоновскими переходами/А.Л.Гудков, А.Н.Матлашов, Ю.Е.Журавлев, В.В.Масалов. — ПТЭ, 1989, № 2, с. 130.
- Журавлев Ю.Е., Липович А.Я., Матлашов А.Н. и др. — ДАН, 1987, т. 29в, № 1, с. 231.
- Новости ВТСП, 1993, т. 6, вып. 7.
- Криоэлектронные микросхемы для высокоточных информационно-измерительных устройств с использованием природных констант/П.А.Бахтин, В.В.Масалов, Н.С.Самсонов, В.Н.Сретенский. — Электронная техника, Микроэлектроника, Сер. 3, 1987, вып. 4(124), с. 17.
- Гудков А.Л., Куприянов М.Ю., Лихарев К.К. — ЖЭТФ, 1988, т. 94, № 7, с. 319.
- Гудков А.Л., Зубков А.А., Конев А.Л., Масалов В.В. — Кн.: Флуктуационные явления в физических системах. Вильнюс, 1988, с. 43.
- Кларк Дж. Сверхпроводниковые квантовые интерференционные приборы для низкочастотных измерений (слабая сверхпроводимость). — М.: Мир, 1980. — 256 с.
- Ван Дюзерт Т., Тернер Ч.У. Физические основы сверхпроводниковых устройств и цепей. — М.: Радио и связь, 1984. — 344 с.
- Tsai J., Jain A.K., Luke J.E. — Phys. Rev. Lett., 1985, vol. 51, N 4, p. 316.
- А.с. 1408644 (СССР)/П.А.Бахтин, Е.Я.Гольдберг, Т.А.Корнилова, В.В.Масалов, 28.07.1984.
- Масалов В.В., Самусь А.Н., Сретенский В.Н. Измерения сверхпроводниковых ИС с джозефсоновскими переходами. — Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1984, вып. 1, с. 12.
- Nakanishi M., Kasai N., Kado H., Koyanagi M. DC-SQUID Magnetometer system for detecting vector value of magnetic field. — Proceeding of Appl. Superconductivity Conference, San-Francisco, USA6, August 1988.
- Erne S.N., Roman G.I. Performances of higher order gradientometer for biomagnetic source localization. — SQUID-85, Berlin — New York, 1985, p. 951.
- Разработка установки для измерения магнитного момента и восприимчивости монослоя адсорбента на основе СКИПа/А.В.Анисимов, П.А.Бахтин, В.Д.Борман и др. — В кн. Тезисы докл. 21-й научно-техн. конф. МИФИ, М.: МИФИ, 1985, с. 41.
- Kohl M., Odehnal M. et al. Detection of NMR Larmor frequency of protons by a SQUID. — SQUID-85, Berlin — New York, 1985, p. 879.
- Roman G.L., Williams S.J., Kaufman L. Biomagnetic-instrumentation. — Rev. Scie. Instr., Dec. 1982, vol. 53, p. 1815—1844.
- Corrected unipositional lead system for vector cardiographie/H.J.Escola et al. — IEEE Trans. Biomed. Eng., BME-34, p. 81—90.
- Возможности использования магнитометров на основе сквидов для геомагнитных измерений/П.А.Бахтин, Н.И.Комаровских, Ю.А.Копытенко, В.В.Масалов. — В кн.: Тезисы докл. VI Всес. научно-техн. конф. «Проблемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры», Л.: ВНИИМ 1983, с. 65.
- Бондаренко С.И., Шеремет В.И. Применение сверхпроводимости в магнитных измерениях. — М.: Мир, 1984. — 130 с.
- Масалов В.В., Самусь А.Н., Сретенский В.Н. Флюксметрия на основе сверхпроводящего квантового интерферометра — новое направление в измерительной технике. — Электронная техника. Сер. 8. Управление качеством, метрология, стандартизация, вып. 2—3, 1980, с. 123.
- Слабая сверхпроводимость/Под ред. Фонера. — М.: Мир, 1980, 197 с.
- Clarke J. — IEEE Trans. Magn., 1983, vol. 19, p. 288.
- Шумовые характеристики тонкопленочных ПТ-сквидов на основе тугоплавких материалов/А.Л.Гудков, А.А.Зубков, А.Л.Конев, В.В.Масалов. — V Всес. конф. по флуктуационным явлениям в физических средах (27—30 сентября, г. Паланга), Вильнюс, 1988, с. 179.
- Резистивное состояние и динамика вихрей в сверхпроводящих пленках/А.Н.Самусь, А.Ф.Попков и др. — Сверхпроводимость: физика, химия, техника, 1991, т. 4, № 7, с. 1324.
- Abstracts of ISEC-87, August 28—29, 1987, Tokyo, Japan.
- Попков А.Ф., Самусь А.Н. Гибридная ВТСП и полупроводниковая электроника. — М., Обзор МЦНТИ, 1993
- ПТ-сквиды на основе пленок Y-Ba-Cu-O. Высокотемпературная сверхпроводимость/В.В.Масалов, А.А.Зубков, Д.Г.Емельяненко и др. — ВИМИ, 1990, вып. 8, с. 72—75.

# Цифровые интегральные схемы на джозефсоновских переходах (ОБЗОР)

А.Л.ГУДКОВ, А.А.ЗУБКОВ, В.В.МАСАЛОВ

Логические устройства на джозефсоновских переходах. Первые работы по использованию джозефсоновских переходов (ДП) в цифровых ИС относятся к началу 60-х годов, когда был предложен туннельный сверхпроводниковый криотрон на основе распределенного ДП [1] как альтернатива существовавшему ранее фазовому сверхпроводниковому криотрону. Впоследствии туннельный криотрон был заменен на квантовые интерферометры с двумя и тремя ДП. Ведущие позиции в этой области заняла фирма ИВМ, в которой был разработан проект джозефсоновского сигнального процессора с иерархической структурой памяти на 400 Кбит и содержащей 140000 логических вентилях [2]. К началу 80-х годов активные работы в области проектирования и разработки цифровых логических ИС на ДП велись в США, Японии, Западной Европе и СССР. Однако, несмотря на несомненные успехи, достигнутые в этой области, созданные образцы ИС носили скорее демонстрационный характер и не могли быть использованы в практических устройствах.

В 1983–1984 гг., когда фирма ИВМ свернула все работы по проекту джозефсоновской ЭВМ, активные работы по созданию цифровых ИС на ДП практически были прекращены. Это объяснялось в основном следующими причинами. ИС на ДП по быстродействию не намного превосходили полупроводниковые ИС. Используемые в то же время джозефсоновские логические элементы с магнитной связью не позволяли обеспечить быстродействия, сравнимого с временем переключения собственно ДП. Время восстановления исходного состояния джозефсоновского вентиля после выполнения логической операции было достаточно велико (~1 нс), что обуславливалось большой собственной емкостью туннельных ДП. Кроме того, трудно было реализовать быстродействующую память на ДП. Поэтому быстродействие цифровых устройств на ДП не намного превышало быстродействие полупроводниковых цифровых ИС. Однако основным препятствием использования ДП в цифровой технике была их низкая надежность и плохая воспроизводимость. Изготавливались ДП из свинцовых сплавов и отличались низкой стабильностью. Критический ток ДП вследствие деградации самой тонкопленочной структуры со временем возрастал, что приводило к нарушению работоспособности джозефсоновских ИС. Кроме того, жесткие требования на разброс критических токов при изготовлении ИС со степенью интеграции  $10^3$ – $10^4$  эл./кристалл не могли быть удовлетворены при существующем в то время уровне технологии.

Ситуация существенно изменилась в середине 80-х годов после разработки нового базового технологического процесса изготовления ДП на основе ниобиевых пленок с прослойкой из окиси алюминия ( $Nb/AlO_x/Nb$ ). Предложенный Гурвичем и другими [3] в 1978 г., он был усовершенствован и использован для изготовления сверхпроводниковых ИС ведущими японскими фирмами. Применение ДП  $Nb/AlO_x/Nb$  разрешило большинство проблем, связанных с воспроизводимостью технологического процесса и надежностью изготавливаемых ИС.

На рис. 1 показан схематический вид планарного ДП  $Nb/AlO_x/Nb$ , состоящего из двух сверхпроводящих слоев (слои 2 и 5) толщиной около 200 нм, разделенных туннельным переходом толщиной 2–5 нм, и его вольт-амперная характеристика (ВАХ). Современная технология позволяет создавать высококачественные ДП с заданными параметрами. Наиболее типичными являются следующие значения: критический ток  $I_0 \sim 50$ –100 мкА, щелевое напряжение  $V_g \sim 2,5$  мВ, нормальное сопротивление  $R_n \sim 5$ –15 Ом, подщелевое сопротивление  $R_j \sim 200$ –500 Ом, емкость  $C = 10$  пФ. Отношение  $R_j/R_n$  определяет качество ДП и, как правило, должно быть не менее 50. Гистерезис ВАХ является основой построения логических элементов на ДП данного типа с использованием потенциального представления информации [1]. В случае, если емкость ДП достаточно мала ( $\beta_c = 2\pi \cdot R_n^2 \cdot I_c \cdot C / \Phi_0 \ll 1$ ), ВАХ ДП становится безгистерезисной, как показано пунктиром на рис. 1, б. Это условие достигается либо за счет уменьшения  $R_n$  шунтированием ДП дополнительным резистором, либо используя ДП с прослойкой из проводящего материала, либо за счет уменьшения площади ДП. На рис. 1, в показана эквивалентная схема простейшего логического элемента (буферного каскада), представляющего собой ДП (вентиль), нагруженный на последующий элемент с входным сопротивлением  $R_L$ . Если ток смещения  $I_b$  через ДП меньше  $I_0$ , то ДП может находиться в двух устойчивых состояниях: сверхпроводящем (среднее напряжение на ДП  $V = 0$ ) и резистивном ( $V = V_g$ ). В сверхпроводящем состоянии весь ток  $I_c$  течет через ДП, не ответвляясь в нагрузку. Если же на короткое время на ДП поступит входной ток  $I_{in}$ , так что  $I_b + I_{in} > I_0$ , то ДП переключится в резистивное состояние и в нагрузку потечет ток  $I_L = V/R_L$ . Этот процесс переключения лежит в основе различных типов логических элементов, кото-

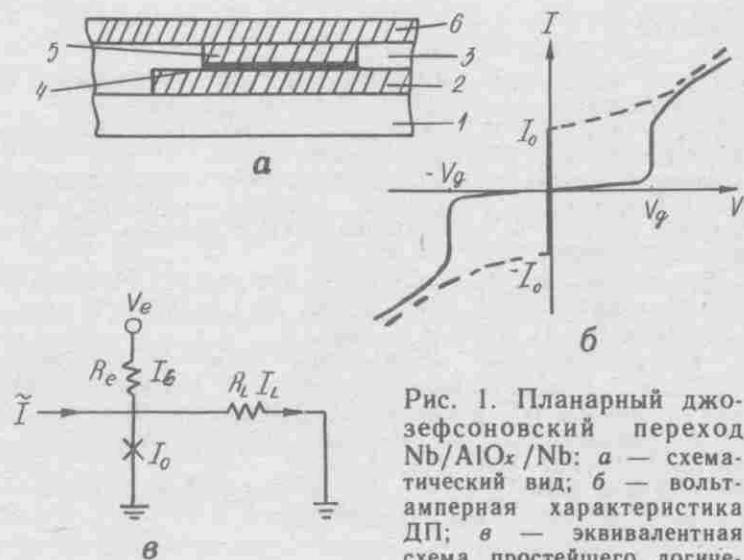


Рис. 1. Планарный джозефсоновский переход  $Nb/AlO_x/Nb$ : а — схематический вид; б — вольт-амперная характеристика ДП; в — эквивалентная схема простейшего логического элемента

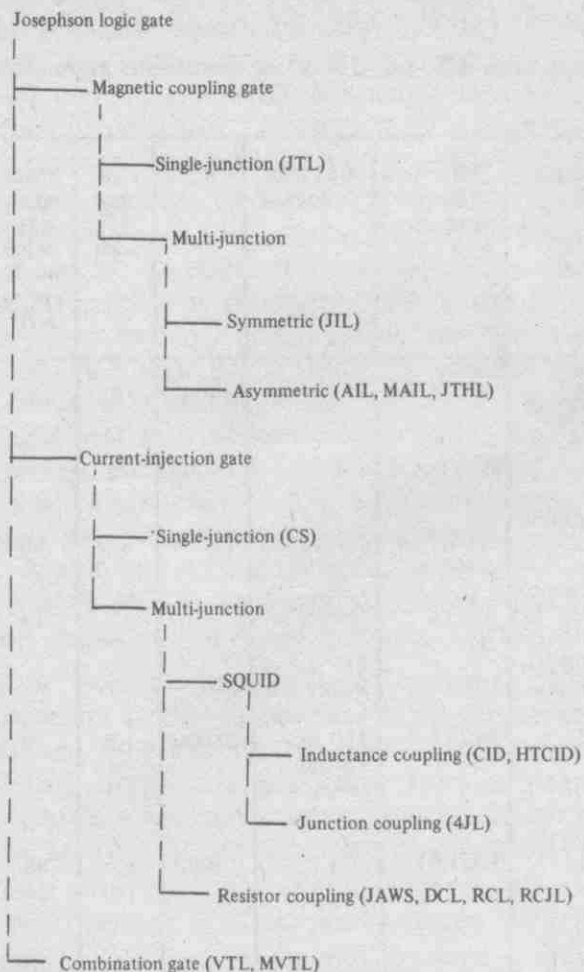


Рис. 2. Джозефсоновские логические элементы на основе потенциального представления информации [8]: JIL — Josephson Tunneling Logic (джозефсоновская туннельная логика), JIL — Josephson Interferometer Logic (джозефсоновская логика на интерферометрах), AIL — Asymmetric Interferometer Logic (джозефсоновская логика на асимметричных интерферометрах), MAIL — Magnetically-coupled Asymmetric Interferometer Logic (магнитосвязанная джозефсоновская логика на асимметричных интерферометрах), JTHL — Josephson Threshold Logic (джозефсоновская пороговая логика), CS — Current Switched gate (вентиль с переключением тока), CID — Current Injection Device (элемент с токовой инъекцией), HTCID — High Tolerance Current Injection Device (элемент с токовой инъекцией и высокими допусками), 4JL — Four Junction Logic (логический элемент, содержащий 4 ДП), JAWS — Josephson Atto Weber Switch (джозефсоновский переключатель (триггер)), DCL — Direct Coupled Logic (логика с непосредственными связями), RCL — Resistor Coupled Logic (логика с резистивными связями), RCJL — Resistor Coupled Josephson Logic (джозефсоновская логика с резистивными связями), VTL — Variable Threshold Logic (логика с переменным порогом), MVTL — Modified Variable Threshold Logic (модифицированная логика с переменным порогом).

рые различаются в основном способом перевода ДП из сверхпроводящего в резистивное состояние. Согласно существующей в настоящее время классификации [4], различают три способа переключения ДП и, соответственно, три класса логических элементов (рис. 2).

К первому классу относят логические элементы, в которых условие  $I_b > I_0$  выполняется за счет подавления  $I_0$  магнитным полем, создаваемым протекающим в шинах управления током  $I_c$ . Вентилем в данном случае может являться распределенный ДП или квантовый интерферометр. Исторически именно этот класс логических элементов — Magnetic Coupling Gate (вентили с магнитной связью) — был впервые использован при проектировании логических джозефсоновских устройств.

Ко второму классу относят логические элементы, в основе которых лежит непосредственная инъекция тока, подобная рассмотренной ранее на примере буфер-

ного каскада: Current Injection Gate (элементы с токовой инъекцией). Эти элементы имеют существенно меньшую (примерно в 4 раза) площадь по сравнению с магнитосвязанными логическими элементами и более высокое быстродействие. Например, логический элемент с токовой инъекцией на резисторных связях (4JL) [5] достиг рекордных характеристик, имея задержку около 1,5 пс/вентиль при рассеиваемой мощности 12 мкВт.

К третьему классу схем относятся логические элементы, представляющие собой комбинацию двух предыдущих типов элементов — Combination Gate (комбинационная логика), т.е. вместе с инъекцией входного тока происходит подавление критического тока вентиля за счет магнитной связи. Наиболее широкое применение в последнее время получил именно этот способ управления активным элементом, в частности, логическое семейство MVTL (модифицированная логика с переменным порогом срабатывания).

Рассмотрим в качестве примера работу MVTL элемента "ИЛИ" (рис. 3, а), который представляет собой асимметричный двухконтактный интерферометр с ДП  $J_1, J_2$  и индуктивностью  $L$ . Критические токи ДК  $J_1$  и  $J_2$  соответственно равны  $p \cdot I_m$  и  $q \cdot I_m$ ,  $(p+q) = 1$ ,  $I_m$  — максимальный критический ток интерферометра. Входной ток  $I_{in}$ , протекая через индуктивность  $L$ , наводит внешний магнитный поток в интерферометре, снижая тем самым его критический ток и одновременно инжектируется в интерферометр через ДК  $J_3$ . Управляющая характеристика элемента приведена на рис. 3, б. В начальном состоянии  $I_{in} = 0$ , элемент находится в сверхпроводящем состоянии и весь ток смещения  $I_b$  течет через интерферометр (точка А). При поступлении входного тока ( $I_{in} \neq 0$ ) рабочая точка пересекает управляющую характеристику (точка В) и интерферометр переключается в резистивное состояние. Ток смещения  $I_b$  вытесняется в цепочку  $J_3, R_i$  и, в свою очередь, переводит ДК  $J_3$  в резистивное состояние. После включения  $J_3$  ток смещения вытесняется в нагрузку  $R_L$ , а входной ток через резистор  $R_i$  уходит в землю. Оптимальные параметры элемента следующие:  $I_m = 0,4$  мА,  $L = 5,2$  пГн,  $L_x = (3-5) \cdot L$ ,  $q/p = 3$ ,  $R_i = 10$  Ом,  $R_d = 1,8$  Ом. Быстродействие MVTL элемента "ИЛИ" составляет 4,2 пс, размер  $31 \cdot 41$  мкм<sup>2</sup> [6].

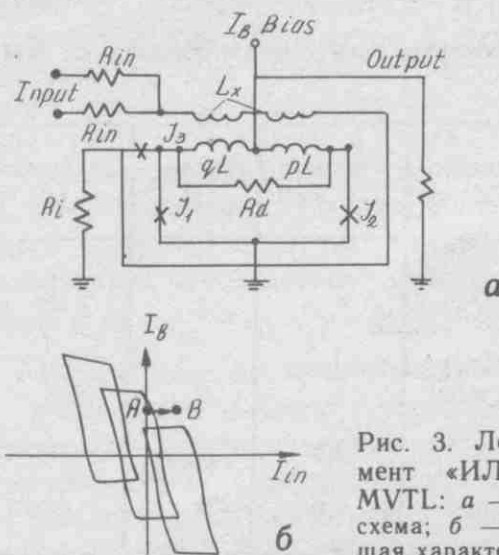


Рис. 3. Логический элемент «ИЛИ» семейства MVTL: а — эквивалентная схема; б — его управляющая характеристика

Цифровые ИС на ДП и их основные характеристики

Название ИС	Тип логических элементов	Быстродействие	Число ДП	Размер ДП, мкм	Рассеиваемая мощность, мВт	Размер, мм×мм
АЛУ [36]	MVTL	860 пс	900	2	10,1	8,5· 1,2
4-бит РАЛУ [37]	4JL	1,3 ГГц	10000	3	1,66	4,3· 5
4-бит процессор [38]	HUFFLE	1,02 ГГц	10000	2,5	25	5· 5
4-бит микропроцессор [7]	MVTL	1,1 ГГц			6,1	5· 5
8-бит цифровой сигнальный процессор [39]	MVTL	240 пс— 8-бит умножение, 410 пс— 13-бит сложение	23000	1,5	12	5· 5
4-бит процессор [40]	HUFFLE	1 ГГц	15000	2,5	40	7· 7
16-бит цифровой коррелятор [44]		12 ГГц		4	0,9	

В настоящее время при проектировании цифровых джозефсоновских ИС в той или иной степени используются логические элементы всех трех рассмотренных видов, поскольку ни один из них не является достаточно универсальным. В табл. 1 приведены характеристики некоторых из указанных элементов, позволяющие судить об их возможностях. Эти результаты получены в рамках обычной (не субмикронной) технологии, в отличие от полупроводниковых схем, где повышение быстродействия связано прежде всего с переходом к субмикронной литографии. К настоящему времени разработано и изготовлено большое число демонстрационных цифровых ИС на ДП со степенью интеграции до 10 эл./кристалл (табл. 2). Заметным достижением явилось создание в 1988 г. четырехразрядного микропроцессора, который выполняет те же функции, что и стандартный четырехразрядный микропроцессор Am2901 фирмы Advanced Micro Devices Inc. [7]. В табл. 3 приведены сравнительные характеристики джозефсоновского микропроцессора и микропроцессоров Am2901 на основе кремния и арсенида галлия [8]. Итогом разработок японских фирм в период 1984—1993 гг. явилось создание прототипов джозефсоновских компьютеров. В табл. 4 приведены их основные характеристики. Следует отметить, что полученные успехи во многом обусловлены разработкой специальной системы питания схем на ДП. Необходимость такой системы вызвана тем, что логический вентиль на туннельных ДП не возвращается в исходное состояние после снятия входного сигнала. Поэтому для возврата необходимо отключить источник питания элементов на ДП. В связи с этим возникает целый ряд проблем, из которых самой существенной является динамический пробой [1]. Суть этого явления заключается в том, что обратное переключение из состояния "1" в состояние "0" сопровождается слабо затухающими колебаниями напряжения, длительность которых намного превосходит длительность прямого включения. Другая проблема, возникающая при переменном питании, связана с сохранением информации при сбросе питающего напряжения до нуля. На практике эта проблема решается введением двух- или трехфазной системы питания, а также введением специальных джозефсоновских триггеров (фиксаторов), служащих для временного хранения информации [8]. Все эти факторы существенно усложняют конструкцию ИС и в конечном счете ведут к снижению тактовой частоты схемы и уменьшению степени интеграции. Реальная тактовая частота ИС на ДП, как принято сейчас считать, не превысит нескольких гигагерц, что

Таблица 3

Основные характеристики 4-бит микропроцессоров на полупроводниках и ДП [8]

Материал подложки	Максимальная тактовая частота, МГц	Рассеиваемая мощность, Вт
Si	30	1,4
GaAs	72	2,2
ДП	770	0,005

Таблица 4

Основные характеристики прототипов микрокомпьютеров на ДП

Разработчик	Electrotechnical Lab. [45]	Hitachi, Ltd. [46]
Архитектура	RISC	RISC
Разрядность, бит	4	4
Тип логических структур	4JL, VTL	JTL, HUFFLE
Число ДП	22000	15000 (процессор)
Число микросхем	4	2
Быстродействие, опер./с	10 <sup>9</sup>	10 <sup>9</sup>
Память, Кбит	1	1
Рассеиваемая мощность, мВт	6,2	50

Таблица 1

Характеристики некоторых логических элементов на ДП

Логический элемент	Размер, мкм×мкм	Размер ДП, мкм	Число ДП	Задержка, пс
MVTL «ИЛИ» [6]	31×41	2,5	3	4,2
RCL «ИЛИ» [35]	24×32	1	3	3
HUFFLE «ИЛИ» [38]		2,5	3	9
«И» [38]		2,5	6	19,6



почти на два порядка меньше быстродействия собственно ДП. Дальнейшее повышение быстродействия джозефсоновских ИС связывают прежде всего с новыми схемотехническими решениями, в частности с разработкой структур на одиночных квантах магнитного потока.

**Запоминающие элементы на ДП.** В сверхпроводниковых запоминающих элементах (ЗЭ) информация хранится в виде магнитного потока, создаваемого незатухающим током в контуре одноконтактного или двухконтактного интерферометра. По способу считывания различают два типа ЗЭ: с неразрушающим считыванием как базовый элемент КЭШ памяти и с разрушающим считыванием для основной памяти. Исторически первым был предложен ЗЭ с неразрушающим считыванием [9], в котором считывание осуществляется вентиляем считывания, индуктивно связанным с основным контуром, хранящим информацию. На рис. 4 показана схема ЗЭ с неразрушающим считыванием, содержащая два вентиля записи  $J_1$  и  $J_2$  и вентиль считывания  $J_3$ . С вентилями записи индуктивно связана разрядная шина. Обращение к ЗЭ (выборка) производится подачей тока записи  $I_w$  в разрядную шину и тока смещения  $I_b$  в числовую шину. Направление тока в разрядной шине изменяется в соответствии с записываемой информацией: при записи "0" переключается вентиль  $J_1$  и в запоминающем контуре ток циркулирует по часовой стрелке; при записи "1" переключается вентиль  $J_2$  и в запоминающем контуре ток циркулирует против часовой стрелки. В другом варианте этой ячейки с каждым вентиляем записи связана отдельная разрядная шина и ток записи подается в одну из них в соответствии с записываемой информацией. Считывание осуществляется благодаря магнитной связи между запоминающим контуром и вентиляем считывания  $J_3$ . Магнитный поток в запоминающем контуре модулирует критический ток  $I_0$  вентиля считывания. При  $I_0 < I_s$ , где  $I_s$  — ток в шине считывания, вентиль считывания переключается в резистивное состояние. Возникновение напряжения на считывающей шине указывает на наличие в ЗЭ логической "1".

В первых конструкциях ЗЭ с неразрушающим считыванием в качестве вентиляей  $J_1-J_3$  использовались распределенные ДП. Время записи информации  $\tau$  определялось временем перераспределения тока в сверхпроводящем контуре индуктивности  $L$ :  $\tau \sim L/R$ , где  $R$  — сопротивление вентиля записи в нормальном состоянии. В первых конструкциях ЗЭ, где величина записываемого магнитного потока  $\Phi \sim 100 \Phi_0$ , время записи определялось размером ячейки и составляло  $\tau \sim 600$  пс. С уменьшением размеров и переходе к одноквантовому режиму работы  $\tau$  уменьшилось до десятков пикосекунд.

Рассмотрим в качестве примера ЗЭ с неразрушающим считыванием, работающим в одноквантовом режиме [14, 16]. На рис. 5, а приведена схема ЗЭ, содержащая

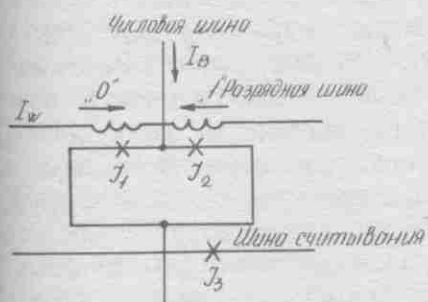


Рис. 4. Эквивалентная схема ЗЭ с неразрушающим считыванием

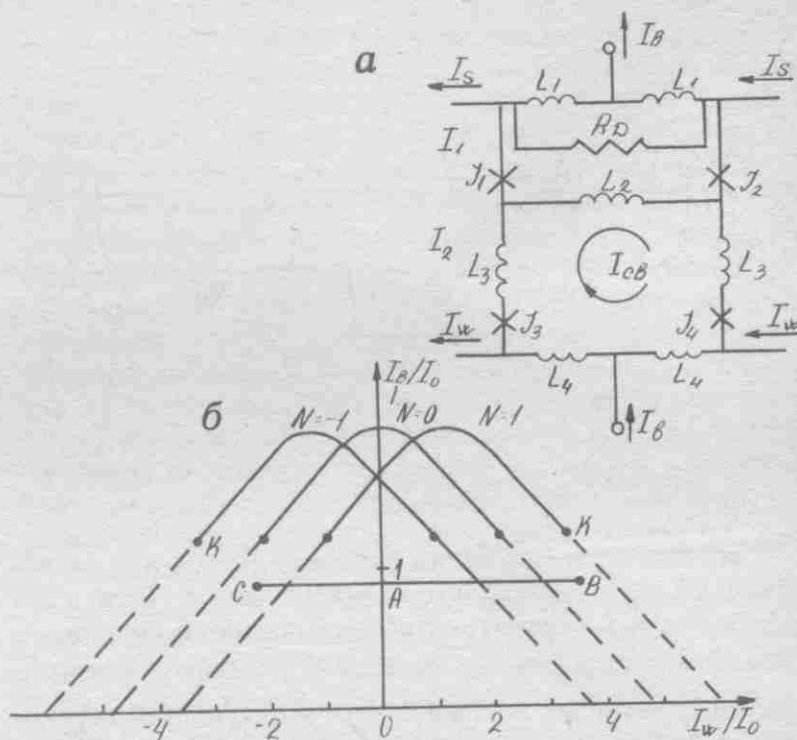


Рис. 5. Одноквантовый элемент памяти с неразрушающим считыванием информации: а — эквивалентная схема; б — управляющая схема интерферометра записи и схема записи-считывания. Запись «1» осуществляется по пути ОАВ (мода  $N=1$ ), запись «0» по пути ОАС (мода  $N=0$ )

щая два гальванически связанных интерферометра  $I_1$  и  $I_2$ , первый из которых служит для считывания, а второй — для хранения информации. Наличие или отсутствие информации идентифицируется с наличием кванта магнитного потока в интерферометре  $I_2$ . Запись "1" осуществляется при одновременной подаче тока смещения  $I_b$  и тока записи  $I_w$  (рис. 5, б). Их амплитуды выбраны так, что при записи происходит пересечение границы между модами  $N=0$  и  $N=1$ , где  $N$  — число квантов магнитного потока. При этом пересечение должно произойти ниже критической точки  $K$ , которая определяет максимальное значение  $I_b$ , выше которого пересечение границы мод приводит к переключению интерферометра в резистивное состояние. Записанный в контур интерферометра  $I_2$  квант магнитного потока и связанный с ним циркулирующий ток  $I_{cl}$  сохраняются и после выключения токов  $I_b$  и  $I_w$ . При записи в контур интерферометра "0" направление тока  $I_w$  меняется на противоположное. Область допустимых значений рабочих токов определяется границами модовых состояний, которые в свою очередь определяются значениями индуктивностей интерферометра и положением критических точек  $K$ . Для устойчивого процесса записи и считывания необходимо достаточно большое расстояние между границами мод (0-1) и (1-2). Это достигается при уменьшении общей индуктивности интерферометра  $I_2$ . С другой стороны, уменьшение индуктивности приводит к тому, что квант магнитного потока становится неустойчивым относительно тока  $I_b$ , если выполняется условие  $I_b/2 + I_{cl} > I_0$ ,  $I_{cl} = \Phi_0/L$ , где  $I_0$  — критический ток ДП  $J_1-J_4$ ,  $L$  — общая индуктивность интерферометра  $I_2$ . Уменьшение  $L$  ведет к увеличению  $I_{cl}$ , и как следствие этого — неустойчивости кванта магнитного потока при включении  $I_b$ . Вследствие этих требований существуют некоторые оптимальные значения индуктивностей  $L_1-L_4$ , которые определяются численными расчетами.

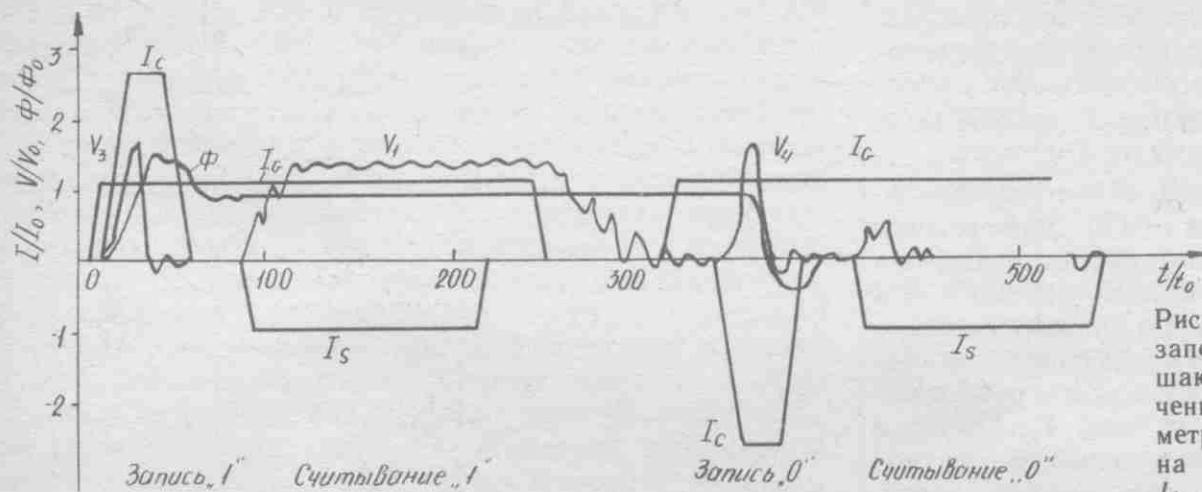


Рис. 6. Цикл записи-считывания для запоминающего элемента с неразрушающим считыванием.  $\Phi$  — захваченный магнитный поток в интерферометре записи;  $V_1, V_3, V_4$  — напряжения на джозефсоновских переходах  $J_1, J_3, J_4$

Таблица 5

Основные характеристики ЗУ с неразрушающим считыванием на ДП

Разработчик	NEC [41]	FUJITSU Lab. [42]	Electrotechnical Lab. [43]
Память, Кбит	1	4	1
Время выборки, пс	570	590	500
Тип периферийных логических элементов	RCJL	4JL	4JL
Число ДП	Более 10000	14468	8512
Размер ячейки, мкм×мкм	65×65	83×83	32×72
Размер кристалла, мм×мм	4,4×4,4	7,7×7,7	3,7×3,7
Рассеиваемая мощность, мВт	13	19	1,9

Считывание информации осуществляется при включении тока смещения  $I_b$  и тока считывания  $I_s$ . Если в интерферометре  $I_2$  хранится квант магнитного потока, то связанный с ним ток  $I_{c1}$  создает в интерферометре  $I_1$  дополнительный магнитный поток и последний переходит в резистивное состояние. Амплитуды тока смещения и тока считывания для  $I_1$  выбраны таким образом, чтобы переход произошел выше критических точек. Область работоспособности определяется в данном случае положением критических точек и значением максимального тока смещения, при котором квант магнитного потока в  $I_2$  становится неустойчивым. На рис. 6 приведен полный цикл записи-считывания, полученный методами численного моделирования в рамках резистивной модели [1]. В качестве параметров использованы характеристики экспериментальных образцов исследуемой ячейки:  $I_0 = 100$  мкА,  $R_n = 5$  Ом,  $R_j = 30$  Ом,  $L_1 = 2$  пГн,  $L_2 = 6$  пГн,  $L_3 = 20$  пГн,  $L_4 = 6,5$  пГн,  $v = 8$  [14]. Численное моделирование показало, что полный цикл записи-считывания может быть меньше 300 пс [14].

В других вариантах конструкций ЗЭ предлагалось использовать в качестве основного контура одноконтактный сквид, использовались вместо одной несколько разрядных шин, но основной принцип неразрушающего считывания оставался неизменным. Следует отметить, что реальная длительность операций записи-считывания определяется конструкцией дешифратора и способом организации матрицы ЗЭ в запоминающем устройстве (ЗУ) [9]. В табл. 5 приведены основные характеристики некоторых вариантов конструкций ЗУ на запоминающих элементах с неразрушающим считыванием.

На рис. 7, а приведена схема ЗЭ с разрушающим считыванием на двухконтактном интерферометре [9]. Для записи информации используется совпадение тока смещения  $I_b$  в числовой шине с током через ДП  $J_1$ , который наводится током  $I_w$  в разрядной шине. Принцип работы ЗЭ показан на рис. 7, б, где приведена его управляющая характеристика в координатах  $I_b - I_c$ , где  $I_c$  — суммарный управляющий ток. Рабочая точка А определяется током подмагничивания  $I_x$  и током смещения  $I_b$  в числовой шине таким образом, чтобы она попала в середину области перекрытия соседних мод. Размер области перекрытия можно регулировать, изменяя параметры  $L, I_0$ , где  $L$  — индуктивность контура интерферометра,  $I_0$  — критический ток ДП  $J_1$  и  $J_2$ . При записи в ЗЭ "1" ток  $I_w$  в разрядной шине складывается с током подмагничивания  $I_x$  и интер-

ферометр переключается из состояния  $N = 0$  в  $N = 1$ . Если пересечение границы мод происходит ниже критической точки  $K$ , то фаза ДП  $J_1$  изменится на  $2\pi$ , что сопровождается одиночным импульсом напряжения на  $J_1$  и захватом кванта магнитного потока в контур интерферометра. При записи "0" направление разрядного тока  $I_w$  меняется на противоположное, ДП  $J_2$  переключается с переворотом фазы на  $2\pi$  и квант потока выходит из контура интерферометра. Для считывания информации необходимо включить ток смещения  $I_b$  и ток  $I_w$ , как показано на рис. 7, б. В этом случае, если была записана "1", произойдет пересечение границы мод выше критической точки и интерферометр переключится в резистивное состояние. Если был записан "0", то пересечения модовой границы не произойдет и интерферометр останется в сверхпроводящем состоянии. Конфигурация ЗЭ с двухконтактным интерферометром является простейшей и предоставляет широкие возможности для повышения степени интеграции.

На сегодняшний день джозефсоновские ЗУ отличаются наилучшим показателем "быстродействие-мощность". Разработаны различные варианты быстродействующих джозефсоновских ЗУ с разнообразной системной архитектурой. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность выполнения операций записи-считывания при субнаносекундных временах доступа. Имеются проекты вычислительной системы на ДП, содержащей джозефсоновский процессор, быстродействующую джозефсоновскую память и полупроводниковую память большой емкости, работаю-

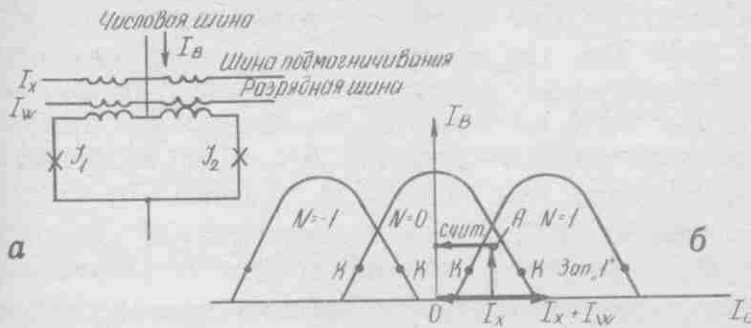


Рис. 7. Элемент памяти с разрушающим считыванием: а — эквивалентная схема; б — управляющая характеристика элемента памяти и схема записи-считывания

шую при температуре жидкого азота. Реализация этих идей в ближайшие годы представляется вполне возможной, по крайней мере в лабораторных образцах. Однако использование потенциала джозефсоновских 3Э в цифровой технике наиболее перспективно в устройствах, в которых время записи-считывания сопоставимо с временем переключения самого ДП. Это возможно в логических устройствах конвейерного типа, где обработка информации и ее хранение функционально совмещены [17]. Разработка основных принципов построения таких устройств на ДП находится в начальной стадии.

**Структуры на одиночных квантах магнитного потока.** Возможность использования структур на одиночных квантах магнитного потока для выполнения логических операций рассматривалась еще в начале 70-х годов. Одним из первых логических устройств такого рода был сдвиговый регистр, предложенный в 1973 г. Андерсоном и др. [18]. Он был реализован на пленках из сплавов свинца с туннельными ДП. Для получения безгистерезисных ВАХ ДП были зашунтированы тонкопленочными резисторами из молибдена. Отметим, что и далее при рассмотрении логических элементов на одиночных квантах магнитного потока предполагается, что ВАХ ДП безгистерезисная ( $\beta < 1$ ). Сдвиговый регистр представлял собой цепочку идентичных параллельно соединенных ДП. Кванты магнитного потока, идентифицируемые с битами информации, хранились в контурах, образованных двумя ДП. Сдвиг кванта осуществлялся инъекцией тока переноса непосредственно в ДП. Последовательность включения токов переноса, определяющая систему фазового питания, не рассматривалась. В более поздних работах, посвященных различным конструкциям сдвиговых регистров данного типа, вопросы организации системы фазового питания и особенности работы были проанализированы более подробно методами численного моделирования. Экспериментальные исследования показали функционирование регистра сдвига данного типа на частотах до 250 МГц [19], а по результатам численного моделирования скорость продвижения данных может достигать 12–15 пс/бит, причем основным фактором, ограничивающим быстродействие, является система фазового питания [20]. В регистрах этого типа данные заносятся только в первый разряд и выдаются из последнего. На практике подобные структуры могут использоваться для приема высокоскоростного потока данных и выдачи их с более низкой скоростью для последующей обработки. Сдвиговый регистр с параллельным считыванием данных может использоваться в качестве высокоскоростной буферной памяти, сопрягающей гигагерцовые сверхпроводящие схемы с мегагерцовыми полупроводниковыми [20].

В 1980 г. Тамута и другие предложили возможный вариант логических устройств на квантронах (квантовых интерферометрах) [21], в которых с помощью специальной системы питания квантроны подводятся близко к порогу срабатывания, после чего переключенные осуществляются за счет индуктивной связи с соседними элементами. Предложенная ими схема логического вентиля может выполнять операции "И" и "ИЛИ" в зависимости от уровня порога срабатывания квантрона, состояние которого определяется наличием квантов магнитного потока в соседних квантронах. Исследования экспериментальных образцов логических элементов данного класса показало возможность построения более сложных логических устройств, однако в дальнейшем этот тип схем не получил достаточного развития, главным образом из-за малых допусков на параметры и низкую помехозащищенность.

Более перспективным логическим элементом представляется предложенный в 1973 г. параметрический квантрон (ПК) [22], представляющий собой сверхпроводящий контур, замкнутый двухполюсником, состоящим из одного или нескольких ДП с управляемым критическим током. На рис. 8, а приведена эквивалентная схема ПК, содержащая индуктивность  $L$  и ДП  $J$  с управляемым критическим током  $I_c(t)$ , модуляция которого осуществляется тактирующим сигналом  $I_c(t)$ . В зависимости от величины  $I_c$  приведенная индуктивность ПК  $l = 2\pi \cdot I_c \cdot L / \Phi$  может изменяться в пределах, определяемых амплитудой тактирующего сигнала. Тем самым появляется возможность изменять состояние ПК, определяемое внешним магнитным потоком подмагничивания  $\Phi_e$ . На рис. 8, б показана зависимость полного магнитного потока  $\Phi$  в контуре ПК при некоторых значениях  $l$ . Перевод ПК из состояния "0" в состояние "1" осуществляется за счет уменьшения  $l < 1$ , а затем восстановлением ее прежнего значения при величине потока подмагничивания  $\Phi_e = \Phi_0/2 + \tilde{\Phi}$ , где  $\tilde{\Phi}$  — добавка, определяемая состоянием соседних ПК. Нетрудно видеть, что обратное переключение "1" — "0" осуществляется аналогично при  $\Phi = \Phi_0/2 - \tilde{\Phi}$ . Таким образом возможно выполнение мажоритарных логических операций и построение любых логических устройств [23]. В качестве ДП с управляемым критическим током можно использовать низкоиндуктивные ( $l = 1$ ) двух- или трехконтактные интерферометры.

Рассмотрим в качестве примера электрическую схему и работу регистра сдвига на ПК [12]. На рис. 9, а приведена электрическая схема сдвигового регистра на ПК, содержащая последовательно включенные квантующие двухконтактные интерферометры с индуктивностью  $2L$ , в которых могут храниться кванты магнитного потока. Роль ДП с управляемым критическим током играют двухконтактные неквантующие интерферометры с индуктивностью  $2L_1$ , критическим током



Рис. 8. Параметрический квантрон: а — эквивалентная схема; б — зависимость полного магнитного потока в контуре параметрического квантрона от внешнего магнитного потока

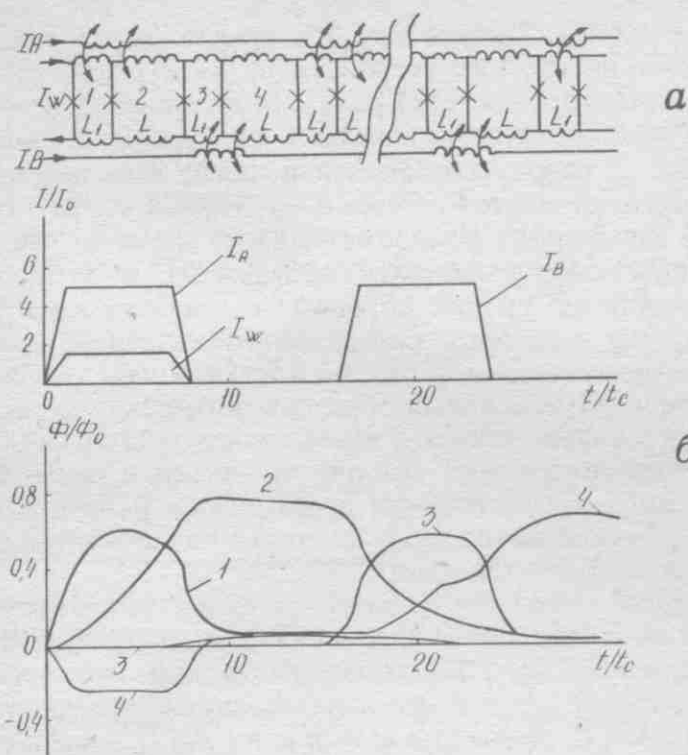


Рис. 9. Сдвиговый регистр на параметрических квантронах: а — эквивалентная схема; б — диаграммы управляющих токов и динамика магнитного потока

которых можно управлять за счет модуляции токов управления  $I_A$  и  $I_B$ . Шины управления А и В дополнительно индуктивно связаны с квантующими интерферометрами, как показано на рис. 9, а, благодаря чему в регистре создаются нарушающие симметрию дополнительные магнитные потоки  $\Phi_A$  и  $\Phi_B$ , обеспечивающие направленное продвижение квантов магнитного потока. Вводить информацию (т.е. квант магнитного потока) в регистр можно с помощью тока записи  $I_W$ . На рис. 9, б показаны диаграммы управляющих токов и динамика магнитного потока в регистре, полученные численным моделированием при следующих параметрах регистра:  $L = 9$  пГн,  $L_1 = 1,5$  пГн,  $I_0 = 0,1$  мА,  $R_n = 10$  Ом (сопротивление ДП в нормальном состоянии). Время  $t$  нормировано на характерное время ДП  $t_c = \Phi_0 / (2\pi R_n I_0) = 0,3$  пс. При включении токов  $I_A$  и  $I_W$  в первый квантующий интерферометр входит квант магнитного потока (2), который затем сдвигается в соседний квантующий интерферометр током  $I_B$  (4). Для считывания информации можно использовать индуктивно или гальванически связанный с ячейкой регистра интерферометр считывания, аналогично рассмотренному ранее ЗЭ с неразрушающим считыванием. Результаты численного моделирования [12, 14] показали, что при оптимальном выборе параметров регистра допуск на разброс критических токов могут достигать 40%, время переключения 1–3 пс, энергия диссипации при переключении составляет менее  $3 \cdot 10^{-20}$  Дж и определяется в основном длительностью фронта переключающего импульса и величиной дополнительных магнитных потоков  $\Phi_A$  и  $\Phi_B$ .

На рис. 10 представлены графики зависимости энергии диссипации  $E$  от длительности переключающего импульса  $t_s = 2t_\phi + t_0$ , где  $t_\phi$  — длительность переднего и заднего фронтов,  $t_0 = 5t_c$ , т.е. при переключении варьировалась только длительность фронтов. Энергия диссипации  $E$  вычислялась для различных значений  $\Phi_A$  и нормирована на  $E_c = I_c^2 \cdot R_n \cdot t_c$  — характерную

энергию ДП. При указанных выше параметрах  $E_c = 3 \cdot 10^{-20}$  Дж. На этом же рисунке показаны линии, соответствующие энергии тепловых флуктуаций  $k \cdot T$  при  $T = 4,2$  К, а также энергии, связанной с временем переключения соотношением  $E \cdot t_s = h$ , где  $h$  — постоянная Планка. При больших  $\Phi_A$   $E$  зависит от  $t_s$  слабо, что типично для силового переключения. С уменьшением  $\Phi_A$  и ростом  $t_s$  энергия диссипации уменьшается, выходя на постоянное значение, соответствующее диссипируемой энергии, связанной с  $\Phi_A$ . При  $\Phi_A < 0,02 \cdot \Phi_0$  энергия диссипации в широком диапазоне связана с  $t_s$  соотношением  $E \cdot t_s = \text{const}$ , что соответствует адиабатическому режиму работы [24]. Энергия диссипации может быть существенно меньше энергии тепловых флуктуаций и ограничена лишь квантовыми эффектами. Отметим, что здесь речь идет об энергии диссипации в одной ячейке, а не о полной энергии переключения, связанной с управляющими токами и диссипируемой вне рассматриваемой структуры. Функционирование регистра сдвига данного типа было экспериментально подтверждено, на изготовленных лабораторных образцах [13].

В логических элементах на ПК возможна организация обратимой обработки информации при экстремально низком энерговыделении [24]. ПК является единственным известным логическим элементом, допускающим такую возможность.

На основе регистров сдвига с параметрическим управлением возможна реализация целого ряда логических устройств [14]. На рис. 11 приведена функциональная схема коррелометра на основе двух сдвиговых регистров А и В и цепочки последовательно соединенных интерферометров считывания С, каждый из которых индуктивно или гальванически связан с интерферометрами хранения информации [15]. В этом случае для реализации логической операции "Исключающее ИЛИ" достаточно в одном из регистров кодировать информацию квантом потока, направление которого противоположно направлению кванта потока в другом

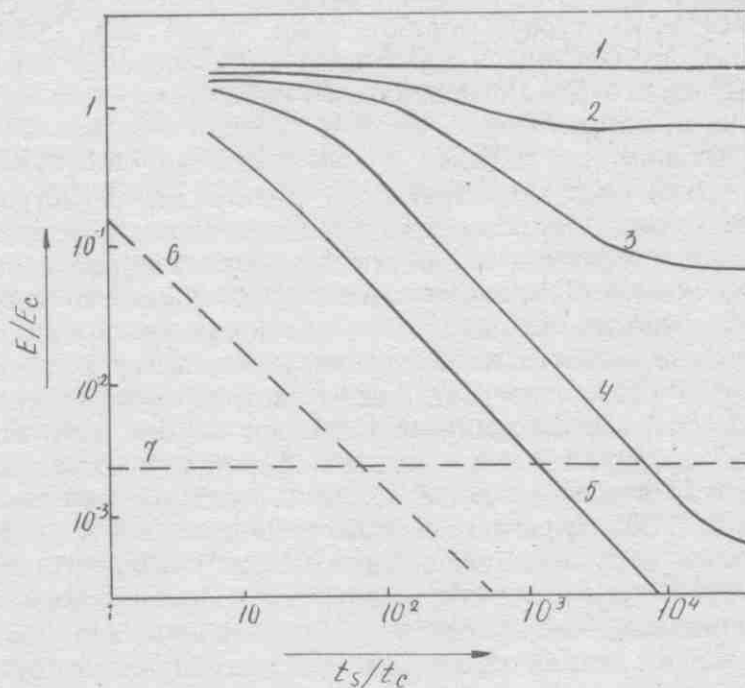


Рис. 10. Зависимость энергии диссипации  $E$  в сдвиговом регистре на параметрических квантронах от длительности переключающего импульса.  $\Phi_A/\Phi_0 = 0,4$  (1), 0,3 (2), 0,2 (3), 0,02 (4), 0,004 (5)

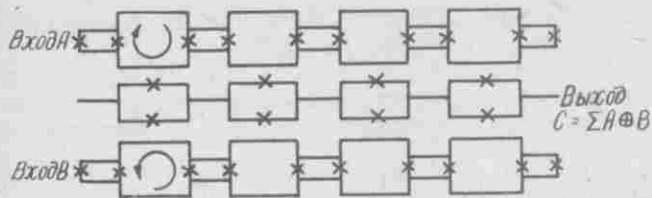


Рис. 11. Функциональная схема коррелометра на основе двух сдвиговых регистров

регистре. Суммарный магнитный поток в интерферометре считывания при наличии квантов потока в соседних ячейках будет нулевым (с точностью до разброса параметров). С помощью интерферометра считывания возможно поразрядное выполнение логической операции "Исключающее ИЛИ" над содержимым ячеек сдвиговых регистров. Если сместить рабочую точку интерферометра считывания, то напряжение на интерферометре считывания будет соответствовать выполнению логической операции "Исключающее ИЛИ-НЕ", т.е. напряжение возникает при совпадении соответствующих разрядов цифровых последовательностей, записанных в регистры сдвига. Таким образом происходит поразрядное сравнение (корреляция) двух цифровых отсчетов. При последовательном соединении интерферометров считывания выходной сигнал (напряжение) пропорционален корреляционной функции входных отсчетов.

Экспериментальный макет коррелометра был изготовлен на основе безгистерезисных ДП Nb-aSi-Nb [10, 14]. Два сдвиговых регистра по 16 бит каждый по конструкции были аналогичны описанному. Интерферометры считывания были соединены последовательно и индуктивно связаны с ячейками каждого из регистров. Исследование макета коррелометра на частотах — 10 кГц показало правильность его функционирования.

Реализация логических устройств на ПК сдерживалась двумя основными причинами. Во-первых, допуск на параметры элементов на ПК при объединении последних в логические схемы с помощью индуктивных связей значительно уменьшается (до менее 10%). Вторым недостатком является трехфазное или четырехфазное переменное питание, используемое также в качестве тактового сигнала. Проведенные численные расчеты показали, что допуски на разброс критических токов составляют 10–30% в зависимости от сложности логического элемента [25, 26]. Максимальные допуски (30%) у структур типа сдвигового регистра, которые имеют высокую степень однородности. У логических элементов с двумя и более входами допуски уменьшаются в 2–3 раза из-за взаимодействия ПК друг с другом, обусловленного магнитными или гальваническими связями. По существу проблема сводится к устранению перекрестных наводок при переключении ПК. Одним из возможных решений этой проблемы является ограничение числа связей между ПК и по возможности переход от четырех-трехфазного питания к трех-двухфазному. В работе [26] предложен подход, основанный на использовании дополнительных коммутирующих интерферометров, которые служат для отключения "лишних" связей и тем самым позволяют снизить их эффективное число, а также развязать входные и выходные цепи. Такое решение позволяет снизить допуски в 1,5–2 раза, однако при этом увеличивается число ДП, что приводит к уменьшению степени интеграции и возрастанию сложности схемы. Существуют и другие подходы, позволяющие уменьшить влияние перекрестных наводок и уменьшить допуски, например

предложенная в работе [27] конструкция ПК с питанием постоянным током.

Логические устройства на ПК позволяют в полной мере использовать потенциал устройств на ДП, однако говорить о реальных возможностях логических устройств этого типа рано, ввиду отсутствия к настоящему времени необходимых экспериментальных исследований.

Наиболее полно к настоящему времени исследована система логических элементов "Быстрой Одноквантовой Логике" (БОК-логики) на основе ДП с безгистерезисной ВАХ, реализующих импульсную форму представления информации [28]. В данном случае информация представляется возникающим при переключении ДП импульсом напряжения длительностью  $t$  и амплитудой  $V$ , которые связаны соотношением  $V \cdot t = \Phi_0 = 2,07$  мВ·пс. Такой импульс возникает при инжекции тока  $I_{in}$  в ДП с безгистерезисной ВАХ, с протекающим через него током смещения  $I_b$ , если выполняется условие  $I_{in} + I_b > I_0$ , где  $I_0$  — критический ток ДП. Поскольку переключение ДП связано с прохождением через него кванта магнитного потока, то такие импульсы можно легко запоминать, воспроизводить и передавать между отдельными элементами. Для передачи одноквантовых импульсов могут быть использованы сверхпроводящие микрополосковые линии либо джозефсоновские линии передачи (ДПЛ). ДПЛ представляют собой цепочку параллельно включенных ДП, соединенных сверхпроводящими индуктивностями  $L_i$  (рис. 12). Каждый из ДП, имеющий критический ток  $I_{oi}$ , смещен током  $I_{bi}$ . Если  $I_{bi} = 0,8 \cdot I_{oi}$  то при переключении 1-го ДП сформированный импульс напряжения будет репродуцирован всеми остальными ДП. Поскольку при репродукции импульсов их амплитуда остается неизменной (или незначительно возрастает при увеличении  $I_{oi}$  и одновременном уменьшении  $L_i$ ), нагрузочная способность элементов БОК-логики невелика. Для устранения этого недостатка был предложен одноквантовый расширитель (рис. 13) [29], в котором переключение ДП  $J_1$  вызывает одновременное переключение ДП  $J_2$  и  $J_3$ . Для хранения информации в структурах БОК-логики используется эффект квантования магнитного потока, как и в обычных сверхпроводниковых запоминающих элементах. На рис. 14 показана схема одноквантового RS-триггера на основе двухконтактного интерферометра. Индуктивность  $L$  и критический ток ДП  $J_3$  и  $J_4$  выбраны так, чтобы триггер имел два устойчивых состояния, различающихся направлением циркулирующего в интерферометре тока  $I_{cl}$  ( $2\pi L \cdot I_{cl} / \Phi_0 = 10$ ). Состоянию "0" соответствует направление тока против часовой стрелки, состоянию "1" — по часовой стрелке. Если одноквантовый импульс приходит на вход  $S$ , то он вызовет переключение перехода  $J_3$ , который смещен постоянным током  $J_b$  и током  $I_{cl}$ . Если теперь импульс приходит на вход  $R$ , то переключается ДП  $J_4$ , триггер переходит в исходное состояние "0" и на выходе генерируется импульс напряжения, который является выходным. Дополнительные ДП  $J_1$  и  $J_2$  служат для предотвращения сбоев в работе триггера.

Приведенные примеры иллюстрируют работу элементов БОК-логики и структур на их основе. Эти структуры имеют информационные и тактовые входы. Информация в них представляется наличием (или отсутствием) одноквантового импульса напряжения на ин-

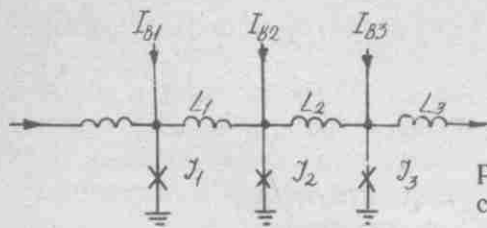


Рис. 12. Джозефсоновская линия передачи

Рис. 13. Эквивалентная схема БОК-расширителя

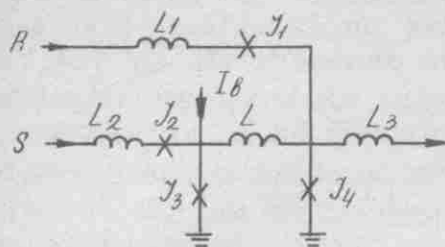


Рис. 14. Эквивалентная схема БОК RS-триггера

формационной шине в течение периода времени между двумя последовательными одноквантовыми импульсами на тактовой шине [29]. К настоящему времени были продемонстрированы некоторые логические устройства на основе элементов БОК-логики: Т-триггер с рабочей частотой 144 ГГц [30], буферный каскад и ячейка "ИЛИ" [31], регистры сдвига разрядностью от 4 до 256 бит [32]. Максимальная частота работы 4-разрядного сдвигового регистра составила 60 ГГц. Из более сложных устройств на основе БОК-логики были продемонстрированы одноквантовый умножитель напряжения [33] и 8-разрядный АЦП [34].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лихарев К.К. Введение в динамику джозефсоновских переходов.— М.: Наука, 1985.
2. A n a k e r W. Josephson computer technology: an IBM research project.— IBM J. Res. Dev., vol. 24, p. 107—112, 1980.
3. G u r v i t c h M., W a s h i n g t o n M., H u g g i n s H.A. High quality refractory josephson tunnel junctions utilizing thin aluminum layers. Appl. Phys. Lett., 1983, vol. 42, p. 472—474.
4. H a s u o S. Josephson integrated circuits II: high-speed digital circuits.— Fujitsu Sci. Tech. J., 1991, vol. 27, p. 28—58.
5. T a k a d a S., K o s a k a S. and H a y a k a w a H. Current injection logic gate with four junctions.— Proc. 11th Conf. Solid State Devices, Tokyo, 1979, p. 607—611.
6. F u j i m a k i N., K o t a n i S., I m a m u r a T., H a s u o S. Josephson modified variable threshold logic gates for use in ultra-high speed LSI.— IEEE Trans. Electron Devices, 1989, vol. ED-36, p. 433—446.
7. K o t a n i S., I m a m u r a T., H a s u o S. A subnanosecond clock josephson 4-bit processor.— IEEE J. Solid-State Circuits, 1990, vol. 25, p. 117—124.
8. H a s u o S., I m a m u r a T. Digital logic circuits.— Pros. of the IEEE, 1989, vol. 77, p. 1177—1193.
9. W a d a Y. Josephson memory technology.— Proc. of the IEEE, 1989, vol. 77, p. 1194—1207.
10. Гудков А.Л., Лихарев К.К., Махов В.И. Высококачественные джозефсоновские переходы Nb-Si-Nb.— Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, вып. 23, с. 1424.
11. Алфеев В.Н., Бахтин П.А., Васенков А.А. и др. Интегральные схемы и микроэлектронные устройства на сверхпроводниках.— М.: Радио и связь, 1985.
12. Зубков А.А., Лапир Г.М. Динамика квантов магнитного потока в периодических джозефсоновских структурах с параметрическим управлением.— Микроэлектроника, 1983, т. 12, вып. 3, с. 237.
13. Бахтин П.А., Зубков А.А., Махов В.И. и др. Исследование запоминающих элементов на одиночных

квантах магнитного потока.— Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1985, вып. 4, с. 9.

14. Зубков А.А., Махов В.И., Самусь А.Н. Функциональные микроэлектронные устройства на сверхпроводящих квантовых интерферометрах.— Микроэлектроника, 1990, т. 19, вып. 3, с. 221.

15. А.с. 1445483 (СССР) от 15.08.88. А.Л.Гудков, А.А.Зубков, А.Н.Самусь. Сверхпроводниковый регистр сдвига.

16. А.с. 1301197 (СССР) от 01.12.86. П.А.Бахтин, А.А.Зубков, В.В.Масалов, А.Н.Самусь. Элемент памяти.

17. Евреинов Э.В. Однородные вычислительные системы, структуры и среды.— М.: Сов. Радио, 1981.

18. A n d e r s o n P.W., D y n e s R.C., F u l t o n T.A. Josephson flux quantum shuttles.— Bull. Am. Phys. Soc., 1971, vol. 16, N 3, p. 399.

19. J u t z i W. et al. Experimental SFQ interferometer shift register prototype with josephson junctions.— IEEE El. Dev. Lett., 1983, vol. EDL-4, p. 49.

20. P r z y b y s z J.X. Josephson shift register.— Proc. of the IEEE, 1989, vol. 77, p. 1274.

21. T a m u t a H., O k a b e Y., S u g a n o T. Proposal of single-flux-quantum logic device.— IEEE Trans. El. Dev., 1980, vol. ED-27, p. 2035.

22. Лапир Г.М., Лихарев К.К., Семенов В.К. Свойства сверхпроводящего кольца, замкнутого джозефсоновским контактом с изменяемым критическим током.— Письма в ЖТФ, 1976, т. 2, вып. 17, с. 809—814.

23. L i k h a r e v K.K.— IEEE Trans. Magn., MAG-13, 1977, p. 242—244.

24. L i k h a r e v K.K. Classical and quantum limitations on energy consumption in computation.— Int. J. Theor. Phys., 1982, vol. 21, N 3/4, p. 311—326.

25. L i k h a r e v K.K., R y l o v S.V., S e m e n o v V.K.— IEEE Trans. Magn., 1985, vol. MAG-21, p. 947.

26. Рылов С.В., Семенов В.К. Сверхпроводящие квантовые интерферометры как элементы с управляемой знакопеременной индуктивностью и их применение в параметрических квантронах.— Микроэлектроника, 1988, т. 17, вып. 3, с. 195—205.

27. L i k h a r e v K.K., R y l o v S.V., S e m e n o v V.K. DC powered parametric quantron.— Ext. abstr. ISEC 87, Tokyo, 1987, p. 135—137.

28. Муханов О.А., Семенов В.К. Об одной возможности передачи цифровой информации в структурах с джозефсоновскими контактами.— Препринт физического факультета МГУ, 1985, вып. 9.

29. L i k h a r e v K.K., S e m e n o v V.K. RSFQ logic/memory family: a new josephson-junction technology for subterahertz clock-frequency digital systems.— IEEE Trans. on Appl. Supercond., 1991, vol. 1, p. 3—28.

30. Hypres claims world's fastest 144 GHz toggle Flip-Flop.— Superconductor Week, 1992, vol. 6, N 7.

31. K w o n g Y.K., N a n d a k u m a r V. Experimental evaluation of some rapid single flux quantum cells.— IEEE Trans. on Appl. Supercond. 1993, vol. 3, p. 2666—2670.

32. M u k h a n o v O.A. Rapid single flux quantum (RSFQ) shift register family.— IEEE Trans. on Appl. Supercond., 1993, vol. 3, p. 2578—2581.

33. Каплуненко В.К. Быстрый одноквантовый умножитель напряжения на шунтированных джозефсоновских переходах.— СФХТ, 1991, т. 4, вып. 4, с. 629.

34. K a p l u n e n k o V.K. et al. Experimental implementation of SFQ NDRO cells and 8-bit ADC.— IEEE Trans. on Appl. Supercond., 1993, vol. 3, N 1, p. 2662—2665.

35. K u r o d a K. et al. 3.0 ps switching operation in ALL-Nb josephson logic gates.— Electronics Lett., 1987, vol. 23, N 4, p. 163—165.

36. K o t a n i S., F u j i m a k i N., I m a m u r a T., H a s u o S. A subnanosecond josephson 16-bit ALU.— IEEE J. of Solid-State Circuits, 1988, vol. 23, N 2, p. 591—596.

37. N a k a g a w a H. et al. A josephson 4-bit RALU for a prototype computer.— IEEE J. of Solid-State Circuits, 1989, vol. 24, N 4, p. 1076—1083.

38. H a t a n o Y. et al. A 4-bit josephson data processor chip.— IEEE J. of Solid-State Circuits, 1989, vol. 24, N 5, p. 1312—1316.

39. K o t a n i S., I n o u e A., I m a m u r a T., H a s u o S. An 8-bit josephson digital signal processor.— IEEE J. of Solid-State Circuits, 1990, vol. 25, N 6, p. 1518—1523.

40. H a t a n o Y. et al. A 1-GIPS josephson data processor.— IEEE J. of Solid-State Circuits, 1991, vol. 26, N 6, p. 880—883.
41. N a g a s a w a S. et al. 570-ps 13-mW josephson 1-kbit NDRO RAM.— IEEE J. of Solid-State Circuits, 1989, vol. 24, N 5, p. 1363—1371.
42. S u z u k i H., H a s u o S. Design of  $4K \times 1$ -bit josephson RAM using capacitively coupled cells.— IEEE Trans. 1991, vol. 74, N 4, p. 859—867.
43. K u r o s a w a I. et al. A 1-kbit josephson random access memory using variable threshold cells.— IEEE J. of

Solid-State Circuits, 1989, vol. 24, N 4, p. 1034—1040.

44. P e r n g-F e i Y. An experimental josephson digital correlator.— IEEE Trans. Appl. Supercond. 1992, vol. 2, N 3, p. 143—147.

45. T a k a d a S. et al. A multichip superconducting microcomputer ETL-JC1.— IEEE Trans. Magn., 1991, vol. 27, N 2, p. 2610—2617.

46. Y a n o S. et al. A 1-GHZ-Clock josephson microcomputer system.— IEEE Trans. Magn., 1991, vol. 27, N 2, p. 2618—2625.

## Вакуумная микроэлектроника на базе наноразмерных автоэлектронных катодов

В.И. МАХОВ

На базе предложенного в НИИФП автоэлектронного катода с туннельно-тонким диэлектриком решены основные вопросы стабильности работы катодов в широком диапазоне давлений при сверхнизких рабочих напряжениях. Созданы конструкции, микроприборов, использующие указанные автоэлектронные катоды.

Термин «вакуумная микроэлектроника» используется для описания приборов и компонентов с микронными и нанометровыми размерами, в которых движение электронов происходит без столкновения, т.е. в баллистическом режиме от электрода к электроду без потери энергии.

В настоящее время основой вакуумной микроэлектроники являются приборы, работающие на принципе автоэлектронной эмиссии (АЭ) [1]. Автоэлектронная эмиссия — это эмиссия электронов, испускающая поверхностью твердого тела под воздействием сильной напряженности поля  $E > 5 \cdot 10^7$  В/см. Главным преимуществом автоэлектронной эмиссии и катодов на ее основе являются безынерционность и стабильность работы при воздействии термо- и радиационных нагрузок. Эти преимущества привлекали многих исследователей к созданию на их базе различных приборов и устройств, особенно стабильно работающих в экстремальных условиях.

Общезвестны факторы, влияющие на стабильность автоэлектронного тока катодов (АЭК). Среди них основными являются:

— изменение геометрических параметров эмиттирующей поверхности под воздействием ионной бомбардировки катода;

— перестройка поверхности катода за счет миграции по поверхности, обусловленная высокой напряженностью электрического поля  $E > 10^7$  В/см;

— изменение работы выхода поверхности АЭК за счет адсорбции активных газов остаточной атмосферы.

Устранение указанных выше дестабилизирующих факторов автоэлектронной эмиссии позво-

лит решить проблему создания стабильных автоэлектронных катодов. Как правило, исследования в этой области были направлены на поиски отдельных частных решений, обеспечивающих увеличение срока службы и стабилизацию эмиссии с АЭК [2]. Разработки велись по следующим направлениям: создание в приборах с АЭК сверхнизких рабочих напряжений и сверхвысокого вакуума [3], применение ионных ловушек, использование стойких к катодному распылению материалов [4], а также материалов, обладающих низкой работой выхода [5] и стабильной, по отношению к адсорбции, поверхностью, например, хрома [6].

Подводя итоги этих работ, можно отметить, что все методы получения стабильных токов АЭК сводились к одному решению, а именно к необходимости создания низких рабочих напряжений и идеальных вакуумных условий с давлением остаточных газов ниже  $P < 10^{-12}$  Па, благодаря чему устранялись бы процессы ионной бомбардировки катода и адсорбции газов. Однако на практике подобные условия в реальных электронных приборах создать очень сложно и не экономично.

Вместе с тем, анализ выполненных ранее работ показывает, что создание универсального катода для широкого класса приборов, работающих в различных эксплуатационных условиях, практически невозможно. Поэтому успешное использование автоэлектронной эмиссии и катодов на ее основе возможно только при комплексном подходе создания конструкции как катода, так и прибора в целом.

Рассмотрим комплексное решение основных проблем, обеспечивающих стабильную эмиссию с автоэлектронного катода.

**Устранение процессов ионной бомбардировки АЭК.** Ионная бомбардировка действует во время работы автоэмиссионного прибора тем сильнее, чем больше ток и чем хуже вакуум [2]. Для обеспечения стабильности АЭК в широком диапазоне давлений газов необходимо устранить

ионное распыление поверхности АЭК, понижая его рабочее напряжение [7]. Возникновение ионов в автоэлектронном приборе связано в основном с ударной ионизацией эмиттированными электронами остаточных газов, находящихся как в межэлектродном пространстве, так и на поверхности электродов. Однако подобная ионизация возможна, если энергия электрона превышает пороговую энергию ионизации  $U_i$  молекулы газа. Величина пороговой ионизации молекул колеблется от 12,5 до 24,5 В для молекулы кислорода и гелия соответственно. Максимальная энергия, которую может получить электрон за счет поля в межэлектродном пространстве, однозначно связана с величиной анодного напряжения. Следовательно, ионная бомбардировка поверхности катода будет отсутствовать, если рабочие напряжения автоэлектронного прибора  $U_p$  не превышают минимального значения потенциала ионизации  $U_i$  газов в рабочем объеме. В случае атмосферного воздуха ионная бомбардировка будет отсутствовать при  $U_i < 12,5$  В. Если работа выхода АЭК не зависит от давления присутствующих газов, то максимальная величина допустимого давления в рабочем объеме автоэлектронного прибора будет связана с баллистическим движением электронов в межэлектродном пространстве, т.е. движением, при котором допустимо незначительное рассеяние эмиттированных электронов на молекулах газов. Заметное рассеяние электронов будет наблюдаться, когда характерный размер прибора будет превышать длину свободного пробега электрона в данном газе (квазибаллистический режим работы) [8]. При комнатной температуре и давлении в 1 атм длина свободного пробега электрона в воздухе составляет 0,4 мкм, в гелии — 1 мкм. Из этого следует, что снижение рабочих напряжений автоэлектронного прибора ниже потенциала ионизации молекул газов позволяет значительно расширить допустимый диапазон давлений газов для некоторых типов приборов, вплоть до атмосферного и выше [9].

Отсутствие ионного распыления позволяет управлять состоянием поверхности АЭК с целью улучшения и стабилизации эмиссионных свойств. В частности, появляется возможность создания оптимальной конфигурации и микрошероховатости поверхности АЭК [10], снижения работы выхода за счет введения легирующих примесей [11].

Получение столь низких рабочих напряжений ( $U_{\text{раб}} < U_i$ ) удалось благодаря решению вопросов технологии, обеспечивающих создание самосовмещенных суб- и наномикронных зазоров максимального значения форм-фактора АЭК, сохраняя при этом его механическую устойчивость к пондеромоторным нагрузкам [12]. Однако проблемы изменения выхода и перестройки поверхности под воздействием адсорбции и пондеромоторных нагрузок остаются нерешенными.

**Автоэлектронный катод с туннельно-тонким слоем диэлектрика.** Если исходить из природы

автоэлектронной эмиссии, то для АЭК, обладающих более высокой работой выхода, для получения заданных токов необходимо приложить более высокие рабочие напряжения, что в принципе не выгодно для материала катода, так как с увеличением рабочего напряжения появляется вероятность ионной бомбардировки, к тому же пропорционально квадрату напряженности поля

возрастают пондеромоторные нагрузки  $F = \frac{E^2}{8\pi}$ ,

где  $E$  — напряженность поля,  $F$  — механическая нагрузка. Использование АЭК с малой работой выхода дает ряд преимуществ при его эксплуатации. Общеизвестны методы снижения напряженности поля  $E$  за счет уменьшения работы выхода АЭК, заключающиеся в нанесении на рабочую поверхность эмиттера пленки щелочных и щелочноземельных материалов. Однако эмиссионные характеристики подобных АЭК во времени весьма нестабильны в результате десорбции с поверхности АЭК атомов электроноположительных металлов. Десорбцию атомов электроноположительных металлов с эмиттирующей поверхности можно предотвратить, если поверхность катода покрыть туннельно-тонким слоем диэлектрика ( $d=20 \text{ \AA}$ ) [13—15] (рис. 1).

В подобной конструкции АЭК адсорбированные газы, находясь на поверхности диэлектрического слоя, не влияют на стехиометрию границы раздела эмиттирующая поверхность + туннельный слой диэлектрика, тем самым работа выхода АЭК остается неизменной в течение длительного времени. При приложении поля к такому АЭК электроны, вышедшие с поверхности, туннелируют сквозь диэлектрический слой в вакуум.

Использование туннельного слоя диэлектрика, нанесенного на поверхность АЭК, устраняет еще одну причину, приводящую к изменению тока АЭЭ, а именно — обострение эмиттирующей поверхности рабочего торца вследствие поверхностной миграции частиц в электрическом поле.

Надежность автокатодов с подобными покрытиями зависит от устойчивости слоев по отношению к объемным электромеханическим силам  $E^2/8\pi$ . Прочностные качества слоев, отвечающие их устойчивости, как следует из приведенных количественных оценок, свойственны не многим применяемым на практике диэлектрическим пленкам. Из этого вытекает необходимость оптимального подбора диэлектриков с учетом их электрофизических параметров [12].



Рис. 1. Автоэлектронный катод с туннельным слоем диэлектрика



**Создание самосовмещенных субмикронных зазоров и АЭК.** Создание низковольтных приборов с автоэлектронными катодами, не возможно без решения проблемы получения самосовмещенных субмикронных зазоров между электродами. Многие исследователи решают подобную проблему различными путями: за счет косо-го и прямого напыления [16], химическим подтравливанием с последующим осаждением пленки управляющего электрода.

Сложность создания подобных зазоров для автоэлектронных приборов заключается в специфике их конструкций, которая накладывает определенные требования на технологию, а именно: подобные зазоры необходимо создать между разнотолщинными электродами, к тому же изготовленными из различных материалов.

Современными методами фотолитографии, рентгено-, электроно- и ионолитографии подобная проблема не решается. Для создания стабильных и воспроизводимых субмикронных зазоров используется метод [17], заключающийся в создании буферного слоя 3 между рабочими 1 и 2 пленками (рис. 2), с последующим его удалением (рис. 2). Этот метод позволяет получить воспроизводимые самосовмещенные зазоры между пленками менее 0,05 мкм как в однослойных, так и в многослойных структурах и на любой площади.

Экспоненциальная зависимость тока автоэлектронной эмиссии от геометрических размеров и работы выхода АЭК накладывает определенные жесткие ограничения на допуски и воспроизводимость электрофизических параметров. Разброс по величине форм-фактора геометрии катода или работы выхода между отдельными пленками или остриями не должен превышать 1%, а в случае пленочных АЭК — не более 2%. Указанные условия были выполнены при использовании хорошо отработанных как в научном, так и в техническом плане групповых методов интегральной технологии [18]. В основе метода лежит резкое снижение скорости травления кремния в анизотропных травителях при повышении концентрации легирующей примеси, например, бора.

Как показали эксперименты, с помощью указанного метода возможно воспроизводимое получение катодов с заданным радиусом ниже 50 Å.

**Конструкция микроприборов с АЭК.** Конструкция приборов на основе автоэлектронных катодов во многом определяется степенью проработки технологии. В настоящее время прорабатываются две известные конструкции. Это комп-

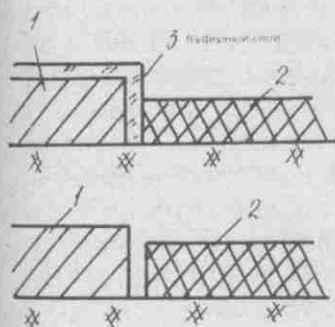


Рис. 2. Создание самосовмещенных зазоров с помощью буферных слоев

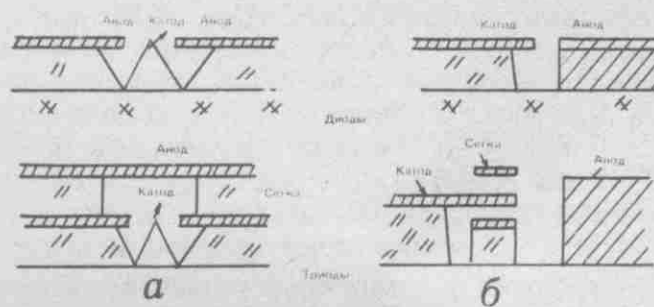


Рис. 3. Конструкции диодов и триодов: а — компланарная; б — планарная

ланарная и планарная конструкции диода и триода (рис. 3). Компланарная конструкция (рис. 3,а), известная как катод Спиндта, представляет собой вертикальный по отношению к подложке острый автоэлектронный катод и разделенный зазором управляющий пленочный электрод и анод, расположенные параллельно подложке. Впервые планарная конструкция была предложена В.В.Чесноковым [19], в ней катод и анод выполнены из пленок и расположены в одной плоскости, параллельной поверхности подложки. Преимущества той или иной конструкции, то можно отметить меньшую межэлектродную емкость, а следовательно, и более высокое быстродействие планарной конструкции по сравнению с компланарной.

**Стабильность микроприборов с автоэлектронными катодами.** Вольт-амперные характеристики и стабильность работы приборов с автоэлектронными катодами в конечном итоге определяют возможность создания на их основе те или иные интегральные схемы и устройства. В нашем случае для исследования вольт-амперных характеристик и их стабильности использовались различные конструкции диодов с рабочими напряжениями на уровне близких к потенциалу ионизации газов  $U_{\text{раб}} \approx U_i$ . Наиболее полной характеристикой кратковременной стабильности тока АЭК является отношение средней величины флуктуаций тока  $\Delta i$  к среднему значению тока  $i$ .

На рис. 4 представлена зависимость  $\Delta i/i = f(U)$ , полученная в катодной ячейке с навесным анодом, расположенным от вершины кремниевых пленочных АЭК на расстоянии 0,6 мкм, при атмосферном давлении и при  $P=5 \cdot 10^{-2}$  мм рт.ст. Из представленных зависимостей следует, что при  $U=15$  В величина  $\Delta i/i$  не зависит от давления воздуха и составляет менее 0,01. При дальнейшем увеличении при  $P=5 \cdot 10^{-3}$  мм рт.ст. величины  $i/i$  остаются на среднем уровне, а при  $P=1$  атм наблюдается резкое увеличение  $\Delta i/i$ , величина которого при  $U=17$  В достигает уже  $\Delta i/i=0,1$  [17].

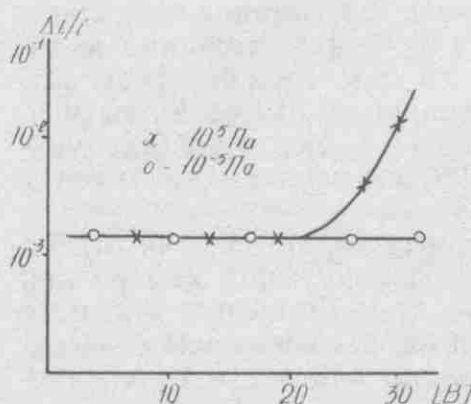


Рис. 4. Зависимость флуктуаций тока автоэлектронного катода от рабочего напряжения и вакуума

Временная зависимость тока АЭК при атмосферном давлении была измерена в катодной ячейке с пленочным АЭК высотой 1 мкм и толщиной 0,1 мкм. Сравнение ВАХ диодной структуры, снятых до начала испытаний и через 10000 часов испытания, показывает, что величина форм-фактора АЭК осталась неизменной, а абсолютные значения тока изменились на 5%.

**Конструкция и вольт-амперные характеристики матричных автокатодов (МАЭК).** Матричные автоэлектронные катоды представляют собой многослойную структуру. Площадь таких автокатодов в принципе может быть любой, так как матрица набирается из множества отдельных автоэмиссионных ячеек, реальная же их площадь ограничивается как степенью совершенства материала, так и уровнем проработки отдельных технологических операций. Величина отбираемого тока определяется площадью матричного автоэлектронного катода, плотностью расположения ячеек и величиной тока с единичного острия (лезвия). Ток с единичного катода определяется его геометрическими параметрами. В работе [20] были проведены теоретические оценки геометрических размеров и расположения электродов относительно друг друга с целью получения наиболее оптимальных параметров по управляющему напряжению и токов катодных ячеек. Было показано, что величина автоэмиссионного тока очень критична к изменению геометрических размеров острия, диаметру отверстия управляющего электрода и в меньшей степени зависит от расположения острия по отношению к управляющему электроду. Поэтому для получения высокой эффективности матричных АЭК по току необходимо, во-первых, с высокой точностью реализовать оптимальные размеры ячейки и, во-вторых, добиться высокой воспроизводимости этих параметров во всех ячейках матрицы, что можно получить, используя самовоспроизводимые и самоконтролируемые процессы групповой технологии.

Матричный автоэлектронный катод представлен на рис. 5. Он имеет кремниевые конусы (лезвия) эмиттеры, расположенные таким образом, что вершина острия или выступает над плоскостью вытягивающего электрода или находится на его уровне.

Основой катода является кремниевая подложка. Диэлектрическая изоляция, отделяющая подложку от вытягивающего электрода, состоит из слоев двуоксида кремния и окиси алюминия. Толщина диэлектрической изоляции выбиралась с таким условием, чтобы исключить пробой между катодом и вытягивающим электродом, при подаче повышенного потенциала на электроды она составляет 1,5—2 мкм, толщина вытягивающего электрода 0,2 мкм. Радиус сферы острия  $r \leq 0,03$  мкм, расстояние до отверстия вытягивающего электрода 0,3—0,4 мкм, площадь упаковки  $4 \cdot 10^6$  см<sup>-2</sup>. Сетка выполнена из пленки ниобия.

Снятие вольт-амперных характеристик МАЭК проводилось в разборной вакуумной камере при вакууме  $10^{-5}$ — $10^{-6}$  мм рт.ст. Значение анодного тока при напряжении на вытягивающем электроде 50 В соответствовало плотности тока эмис-

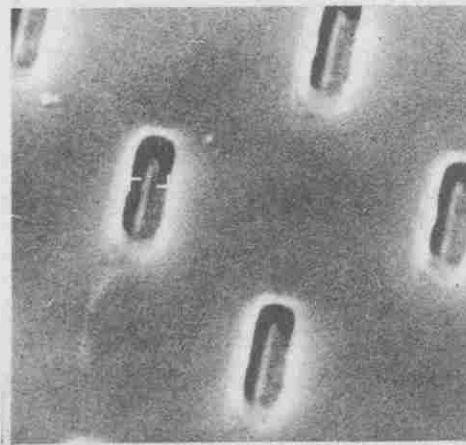


Рис. 5. Матричный автоэлектронный катод

сии матрицы  $J=4$  А/см<sup>2</sup>, флуктуации тока эмиссии не превышали  $\pm 10\%$  от среднего значения.

На базе матричных АЭК совместно с НИИ «Волга» были изготовлены экспериментальные образцы плоских экранов. Перспективность плоских экранов на базе матричных АЭК несомненна, они найдут широкое применение почти во всех областях использования отображающих устройств (от дисплеев ЭВМ до больших настенных экранов), где необходимы высокая разрешающая способность, яркость, экономичность, простота изготовления и высокая стабильность при работе в широком интервале температур.

**Микротриоды с нанометровыми автоэлектронными катодами.** Исследования вольт-амперных характеристик триодной структуры проводились на конструкции триода, показанной на рис. 3,а. Структура триода представляла собой матричный катодный узел, содержащий  $10 \times 10$  острий катодов, расположенных с шагом 4 мкм и радиусом острия менее 0,03 мкм, диаметр отверстия в сетке 0,8 мкм, вершина острий находилась на уровне управляющего электрода. Расстояние между анодом-сеткой и катодом-сеткой составляло 0,4 мкм. Анод представлял собой кремниевую пластину размером  $1,0 \times 1,0 \times 0,3$  мм, наложенную на катодную матрицу с управляющим электродом и электрически развязанную с ней слоем окиси алюминия толщиной 0,4 мкм.

На рис. 6 представлены анодно-сеточные характеристики указанной структуры. Как видно из рисунка, диапазон изменения величин рабочих напряжений для сетки составлял 0—4 В, для анода 10—25 В, что позволяло проводить измерения при повышенных давлениях. Измерения характеристик проводились при давлении  $10^{-1}$  Па. Значения коэффициента усиления в такой структуре, вычисленное из семейства анодно-сеточных характеристик соответствовало  $K=8,3$ .

Для проверки стабильности функционирования триодной структуры были проведены временные испытания. Отклонения тока эмиссии от среднего значения  $i=1$  мкА не имели монотонного характера на всем временном диапазоне в течение  $t > 1000$  часов, что указывало на отсутствие каких либо деградиционных механизмов, обуславливающих изменение эмиссионных характеристик триода. Проведенные исследования триодных структур различных конструкций показывают на возможность оптимизации их геометрических размеров для получения более высоких эксплуатационных параметров.

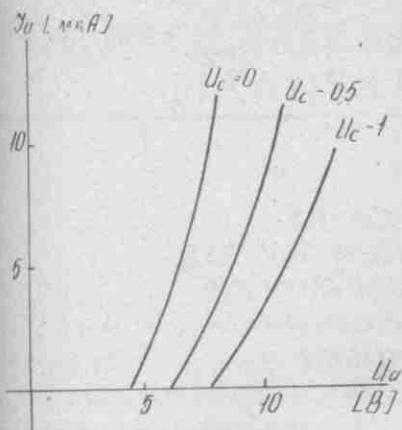


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики триодной структуры

**Оценка предельных эксплуатационных возможностей низковольтных автоэмиссионных приборов и ИС на их основе.** Процесс переключения в полупроводниковом логическом венти́ле заключается в принципе в заряде и емкости нагрузки транзисторным переключателем. Фактически время переключения складывается из трех компонентов:  $td_1$  — задержки на собственное переключение в транзисторе, которое является следствием конечной скорости переноса электронов (для транзистора с размерами электронов 1 мкм и менее это время составляет меньше 10 пс, независимо от технологии (GaAs, Si));  $td_2$  — задержки вследствие паразитных сопротивлений контактов, металлизации, неактивных участков кремния и т.д., а также частично вследствие емкости самого прибора ( $td_2$  также не превышает 10 пс) и  $td_3$  — задержки, обусловленные межсоединениями и нагрузками на входе и выходе, которые по величине могут в 10 раз превышать  $td_1$ . Заряд нагрузки будет происходить тем быстрее, чем выше плотность тока.

Поскольку быстродействие схемы определяется в большей мере задержкой сигнала в токоведущих линиях, чем временем переключения и задержки самого транзистора, то для оптимизации рабочих характеристик следует не только увеличить скорость переключения, но и добиваться снижения рассеиваемой мощности, чтобы можно было увеличить плотность упаковки. Таким образом, важным показателем качества переключающей схемы является произведение мощности на время задержки, измеряемое обычно в пико- и фемтоджоулях.

Для случая  $R=1$  мкм и  $U=50$  В,  $\tau=3 \cdot 10^{-14}$  с, что является крайне малой величиной, поэтому быстродействие такого триода с учетом активной и реактивной составляющих сопротивления будет соответствовать величине  $\tau \sim 10^{-11} - 10^{-12}$  с. Если оценить энергию переключения, равную  $Q=0,24 P=0,24 IU_{\text{раб}}$  (Дж), то она будет лежать в пределах от  $10^{-5}$  до  $10^{-7}$  Дж. Таким образом, произведение мощности на время задержки для микроприборов с автоэлектронными катодами составит  $pt=10^{-16} - 10^{-19}$  Дж/с, что по порядку величин не уступает джоуль-секундному приборам и превосходит полупроводниковые приборы по эксплуатационным параметрам.

Анализируя результаты исследований в области вакуумной микроэлектроники, можно отметить, что в настоящее время успешно разви-

вается ее новая перспективная область на базе автоэлектронных катодов. Уже сейчас получены СВЧ приборы с мгновенным запуском в рабочий режим [21], появились первые промышленные образцы плоских цветных катодолуминесцентных экранов с размерами  $10 \times 10 \times 0,2$  см и плотностью катодов более  $10^4$  см $^{-2}$ . Нанометровые автоэлектронные катоды с туннельно-тонким диэлектрическим слоем открывают новые возможности для построения вакуумных ИС и других электронных приборов на их основе.

Приборы, созданные на базе таких катодов, обладают качествами полупроводниковых и вакуумных приборов, сочетая достоинства тех и других по миниатюризации, быстродействию, экономичности и способности работать в экстремальных условиях и в широком диапазоне давлений, включая атмосферное. С их помощью можно решить многие народно-хозяйственные задачи, недоступные для других технологий. Это весьма важная проблема, которую необходимо решать в рамках Комплексной целевой государственной программы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шоулдерс К.Р. Микроэлектроника и большие системы. Комплексные системы на миниатюрных электровакуумных приборах: Под ред. В.Г.Толстого.— М.: Мир, 1967, с. 119—144.
2. Елинсон М.И., Васильев Г.Ф. Автоэлектронная эмиссия.— М.: Физмат. изд., 1953.
3. Spindt C.A. Producing field ioniser and field emission cathode structures.— I.A.P., 1968, vol. 39, p. 3504.
4. Вагнес G.— Phys. Rev., 1955, vol. 97, p. 1579.
5. Елинсон М.И.— Радиотехника и электроника, 1958, т. 3, № 3, с. 438.
6. Бондаренко Б.В.— Журнал технической физики, 1973, т. 43, с. 2441.
7. Махов В.И.— Тезисы I-ой Всес. конф. «Физические и химические проблемы в микроэлектронике», Вильнюс, 1987.
8. Махов В.И.— Труды 2-ой Межд. конф. по вакуумной микроэлектронике, 1989, Англия.
9. Махов V.I.— Technical Digest IVMC 91, August 22—24, Nagahama, Japan.
10. Махов V.I., Духев N.A., Козлов A.I.— Abstr. 1-st IVMC, Williamsburg, USA.
11. Махов V.I., Духев N.A. Proceedings 1994—TRI-service. NASA Cathode Workshop, Cleveland, Ohio, 1994, USA.
12. Еремченко Д.В. Механизмы устойчивости тонкопленочных автоэмиссионных структур с диэлектрическим покрытием.— Автореферат диссертации, М., 1987.
13. А.с. 1038567 (СССР)/В.И.Махов, В.А.Афанасьев, Б.В.Бондаренко, Н.А.Дюжев. 1982.
14. Махов В.И., Духев Н.А., Пинаев И.В.— Тезисы XIX Всес. конф. по эмиссионной электронике.— Изд-во ФАН, Ташкент, 1984, с. 230.
15. Махов V.I., Федирко V.A., Духев N.A., Кагмина S.A.— Technical Digest IVMC 91, Nagahama, 1991, Japan.
16. Чесноков В.В., Гайлес В.М., Домакина А.М.— Известия Академии Наук, 1976, № 40, с. 1585.
17. А.с. 3545216 (СССР)/В.И.Махов, Б.В.Бондаренко, В.П.Лаврищев, 1975.
18. А.с. 701390 (СССР), Н.А.Дюжев, В.А.Колясников, В.И.Махов, В.П.Шевалдина, Б.В.Бондаренко.
19. Чесноков В.В.— Электронная техника. Сер. Приемно-усилительные лампы, 1968, вып. 3, 4.
20. Spindt C.A., Hollond C.E., Posengreen A., Rodie I.— Technical Digest IVMC 91, Nagahama, Japan, 1991.
21. Корюлов М.Ф., Вондагенко В.В., Махов V.I.— Technical Digest IVMC 91, Nagahama, Japan, 1991.

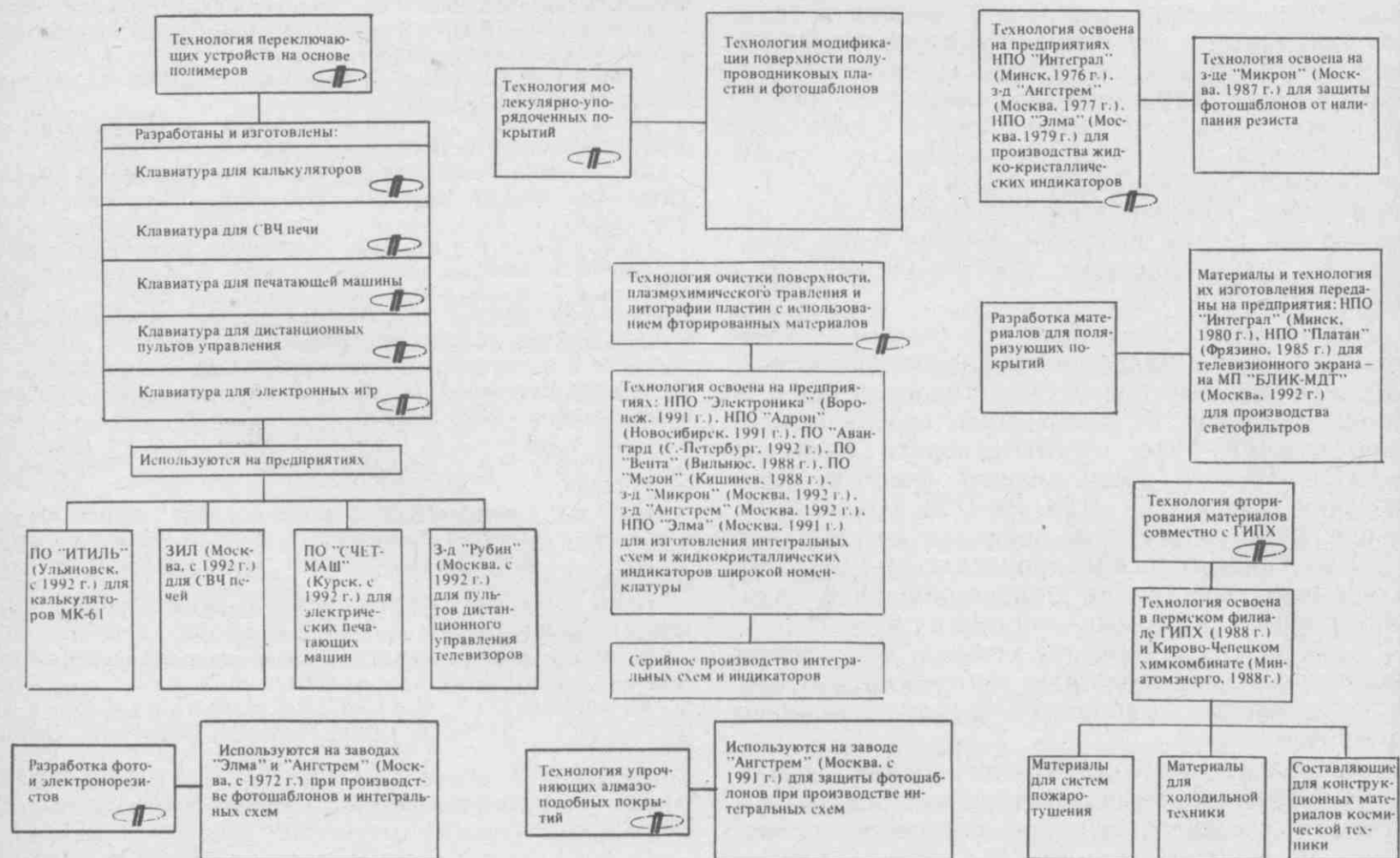
В ПОСЛЕДНИЕ ГОДЫ ТЕХНОЛОГИИ ИНСТИТУТА НАПРАВЛЯЛИ СВОИ УСИЛИЯ НА РАЗРАБОТКУ КОНЦЕПЦИИ СУБМИКРОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ ПОСТЕПЕННЫЙ ПЕРЕХОД К НАНОТЕХНОЛОГИИ. ОСНОВОЙ ЭТОЙ ТЕХНОЛОГИИ МОЖЕТ СТАТЬ ШИРОКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ, КЛАСТЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ, А ТАКЖЕ ВНЕДРЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ОБРАБОТКИ ПЛАСТИН.

В ОБЛАСТИ НАНОТЕХНОЛОГИИ ОКАЗАЛИСЬ ЦЕЛЕСООБРАЗНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ СОЗДАНИЯ НАНОСТРУКТУР МЕТОДАМИ РАСТРОВОЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ, ГАЗОФАЗНОГО ОСАЖДЕНИЯ, ФОРМИРОВАНИЯ ПЛЕНОК ЛЕНГМЮР-БЛОДЖЕТТ.

В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМЫ СУБМИКРОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ АКТИВНО ИСПОЛЬЗУЕТСЯ СИНХРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ, АНАЛИТИЧЕСКОЙ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ БАЗЫ, БЕЗ КОТОРОЙ НЕВОЗМОЖНО ИЗГОТОВЛЕНИЕ УЛЬТРАВИС, ОРГАНИЗОВАН ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ. ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ, РАЗВИВАЕМОЕ В ИНСТИТУТЕ, — МЕМБРАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОКОНСТРУКЦИЙ, В ТОМ ЧИСЛЕ ИЗДЕЛИЙ МИКРОМЕХАНИКИ, РЕНТГЕНОШАБЛОНОВ, ДАТЧИКОВ.

СОВМЕСТНО С РЯДОМ АКАДЕМИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ ВЫПОЛНЕНЫ ОРИГИНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОЗДАНИЮ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРОВОДЯЩИХ ПОЛИМЕРОВ ДЛЯ КОММУТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ, СЕНСОРОВ, ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОЕМКОСТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ, ЭЛЕКТРОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА, ЭЛЕМЕНТОВ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С СУБМИКРОННЫМИ КАНАЛАМИ.

САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ ИНТЕРЕС ПРЕДСТАВЛЯЮТ СОЗДАННОЕ В ИНСТИТУТЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ЛИТОГРАФИИ, МНОГИЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СТЕНДЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ.



# От субмикронной к нанотехнологии

Ю.С.БОКОВ, Б.С.БОРИСОВ, В.В.РАКИТИН, Н.С.САМСОНОВ

Развитие и реализация основных концепций субмикронной технологии создает базу в развитии нанотехнологии. Широкое использование радиационно-стимулированных процессов с управляемой низкой энергетикой активных частиц при формировании функциональных слоев и структур в строго контролируемой среде при максимальной интеграции процессов, развиваемых в субмикронной технологии также будет являться основой при создании технологического базиса формирования наноразмерных структур.

Основные концепции субмикронной технологии:

— высокая локальность, анизотропия и селективность обработки структур за счет использования радиационно-стимулированных процессов с контролируемой энергией активных частиц и состава технологических сред, причем энергетика активных частиц при формировании и обработке функциональных структур становится соизмеримой с энергией атомных связей;

— переход к новым источникам излучения в процессах микролитографии: к источникам с  $\lambda = 365-193$  нм для реализации типовых элементов с размерами 0,8–0,25 мкм и к синхротронному излучению в области ГУФ для формирования элементов 0,25–0,1 мкм;

— использование остросфокусированных электронных и ионных пучков в основном для изготовления и ретуши шаблонов;

— переход к индивидуально-последовательной обработке пластин при увеличении диаметра пластин и ужесточение допусков при реализации минимальных размеров элементов;

— максимально возможная интеграция процессов на основе кластерного оборудования.

Наибольшей селективностью воздействия обладают радиационно-стимулированные процессы, в которых энергия квантов или частиц сравнима с энергией связей в твердом теле. Поэтому перспективные технологические операции должны основываться на низкотемпературных селективных процессах с использованием квантов, электронов, атомов, ионов и радикалов с управляемой и контролируемой энергетикой.

Требованиям низкотемпературной индивидуально-последовательной технологии в настоящее время удовлетворяют фото-стимулированные процессы, в которых воздействие излучения в виде квантов строго определенной энергии обеспечивает высокую селективность процесса за счет взаимодействия с определенными типами химических связей атомов и молекул.

Фото-стимулированные процессы легко управляемы и не вызывают побочных радиационных повреждений.

Использование в субмикронной технологии фото-стимулированных процессов обеспечивает их максимально возможную интеграцию в контролируемой среде (вакуум, газовая среда) и чистоту обрабатываемых поверхностей, особенно, при переходе от одной последова-

тельной операции к другой. Этому же способствует создание кластерного оборудования с максимальным числом интегрированных процессов.

К сожалению, в современных технологиях имеется много процессов жидкостной химической обработки, которые практически не вписываются в технологию непрерывных интегрированных обработок на основе оборудования кластерного типа. Поэтому наибольшую важность представляют разработки газофазной радиационно-стимулированной технологии очистки в контролируемой среде полупроводниковых пластин и структур с глубиной очистки вплоть до атомарного уровня и в области микролитографии — газофазных процессов формирования масок резистов на основе кластерного оборудования [4].

Использование оборудования кластерного типа решает одну из главных задач современной технологии — уменьшение привносимой дефектности за счет уменьшения количества перемещений пластин в слабо контролируемой среде. Значение этого фактора несоизмеримо возрастает с уменьшением размеров элементов. В идеальном случае весь технологический маршрут должен проводиться в контролируемой среде, на взаимосвязанных системах кластерного типа. Для этого предстоит еще решить множество технологических проблем по созданию совместимых по физико-химическим принципам и способным к интеграции процессам, на базе которых можно создавать полностью автоматизированные линии с полной реализацией технологии в контролируемой среде. И, конечно, создание такой технологии будет проходить поэтапно.

Нанотехнология — новое направление науки и техники — позволяет создавать структуры и приборы с минимальными размерами элементов менее 100 нм. Примерами таких наноразмерных приборов являются прежде всего короткоканальные МОП-транзисторы с длиной канала менее 100 нм, причем проводится постоянный поиск технологической реализации таких МОП-транзисторов с меньшей длиной канала, в том числе с целью выяснения предельных возможностей их миниатюризации. Другим примером является создание на основе гетеропереходов целого спектра квантовых структур — квантовых проволок, квантовых точек, резонансно-туннельных транзисторов. Перспективно направление исследований одноэлектронного туннелирования в нанометровых структурах.

Наиболее важными проблемами при создании таких структур являются атомно-слоевая эпитаксия создания совершенных гетеропереходов и способы микролитографии по получению размеров элементов менее 100 нм, т.к. известно, что наиболее развитая оптическая литография имеет предел разрешения на уровне 200 нм.

В последние годы в связи с бурным развитием техники растровой зондовой микроскопии (РЗМ) для исследования наноструктур, а также некоторых возможностей их изготовления с использованием сканирующей

щего зонда, появилась тенденция увязывать нанотехнологию в основном с РЗМ.

Необходимо обратить внимание на то, что для успеха в создании нанотехнологии наряду с возможностями РЗМ необходимо привлекать все перспективные процессы субмикронной технологии. Это обусловлено еще и тем, что несмотря на исследовательскую мощь РЗМ у нее имеются и недостатки, особенно существенные для технологических применений.

Для технологических применений обычно используется специализированный растровый туннельный микроскоп, в котором между зондом и обрабатываемой структурой прикладывается разность потенциалов порядка нескольких вольт, а протекающий туннельный ток составляет величину единиц наноампер. В пересчете на напряженность электрического поля это соответствует величинам порядка 100 млн. В/см, а плотность тока около 100 тыс. А/см<sup>2</sup>. Такие огромные величины напряженности электрического поля и плотности тока могут вызывать химические реакции между атомами зонда или адсорбированными молекулами на нем и поверхностью структуры. За счет пондеромоторных сил может происходить и локальная деформация поверхности обрабатываемой структуры. Таким образом использование сканирующего зонда при формировании и модификации наноструктур не является гарантией сверхчистой нанотехнологии. Ограничивающим фактором применения РЗМ является и наличие на поверхности диэлектрических слоев, в том числе "островкового типа" препятствующих протеканию туннельного тока.

Исходя из отмеченных особенностей возможной технологии формирования наноструктур, с помощью сканирующих зондов с туннельным током, вероятнее всего, что в ближайшем будущем для микролитографии наиболее перспективным останется электронолитография с остросфокусированными пучками электронов. Однако, электронолитография с энергией электронов в десятки, а тем более сотни кэВ вносит большое количество радиационных дефектов в обрабатываемые наноструктуры. Использование высокоэнергетичных электронов приводит также к параллельному протеканию целого ряда "паразитных" процессов (например, для позитивных резистов — не только разрыв макроцепей, но и их сшивание), приводящих к уменьшению эффективности воздействия электронного пучка. Уменьшение же энергии электронов до сотен или тысяч эВ приведет, как к резкому снижению радиационных дефектов, так и к преобладанию в реакциях направлений, необходимых для достижения желаемого эффекта, повысит эффективность использования электронного пучка, уменьшит эффект рассеяния электронов и повысит локальность процессов. Так, понижение ускоряющего напряжения до 2–5 кэВ повышает по вышеуказанным причинам чувствительность позитивного резиста ПММА в несколько раз [5]. Можно ожидать, что для развития микролитографии в нанотехнологии будут использоваться низкоэнергетичные электронные пучки, хотя возможны и новые трудности, связанные с регулировкой интенсивности, фокусировкой и снижением хроматических aberrаций пучка.

Важной проблемой в электронолитографии наноструктур и, особенно, низкоэнергетической является создание тонких (порядка десятков или сотен ангстрем) однородных по толщине и бездефектных пленок электронорезистов с высокой чувствительностью. В настоящее время развиваются два наиболее перспектив-

ных метода нанесения пленок резистов — это газоза-ное осаждение и технология Ленгмюра-Блоджетт.

При газоза-ном методе осаждения органическая пленка формируется из паров мономеров под воздействием какого-либо стимулирующего излучения.

По способам формирования газоза-ных пленок метод подразделяется следующим образом:

- осаждение на подложку полимеров, распыляемых при термическом, электронно-лучевом или лазерном пиролизе;
- конденсация на подложке сублимируемых низкомолекулярных соединений;
- двухкомпонентная поликонденсация летучих реагентов на поверхности;
- полимеризация паров мономеров на предварительно активированной поверхности;
- плазменная полимеризация;
- радиационно-стимулированная полимеризация на поверхности.

Метод радиационно-стимулированной полимеризации (фотополимеризации) из газовой фазы является одним из самых перспективных. Он позволяет получать пленки из самых разнообразных классов соединений на любых функциональных слоях, легко управляем. Чтобы исключить облучение наносимой пленки, применяют метод фотостимулированного осаждения, который позволяет получить свободные от ошибок полимеры, обладающие достаточной чувствительностью. Метод основан на введении в реакционную среду инициатора, который поглощает излучение в таком участке спектра, где мономер и образующийся полимер прозрачны, а фотоны воздействуют на молекулы инициатора, вызывая их распад на фрагменты. Образовавшиеся активные фрагменты иницируют радикальную полимеризацию мономера.

В НИИФП на специально созданной установке для проведения процессов фотостимулированного осаждения были проведены многочисленные исследования по получению пленок полиметилметакрилата (ПММА). Поскольку полоса пропускания метилметакрилата в УФ области начинается с длины волны — 270 нм, поэтому в качестве инициатора был выбран метилэтилкетон (МЭК) с аналогичным спектром пропускания. За счет отрезания коротковолновой части излучения лампы ДРКс-500 фильтром УФС-1 при облучении газовой смеси на фрагменты разлагаются только молекулы МЭК и эти фрагменты иницируют полимеризацию. Получены экспериментальные зависимости толщины осаждаемых полимерных пленок из ряда мономеров от времени процесса, а так же давления инициатора и мономера.

Исследование чувствительности полученных фотополимеризацией пленок ПММА при экспонировании электронным лучом с ускоряющим напряжением 10 кВ показало, что они не уступают аналогичным пленкам, полученным стандартным методом. Полученные пленки обладают практически полной бездефектностью (естественно при соответствующей отмывке поверхности образца), начиная с толщины около 25 нм.

Метод газоза-ного осаждения полимерных пленок под действием УФ излучения позволяет также получать сополимеры. Это открывает перспективу повышения чувствительности пленок электронорезиста без потери в разрешении, в частности, для пленок сополимера ММА с МЭК.

Были проведены исследования по УФ-стимулированному осаждению фторсодержащих пленок, что в пер-

спективе должно привести к получению пленок с чувствительностью, на порядок выше, чем чувствительность ПММА, и более высоким контрастом.

Пленки, получаемые по технологии Ленгмюра-Блоджетт, формируются на поверхности воды в виде мономолекулярного слоя из полярных молекул, которые имеют гидрофильные кислотные и гидрофобные углеводородные конечные группы. Кислотная группа ориентируется сама на поверхности воды, образуя монослой молекул. Затем подложка из неорганического материала извлекается из воды и монослой с поверхности воды переносится на поверхность подложки, закрепляясь на ней углеводородными группами. Циклическим погружением и извлечением подложки формируются многослойные пленки с хорошо контролируемой толщиной. Недостатком этой технологии являются низкие скорости осаждения пленок на поверхность пластины. В установке нового типа [6] требуемое поверхностное давление монослоя достигается путем постоянного поддува воздуха над поверхностью монослоя либо путем постоянного движения воды под монослоем. При соблюдении требований ЧПП (класс 10) возможно повышение скорости осаждения пленки на образец до 1–1,5 см/с. На данной установке нанесены покрытия из 30 монослоев 22-трикозеновой кислоты на поверхность кремниевой пластины диаметром 130 мм. Использование полученного покрытия в качестве электронного резиста позволило получить разрешение 0,5 мкм.

При электронно-литографическом исследовании тонких (менее 20 нм) пленок ПММА, сформированных по методу Ленгмюра-Блоджетт, обнаружено, что при толщине пленки менее 7 монослоев распределение дефектов однородно по площади. Количество дефектов резко возрастает с уменьшением толщины пленки. При толщине пленки 9 монослоев наблюдаются дефекты другого рода — они располагаются только вокруг экспонированных участков, а их количество зависит от энергии электронного луча и типа подложки.

Однако при использовании даже совершенных и полученных по любой из указанных технологий, но столь тонких слоев резиста, возникают большие трудности при дальнейших процессах переноса изображения путем "сухого" травления в плазме, так как при этом будут возникать проколы и происходить эрозия поверхности.

По-видимому, кардинальным решением электронолитографии для нанотехнологии будет являться переход к безрезистной литографии.

Широко проводимые до настоящего времени исследования велись в основном в двух направлениях. Первое — локальная генерация радиационных дефектов в поверхностном слое подложки, которые приводят к изменению физико-химических свойств в этой области, например изменению скорости травления или коэффициента диффузии ряда легирующих примесей. Второе — прямая сублимация под действием сфокусированного электронного пучка, нанесенного на поверхность подложки неорганического материала типа  $\text{NaCl}$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{AlF}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и т.д.

Очевидно, что для этих процессов необходимы высокоэнергетичные электроны и для предлагаемой нами низкоэнергетичной электронолитографии неприемлемы.

Однако, в последние годы появилось новое направление исследований, которое придает новый импульс в развитии безрезистной радиационно-стимулированной микролитографии. Это изучение десорбции с поверх-

ности твердых тел, стимулированной электронными возбуждениями (ДСЭВ), то есть в результате прямого перехода потенциальной энергии электронного возбуждения в кинетическую энергию десорбирующихся частиц. Процессы ДСЭВ отличаются низкими энергетическими порогами десорбции и как правило начинаются при энергии возбуждающих электронов от единиц до сотен электронвольт.

В НИИФП [8] проведены исследования десорбции дихлорида палладия стимулированного электронными возбуждениями, обусловленными воздействием пучка электронов. В результате установлено, что скорость десорбции хлора из дихлорида палладия зависит от энергии первичных электронов и имеет максимум при энергии вблизи 3 кэВ. Показано, что при помощи электронного луча с низким ускоряющим напряжением возможно создание на поверхности кремниевой пластины, покрытой тонкой (порядка сотни ангстрем) пленкой дихлорида палладия областей металлического палладия, имеющих субмикронные размеры.

Таким образом, показанная возможность прямого "рисования" электронным лучом металлических областей открывает новые перспективы низкоэнергетичной электронолитографии для субмикронной- и нанотехнологии, особенно, если учесть, что палладий — высокотехнологичный материал и может быть использован не только в качестве резиста, но и для формирования деталей наноприборов: от металлической разводки до затворов полевых транзисторов.

В направлении технологических методов создания совершенных гетероэпитаксиальных слоев и наноструктур по-прежнему доминирующее положение будет занимать совершенствование методов молекулярно-лучевой и газофазной эпитаксии.

Среди новых перспективных возможностей создания локальных структур с наноразмерами, которые необходимо интенсивно развивать, особое место занимает лазерное управление пучками нейтральных атомов.

В последние годы ведутся интересные теоретические и экспериментальные работы по поведению атомов в сильном световом поле. Показано, что на атом в световом поле действует сила, состоящая из двух частей: спонтанной и дипольной. Спонтанная сила — это преимущественно сила радиационного давления, возникающая из-за того, что фотон обладает моментом [9]. Вследствие случайного характера спонтанной эмиссии эта сила, в среднем, параллельна направлению распространения света, но флуктуирует вследствие дискретной природы процессов поглощения и испускания.

При поглощении фотона атом приобретает импульс  $hk$ . В следующем затем процессе спонтанного излучения фотон испускается с равными вероятностями во всех направлениях, поэтому в среднем при спонтанном излучении не возникает изменения импульса атома. Если атом рассматривать как двухуровневую систему, то сила отдачи определяется числом фотонов, поглощенных в единицу времени, умноженным на  $hk$ . В пределе сильного насыщения это будет:

$$f = hk/2T,$$

где  $T$  — время релаксации возбужденного состояния атома.

Сила отдачи направлена по линии распространения луча и стремится увлечь атом вдоль луча.

Спонтанную силу давления излучения можно ис-

пользовать для управления атомами. Поскольку эта сила имеет резонансный характер она оказывает селективное воздействие на атомы разного сорта. Импульс отдачи может достигать больших значений. В режиме насыщения, который для  $s-p$ -переходов в атомах щелочных металлов достигается уже при интенсивностях около  $10 \text{ мВт/см}^2$ , атом приобретает ускорение  $a = \hbar k / 2MT$ , где  $M$  — масса атома. Так, атом натрия, для которого  $T = 16 \text{ нс}$ , под действием лазерного луча, резонансно насыщающего переход  $3s-3p$ , приобретает ускорение, около  $10^8 \text{ см/с}^2$ . Это значит, что атом с начальной скоростью  $V_0 = 10^5 \text{ см/с}$  может быть остановлен направленным ему навстречу лазерным лучом за  $1 \text{ мс}$  на расстоянии  $50 \text{ см}$  или может быть отклонен  $5 \text{ мрад}$  под действием луча, направленного перпендикулярно при длине взаимодействия порядка  $1 \text{ см}$ .

Дипольная сила [10] возникает при взаимодействии наведенного полем атомного дипольного момента с приложенным неоднородным электрическим полем. Величина ее значительно возрастает при увеличении градиента интенсивности падающего света и может быть оптимизирована варьированием ненулевой отстройки лазерной частоты от частоты атомного перехода. Вычисления показывают, что дипольная сила

$$F_{\text{дип}} = (a'/2) \nabla E^2,$$

где  $a'$  — действительная часть поляризуемости.

Поскольку  $F_{\text{дип}}$  прямо пропорциональна  $a'$ , она имеет наибольшую величину и испытывает сильную дисперсию вблизи резонансов. При  $a' > 0$  (вблизи, но ниже резонансной частоты) эта сила втягивает атом в область с большей интенсивностью поля, а при  $a' < 0$  (выше резонанса) — выталкивает атом в области с меньшей интенсивностью. Если атом рассматривать как двухуровневую систему, то можно показать, что в пределе сильного насыщения дипольная сила остается конечной и возрастает с увеличением отстройки  $(\nu - \nu_0)$ , где  $\nu$  — лазерная частота,  $\nu_0$  — резонансная частота атома. При  $\nu < \nu_0$  пучок моды  $\text{TEM}_{00}$  стремится втянуть атом вдоль радиуса внутрь и удерживать его там на оси благодаря действию дипольной силы. Дипольная сила может быть значительной. Так в режиме гауссовский лазерный луч радиуса —  $100 \text{ мкм}$  и  $\nu - \nu_0 = 2 \text{ ГГц}$  создает поперечную силу порядка  $5 \cdot 10^{-15} \text{ дин}$  (эквивалентное ускорение атома натрия около  $10^7 \text{ см/с}^2$ ). Атомы с поперечной составляющей скорости, меньшей  $10^3 \text{ см/с}$ , должны захватываться лазерным лучом мощностью  $1 \text{ Вт}$ .

Проведенные экспериментальные исследования [11–14] подтверждают правильность теоретических вычислений.

Теоретические оценки показывают, что пучок нейтральных атомов можно сфокусировать лазерным лучом до размера пятна  $1-2 \text{ нм}$ .

Также теоретически и экспериментально показано, что сфокусированным лазерным лучом можно создавать ловушки для нейтральных атомов, охлаждать атомы до температур порядка микроК, захватывать и перемещать микрочастицы и кластеры в пространстве и нужным образом укладывать на поверхности. Эти результаты показывают, что в настоящее время подготовлен новый мощный технологический инструмент для создания но-

вых процессов в нанотехнологии таких, как микролитография с помощью остросфокусированных нейтральных атомов, локальное легирование и эпитаксия с совершенной границей раздела ("нежное" осаждение нейтральных атомов), конструирование наноструктур и наноприборов путем захвата, перемещения и осаждения соответствующих кластеров.

Данная статья является в основном плодом размышлений, обсуждений и планирования дальнейших путей развития исследований в области субмикронной и нано-технологии и отражает в основном точку зрения авторов.

Статья посвящена светлой памяти безвременно скончавшегося Юрия Сергеевича Бокова прекрасного друга и ученого.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тенденции развития СБИС с субмикронными размерами элементов/Ю.С.Боков, Б.С.Борисов, В.В.Ракитин, Н.С.Самсонов.— Электронная промышленность, 1990, № 11, с. 37–43.
2. Боков Ю.С., Шевченко А.И. Интегрированные процессы и кластерное оборудование в субмикронной технологии.— Электронная промышленность, 1993, № 5, с. 21–24.
3. Системный подход к созданию субмикронной технологии/Ю.С.Боков, В.И.Жильцов, В.В.Мартынов, Н.С.Самсонов.— Электронная промышленность, 1993, № 8, с. 7–16.
4. Газофазные методы формирования пленок резистов/Ю.С.Боков, А.Е.Бочканов, А.В.Соловьев, А.И.Шевченко.— Электронная промышленность, 1990, № 11, с. 52–55.
5. Боков Ю.С., Голубев И.А., Ерошин С.Н. и др.— Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1990, в. 5, с. 18–20.
6. Industrial scale production of L-B layers/O.Albrecht, T.Ginnai, A.Harrington, D.Marr-Leisy, V.Rodov.— Mol. Electron.: Biosensors and Biocomput.: Symp., SantaClara, Calif., London, 1989, s. 41–49.
7. Ultrathin poly(methylmethacrylate) resist films for microlithography/S.W.Kuan, C.W.Frank, Y.H.Lee et al.— J. Vac. Sci. and Technol. B., 1989, N 6, с. 1745–1750.
8. Исследование десорбции, стимулированной электронными возбуждениями в PdCl<sub>2</sub> методами ВИМС и Оже-спектроскопии/Б.С.Борисов, М.К.Залаялютдинов, Е.П.Кириленко, А.Ю.Трифонов.— См. наст. вып., с. 172.
9. Ashkin A. Atomic-Beam Deflection by Resonance-Radiation Pressure. Phys. Rev. Lett., 1970, v. 25, N 19, с. 1321–1324.
10. Observation of Focusing of Neutral Atoms by the Dipole Forces of Resonance-Radiation Pressure/J.E.Bjorkholm, R.R.Freeman, A.Ashkin, D.B.Pearson.— Phys. Rev. Lett., 1978, vol. 41, N 20, с. 1361–1364.
11. Балькин В.И., Летоков В.С., Сидоров А.И. Фокусировка атомных пучков диссипативной силой светового давления лазерного излучения.— Письма в ЖЭТФ, 1986, т. 43, вып. 4, с. 172–174.
12. Balykin V.I., Letokov V.S., Ovchinnikov Yu.B., Sidorov A.I. Focusing of an atomic beam and imaging of atomic sources by means of laser lens based resonance-radiation. J. Mod. Opt., 1988, v. 35, N 1, с. 17–34.
13. Radiative collimation of atomic beams through two-dimensional cooling of atoms by laser-radiation pressure/V.I.Balykin, V.S.Letokov, V.G.Minogin et al.— J. Opt. Soc. Am. B, 1985, v. 2, N 11, с. 1776–1782.
14. Three-dimensional optical trapping and laser ablation of a single polymer latex particle in water/H.Misawa, M.Koshioka, K.Sasaki et al.— J. Appl. Phys., 1991, v. 70, N 7, с. 3829–3836.



# Синхронное излучение и проблемы субмикронной технологии

С.Н.МАЗУРЕНКО, Н.С.САМСОНОВ

Уменьшение размеров элементов ИС до 0,5–0,3 мкм, позволяет существенно повысить быстродействие схем и уменьшить потребляемую мощность. Переход к субмикронным размерам в плане влечет за собой переход к субмикронным размерам и по вертикали. Необходимо обеспечить надежное и устойчивое формирование функциональных слоев толщиной до нескольких нанометров. Вместе с тем создание столь малых субмикронных размеров требует качественных изменений в технологии микроэлектроники, обеспечивающих не только высокую прецизионность, но и многократное снижение дефектности. Возникает необходимость глубокого изучения физических явлений и химических процессов на атомарно-молекулярном уровне, фундаментальных исследований материалов и субмикронных структур. Для этого необходимы:

разработка и промышленное освоение субмикронной литографии;

развитие высокоточных методов исследований и анализа материалов, структур и технологических процессов;

разработка низкотемпературных методов обработки пластин, использующих радиационно стимулированные процессы.

Высокая сложность изделий и экстремальные требования к параметрам материалов и технологических процессов потребует, вероятно, осуществить переход от групповой к индивидуально-групповой обработке пластин на базе разработки новейших полностью контролируемых и автоматизированных процессов "безлюдной" технологии. Сложность и многообразие стоящих проблем требуют комплексного подхода к их решению, в том числе широкого применения СИ. Основанием для этого служит то, что СИ становится мощным технологическим и исследовательским инструментом для решения проблем развития микроэлектроники (табл. 1), обладая такими уникальными характеристиками [1]:

непрерывность спектра от области инфракрасного излучения до жесткого рентгеновского излучения (500–0,01 нм), такой диапазон спектра излучения невозможно получить ни одним из известных в настоящее время методов;

высокая спектральная яркость в любой области спектра примерно в  $10^2 \dots 10^4$  раз больше, чем, например, для самых мощных рентгеновских трубок. Средняя мощность источников СИ практически в любой области спектра превосходит среднюю мощность лазерных источников;

высокая естественная коллимация (не хуже  $10^4$  рад), обеспечивающая плоскопараллельность пучка;

линейная поляризация в плоскости орбиты, позволяющая изучать анизотропные явления;

четкая временная структура (длительность импуль-

са до 100 пс), позволяющая изучать быстротекающие процессы;

низкий фон и, как следствие этого, высокое отношение сигнала к уровню фона, обеспечивающие большую чувствительность большинства методов;

возможность точного вычисления и стабильность характеристик излучения.

## Рентгенолитография в пучках СИ

Из-за дифракционных искажений, обусловленных волновой природой излучения, минимальные размеры элементов ИС, которые можно создать с помощью ультрафиолетового излучения ( $\lambda = 200\text{--}400$  нм), около 1–2 мкм, что ограничивает возможности традиционного метода фотолитографии в создании ультраБИС с субмикронными размерами элементов. Поэтому повышение уровня интеграции ИС требует разработки новых литографических методов, использующих более коротковолновые виды излучений, таких как рентгеновская и электронно-лучевая литографии. Однако у электронно-лучевой литографии имеются серьезные недостатки, ограничивающие ее использование для массового промышленного производства ИС, главным из которых является очень низкая производительность. Наиболее перспективным методом массового выпуска ультраБИС с субмикронными размерами элементов является рентгенолитография. Мощным источником "мягкого" рентгеновского излучения, применение которого обеспечивает наибольшую производительность технологии рентгенолитографии и позволяет наиболее полно реализовать ее потенциальные возможности, является СИ [2].

Проведенные аналитические и экспериментальные исследования процесса рентгенолитографии с применением СИ показали, что оно позволяет существенно поднять производительность метода по сравнению с другими типами источников; работать в диапазоне длин волн  $1 < \lambda < 4$  нм, что обеспечивает высокий контраст рентгеношаблонов ( $K > 10$ ) и высокое разрешение ( $\sim 10$  нм) проводить печать с зазором, увеличивая тем самым срок службы рентгеношаблонов и повышая процент выхода годных микросхем. Работы, связанные с исследованиями и разработкой процесса литографии, проводятся специалистами Государственного НИИ физических проблем на синхротроне С-60 (ФИАН им. П.А.Лебедева).

Результаты анализа различных систем литографии (табл. 2): оптической, ультрафиолетовой, электронно-лучевой, ионно-лучевой и рентгенолитографии, показывают, что рентгенолитография в пучках СИ по совокупности параметров — разрешающей способности, производительности, слабой чувствительности к дефектам органического происхождения — имеет наибольшие преимущества. Особое преимущество рентгенолитографии с использованием СИ, обеспечивающее высокую

## Области применения СИ

Приборы и материалы	Проблемы качества и надежности							
	Создание ультраБИС				Создание бездефектных и новых материалов			
Технология	Автоматизированные технологические процессы							
	Литография и низкотемпературные «сухие» процессы				Формирование структурносовершенных функциональных слоев			
Метрология и диагностика	Банк данных САПР							
	Диагностика материалов и структур						Оперативный контроль материалов, структур и технологических сред	
	Диагностика причин отказов							
Длина волны, мкм	$10^2$	$10^1$	$10^0$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$
Спектральный диапазон	Далекий ИК	ИК	Видимый	УФ	ВУФ	Рентгеновское излучение	γ-квант	
Методики аналитических исследований	Спектроскопия в далекой ИК-области	Спектроскопия в видимой и ИК-области		Рентгеновская микроскопия		Ядерный резонанс, рассеяние и дифракция рентгеновских лучей		
		Фотоэлектронная спектроскопия		Ионная, ВУФ-спектроскопия		Рентгеновская спектроскопия (поглощение, флуоресценция)		
Технологические процессы	«Сухие» радиационно-стимулированные процессы				Рентгенолитография			
Источник излучения	ВЭПП-4, E=6 ГэВ							
	Накопитель, E=1,5÷2 ГэВ							
Энергия фотона, эВ	$10^{-2}$	$10^{-1}$	$10^0$	$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$

надежность данного метода в формировании ИС с субмикронными размерами элементов, — это 100-кратное увеличение глубины резкости изображения (~ 100 мкм), недоступное всем существующим системам. При этом следует отметить, что альтернативное противопоставление различных литографических методов неправильно. Разные методы дополняют друг друга. Так, для рентгенолитографии необходима электронно-лучевая литография как генератор изображения при создании эталонных рентгеношаблонов. Таким образом, рентгенолитография с использованием СИ является наиболее перспективным литографическим методом.

#### Радиационно-стимулированные технологические процессы с применением СИ

Причины возникновения большого числа дефектов, начиная от кластеров и кончая изгибом пластин, связаны с высокотемпературными технологическими процессами обработки пластин. Поэтому разработка прецизионной бездефектной субмикронной технологии требует перехода к низкотемпературным «сухим» технологическим процессам. Одно из наиболее перспективных направлений — разработка радиационно-стимулированных с применением ультрафиолетового и рентгенов-

Сравнение различных методов в микролитографии

Микролитография	Разрешение, мкм	Глубина резкости, мкм	Производительность, пластин $\varnothing 100$ мм/ч	Чувствительность к дефектам	Стоимость оборудования, тыс. дол.	Примечание
Оптическая контактная	2—3	1—10	50	Очень высокая	30	
Оптическая проекционная	0,7—1,0	1,0	60	Высокая	185	
УФ-проекционная	0,6—0,8	1,0	50	Очень высокая	Разработка	
Проекционная с мультиплицированием	0,7—1,0	1,0	20	Высокая	800	
а) электронно-лучевая	0,5	5,0	5—10	Высокая	3000	Производительность снижается с уменьшением размеров элементов
б) электронно-лучевая высоковольтная	0,1					
Ионно-лучевая	0,1—0,5	5,0	5—10	Высокая	3000	Разработка
Рентгеновская (точечный источник)	0,3—0,5	10	20	Низкая	1000	Малая дефектность за счет нечувствительности рентгеновского излучения
Рентгеновская (с использованием СИ)	<0,1	50—100	30—70	Низкая	1000—1500	Стоимость в пересчете на канал

ского излучений технологических процессов. Механизм данных процессов прост: под действием высокоэнергетических фотонов происходит диссоциация или ионизация молекул с образованием реактивных радикалов, которые и взаимодействуют с поверхностным субстратом, вызывая либо процессы травления, либо процессы осаждения пленок (рис. 1) [3]. В настоящее время в работах по исследованию данных процессов используются лазеры, различные типы ламп, а также СИ. Сравним возможности данных источников излучения. Следует отметить, что излучение мощного лазера превосходит СИ по спектральной яркости. В то же время вся мощность лазера концентрируется в узком спектральном интервале, а мощность СИ распределена в широкой области спектра, в большей части которой еще не существует ни лазерных, ни ламповых источников, позволяя тем самым индуцировать существенно большее число стимулированных процессов. Последние успехи в области создания специальных устройств генерации СИ, так называемых "змеек" и ондуляторов, в которых излучение испускается электронными пучками, колеблющимися в периодических магнитных полях по синусоидальному закону, приводят к спектральной концентрации СИ и даже к возможности создания лазера на свободных электронах в области вакуумного ультрафиолета и рентгеновского излучения. Кроме того, при использовании лазеров получают маленькую скорость

обработки больших полей. Возможности СИ для этих целей гораздо шире СИ имеет спектр излучения от 10 мкм до 0,01 нм (энергия фотонов от 0,1 эВ до 100 кэВ), интенсивность  $10^{15}$ — $10^{17}$  фотон/см<sup>2</sup>·с, т.е. охватывает области инфракрасного, ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Благодаря такому широкому спектру СИ позволяет изучить спектральную зависимость резонансных процессов. Таким образом, СИ является универсальным источником для исследований и разработки радиационно-стимулированных процессов и основой для разработки требований к соответствующему специальному технологическому оборудованию.

#### Аналитические исследования в технологии с применением СИ

Решение задач создания ультраБИС с низкой себестоимостью возможно лишь на пути создания бездефектной технологии с высоким процентом выхода годных изделий.

Переход к субмикронным размерам элементов требует кардинального пересмотра представлений о проблеме дефектности исходных материалов, функциональных слоев, о физико-химическом состоянии поверхностей и границ раздела. Если дефекты субмикронных размеров для элементов в несколько микрометров малосущественны, то при переходе к субмикронным

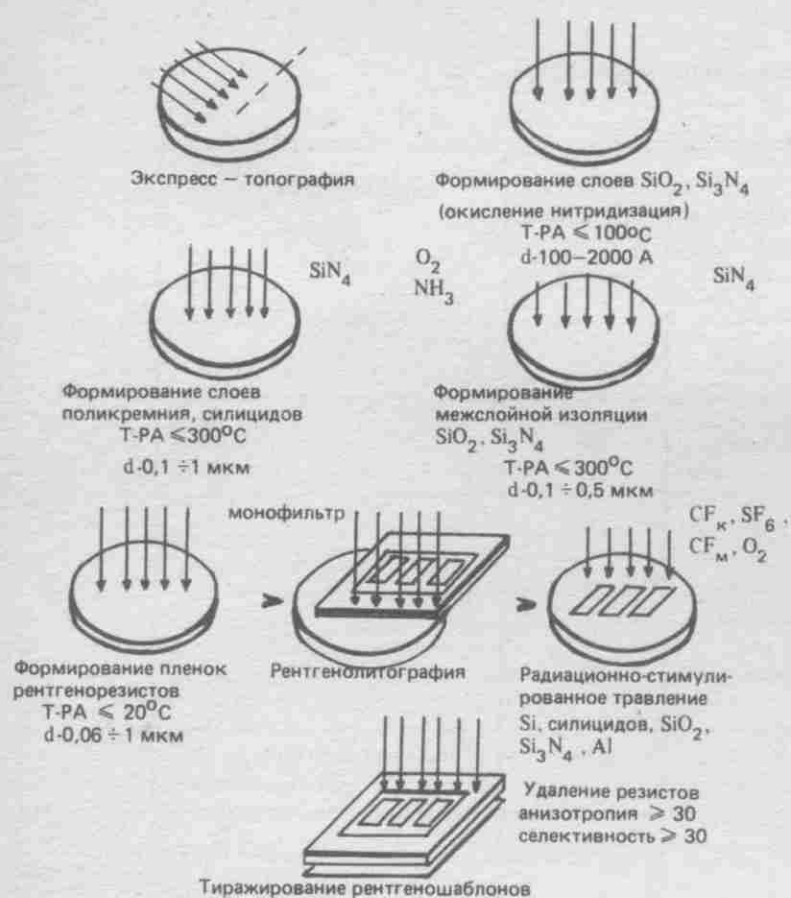


Рис. 1. Применение СИ в технологии субмикронных ультраБИС

размерам элементов они становятся определяющими. Важно уметь не только обнаружить дефекты уже в нанометровом диапазоне размеров, но и на основе изучения природы и механизмов возникновения дефектов научиться избегать их появления в процессе получения исходных материалов и структур. В связи с этим резко возрастает удельный вес исследований и контроля параметров структур с использованием новых прецизионных аналитических методов исследований, определяемых физическими и химическими свойствами поверхностей, границ раздела и т. д.

Решение вышеперечисленных проблем возможно на базе широкого применения в исследованиях и диагностике СИ. Высокие спектральная яркость СИ и пространственная когерентность, определяемые малым размером источника и большим расстоянием до исследуемого образца, возможность перестройки по длинам волн, высокая степень естественной поляризации дают мощный импульс развитию рентгенодифракционных методов диагностики исходных материалов функциональных слоев, поверхности, приповерхностных слоев и границ раздела.

Резкое возрастание детектируемого сигнала над уровнем фона дает не только повышение чувствительности и точности измерений, но и резко сокращает время эксперимента с десятков часов до минут либо секунд, существенно упрощается регистрирующая и управляющая аппаратура, появляется возможность отказаться от сложных дорогостоящих электронных систем регистрации и накопления малых сигналов.

Высокая яркость СИ позволяет без ущерба для результатов эксперимента увеличить расстояние исследуемый образец — детектор. Таким образом, появляется возможность проведения экспериментов *in situ* непосредственно в технологическом процессе, например, начальных стадий эпитаксиального роста при молекулярно-лучевой эпитаксии. Возможно сочетание в одном вакуумном объеме рентгенодифракционных методов диагностики поверхности с другими методами исследования поверхности (дифракция медленных электронов и оже-спектроскопия).

Использование временной структуры СИ позволяет осуществить время разрешающие эксперименты, например процесса лазерной перекристаллизации, если период прохождения электронных пучков по орбите синхронизирован с частотой лазерных импульсов. Появляется возможность впервые осуществить практически 100%-ный входной и пооперационный экспресс-контроль исходных материалов, эпитаксиальных структур, функциональных слоев и пленок. Такая паспортизация необходима при переходе к технологии индивидуальной обработки пластин при исключительно высоких требованиях к стабильности проведения процессов, необходимой при создании ультраБИС, и позволит повысить выход годных изделий.

Перспективным представляется использование СИ в рентгеновской дифракционной топографии. Метод экспресс-топографии в сплошном спектре СИ позволит осуществить 100%-ную паспортизацию пластин при входном контроле общего структурного совершенства монокристаллов за времена экспозиции в несколько секунд по сравнению с несколькими часами при использовании рентгеновских трубок. При этом необходимо отметить, что при использовании СИ упрощается как сам эксперимент, так как не требуется высокоточной установки образца (для большинства исследований достаточно точность установки доли градуса, а не секунды), так и интерпретация экспериментальных результатов, поскольку обеспечивается получение на одной лауэ-топограмме нескольких рефлексов. При сравнимом разрешении на синхротронных и обычных рентгенограммах времена экспозиции для получения синхротронных рентгенограмм кремния в нескольких отражениях существенно меньше (до 3с) по сравнению с 1,5–2 ч для получения обычных топограмм в одном отражении. Наиболее ярко эффективность использования рентгено-топографии в СИ проявляется при исследовании сильно поглощающих рентгеновское излучение материалов, используемых в микроэлектронике, таких как арсенид галлия, фосфид индия и гадолиний-галлиевый гранат, исследование которых на рентгеновской трубке из-за их большого массового коэффициента поглощения рентгеновских лучей затруднено, что заставляет при их контроле ограничиваться применением в основном методов на отражение, а не на прохождение [4].

Монохроматизация излучения и возможность перестройки по длинам волн дает возможность реализовать методы топографии вблизи края поглощения и таким образом осуществить визуализацию распределения примесных атомов и процессов осаждения и сегрегации примесей на дефектах.

Использование временной структуры СИ позволяет осуществить постановку методов времяразрешающей топографии в режиме стробирования, например, для исследований фазовых превращений. Высокая спектральная яркость источника СИ позволяет осуществить прямое преобразование рентгенодифракционных изоб-

ражений в видимое с помощью рентгеновидиконов, лучший уровень разрешения которых около 6 мкм. Однако это разрешение может быть улучшено за счет предварительного увеличения рентгено топографических изображений в несколько десятков раз [5]. Таким образом может быть достигнут субмикронный уровень разрешения в топографии на пучках СИ.

Одной из главных проблем при разработке современной кремниевой технологии геттерирования дефектов является визуализация микродефектов. С целью повышения чувствительности к слабым полям деформации, создаваемым микродефектами до  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  по сравнению с  $10^{-4}$  в однокристалльных методах применения, СИ дает возможность без особого ущерба для потери интенсивности реализовать многокристалльные методы рентгеновской топографии. Методы рентгеновской топографии высокого разрешения в пучках СИ позволяют обеспечить исследования и контроль наличия микродефектов как в исходном материале, так и в иницируемых при различных воздействиях в технологическом процессе за время экспозиции около нескольких минут по сравнению с десятками часов при использовании рентгеновских трубок при сравнимом разрешении.

Возможности применения СИ позволили поднять на новый уровень методы исследования химического состава, структуры и электронных свойств поверхности и приповерхностных слоев. В данных методах регистрируется не рассеянное рентгеновское излучение, а вторичные сигналы. Такими сигналами могут быть либо флуоресцентное излучение, либо фотоэлектроны, вылетающие из кристалла. Так, метод дифракционного неразрушающего исследования в пучках СИ — метод стоячих рентгеновских волн, в котором регистрируются вторичные излучения, дает возможность исследовать структуру поверхности и границ раздела в процессах роста и осаждения функциональных слоев и пленок, обеспечивает исследования атомной структуры поверхности, границ раздела и адсорбированных слоев, толщин деформированных и переходных слоев, профиля распределения примесей. При этом высокая интенсивность СИ позволяет на два порядка сократить время измерений, значительно понижается нижний предел числа исследуемых атомов. Так, при ионной имплантации можно исследовать образцы с концентрацией примесных атомов около  $10^{13}$  ат/см<sup>2</sup>, а при адсорбции — одну союгу монослоя, кроме того, можно значительно повысить локальность исследований за счет использования узких пучков [6].

Одним из наиболее эффективных методов исследования поверхностей и границ раздела твердых тел является фотоэлектронная спектроскопия. Она широко используется в микроэлектронике для исследования химического состава поверхности полупроводников, стехиометрии диэлектрических пленок, барьеров Шоттки, границ раздела в гетеропереходах.

В настоящее время наиболее полную информацию об электронных состояниях поверхностей и приповерхностных слоев дает метод фотоэлектронной спектроскопии в поляризованных пучках СИ с разделением фотоэлектронов как по энергии, так и по углу вылета. Применение СИ позволяет существенно упростить ключевую проблему не только метода фотоэлектронной спектроскопии, но и всех фотоэмиссионных методов исследований — проблему интерпретации результатов.

Широкие возможности открывает применение СИ в методе флуоресцентного анализа для экспресс-иссле-

дований энергоносителей, материалов и структур. Данный метод обладает следующими достоинствами: высокая чувствительность (до  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  г/г для К-линий элементов от Zn до Au при времени измерений  $10^2$ – $10^3$  с), малый объем и масса изучаемого образца (до 0,1 мг), неразрушающий характер измерений.

Применение СИ в исследованиях структуры неупорядоченных систем позволяет поднять на новый уровень возможности метода спектроскопии тонкой структуры края поглощения — EXAFS-спектроскопии. Данный метод дает возможность определить структуру аморфных материалов и все шире и шире применяется для исследований неупорядоченных твердых растворов  $\text{Ca}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ , силицидов металлов и т.д. Аналитические исследования с использованием СИ проводились совместно с учеными Института кристаллографии им. Шубникова РАН и института ядерной физики им. Буднера СО РАН на ускорительно-накопительном комплексе ВЭПП-3 и ВЭПП-4.

Как следует из вышеизложенного, СИ является мощным инструментом субмикронной технологии и прецизионных аналитических исследований. Кроме того, отметим еще одну область прикладного использования — СИ-метрологию. Точно рассчитываемые характеристики СИ и возможность работы с малым количеством электронов в накопительном кольце, когда их можно считать поштучно, позволяют использовать СИ в качестве эталонного источника в области вакуумного ультрафиолета и рентгеновского излучения. В качестве эталонного источника СИ позволяет:

абсолютно калибровать вторичные стандарты и источники излучения (рентгеновские трубки, газоразрядные лампы и т.д.);

эталонировать и калибровать приемники излучения, фильтры, монохроматоры, дозиметрическую аппаратуру и др.

Успехи в области разработки и создание ускорительной техники открыли широкие перспективы по использованию СИ в прикладных исследованиях и технологии. В настоящее время мощными источниками СИ являются специализированные накопительные кольца электронов, оснащенные специальными устройствами генерации СИ (сверхпроводящими "змеями" и ондуляторами),

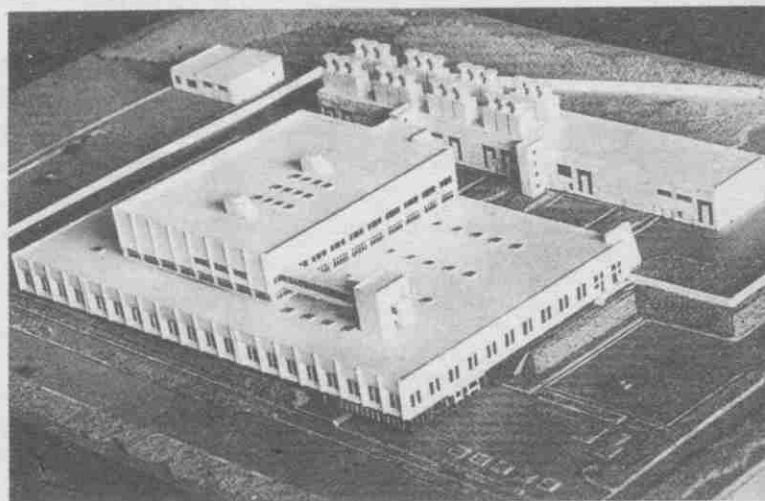


Рис. 2. Общий вид исследовательского технологического комплекса СИ «Зеленоград»

позволяющими получать сверхяркие пучки СИ. Интенсивно ведутся работы по разработке компактных промышленных источников СИ на основе сверхпроводящих магнитов. Отметим еще одну особенность использования в качестве источников СИ накопительных колец. Благодаря большому времени жизни пучка электронов в накопителе (5–10 ч) потери частиц в единицу времени на много порядков ( $10^5$ ) меньше, чем в обычных ускорителях, поэтому вокруг накопителя почти полностью отсутствуют наведенная активность и радиационный фон. Это существенно упрощает проведение экспериментальных работ и позволяет использовать каналы вывода СИ длиной 1–10 м.

В настоящее время при Государственном НИИ физических проблем (г. Москва) создается исследовательско-технологический комплекс на базе специализированного источника СИ "Зеленоград" (рис. 2). Основная задача данного комплекса — решение научных и технологических проблем, связанных с дальнейшим развитием электронной техники, в первую очередь, микроэлектроники. Специализированный источник СИ представляет собой ускорительно-накопительный комплекс, состоящий из следующих частей:

- инжектор (линейный ускоритель электронов с энергией 80–100 МэВ);
- бустер (малое накопительное кольцо электронов с энергией 0,45 ГэВ);
- большое накопительное кольцо электронов с энергией до 2,5 ГэВ.

Данный ускорительно-накопительный комплекс разработан и изготовлен институтом ядерной физики Сибирского отделения РАН. Источник СИ "Зеленоград" обеспечивает работу 37 каналов вывода СИ. Из них 20 каналов из поворотных магнитов; 5 каналов из специализированных литографических "змеек"; 10 каналов из сверхпроводящих "змеек" и 2 канала из ондуляторов. Сверхпроводящие "змеи" должны обеспечить возможность работы в жестком рентгеновском излучении (0,1 нм), а литографические "змеи" дают возможность сканировать пучком СИ по вертикали, обеспечивая при этом площадь экспонирования  $10 \times 10$  см<sup>2</sup>. Каналы вывода СИ из поворотных магнитов и литографических "змеек" предназначены для работ в области рентгенолитографии, включая рентгенолитографию для микромеханики. Каналы вывода СИ ондуляторов из сверхпроводящих "змеек" и предназначены для работ в области радиационно стимулированных низкотемпературных процессов осаждения и травления функциональных слоев и аналитических исследований с использованием СИ. Создание такого современного исследовательского технологического Центра СИ является крупномасштабным проектом. Он включает не только строительство здания и создание источника СИ, но и разработку и создание большого комплекса сложнейшего технологического, исследовательского и диагностического оборудования и разработки соответствующих технологий и методик исследований, это связано с тем, что оборудование, предназначенное для работ с применением СИ, существенно отличается от оборудования, в котором используются обычные источники излучения.

Создание такого комплекса уникального технологического, исследовательского и диагностического оборудования потребовало объединения усилий ведущих предприятий и организаций электронной промышленности, Российской Академии Наук и других отраслей

промышленности. Для этого Государственным НИИ физических проблем совместно с ИК РАН и ИЯ ФСО РАН была разработана специализированная программа по аппаратно-методическому оснащению Центра СИ "Зеленоград". В соответствии с данной программой ведется разработка и создание исследовательских станций и методик исследований. Большая часть оборудования и аппаратуры уже изготовлена. Весь комплекс планируется ввести в эксплуатацию в конце 1995 года.

Применение СИ в технологических процессах и аналитических методах исследований для решения задач микроэлектроники позволяет:

разработать наряду с промышленной технологией рентгенолитографии в пучках СИ комплекс низкотемпературных радиационно-стимулированных процессов микротехнологии, необходимых для создания ультраБИС с субмикронными размерами элементов;

определить степень кристаллического совершенства материалов и структур;

управлять распределением примесей и дефектов как в исходных материалах, так и на различных этапах технологических процессов;

проводить глубокий анализ причин отказов ИС факторов, определяющих выход годных, и тем самым повысить качество и надежность изделий микроэлектроники.

Результаты комплексных аналитических исследований являются основным источником при формировании банка данных для приборного и технологического базиса САПР ультраБИС и должны обеспечить создание их управляемой технологии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кулипанов Г.Н., Скринский А.Н. Использование синхротронного излучения: состояние и перспективы. — УФН, 1977, т. 122, вып. 3, с. 369.
2. Мазуренко С.Н., Матвеев В.М., Мануйлов В.В. Потенциальные возможности рентгенолитографии в пучках синхротронного излучения. — Электронная промышленность, № 3, 1989, с. 36–39.
3. Радиационно-стимулированные процессы в технологии функциональных слоев и элементов ИС/Алехин А.П., Бокков Ю.С., Вьюков Л.А. и др. — Электронная промышленность, 1992, № 3, с. 7–12.
4. Контроль дефектов и рентгенопографические исследования материалов микроэлектроники с использованием синхротронного излучения/А.А.Васенков, Г.Н.Кулипанов, Ю.М.Литвинов и др. — Электронная промышленность, 1986, вып. 3, с. 64–66.
5. Boettiger U.C., Dobbyu Burdette M.E. Real time tonography with x-ray image magnification. «Nucl. Instr. and Meth», 1982, 195, В 1–2, p. 355–378.
6. Ковальчук М.В., Кон В.Г. Рентгеновские стоячие волны — новый метод исследования структуры кристаллов. — УФН, 1986, т. 149, вып. 1, с. 69–103.

# Методы субмикронной фотолитографии

Ю.С.БОКОВ

Рассмотрены основные направления работ в области технологии субмикронной литографии и приведены результаты исследований некоторых перспективных методов. Методом проекционной фотолитографии на установке ЭМ-584А с  $\lambda = 405$  нм получены образцы субмикронных ( $\leq 0,8$  мкм) структур благодаря применению окрашенного фоторезиста, контрастусиливающих слоев, метода локальной химической модификации.

Оптическая литография видимого и ГУФ диапазона останется в ближайшие годы основным способом проведения литографических процессов в технологии СБИС. Важным аргументом в пользу оптической литографии является накопленный опыт в создании оборудования, материаловедении и технологии обработки резистов, позволяющий значительно снизить временные и ресурсные затраты на разработку субмикронной литографии.

Особенность применения оптической литографии в субмикронной области — в том, что литографические размеры воспроизводимых элементов становятся близкими к теоретическому пределу практически для всех известных источников экспонирующего излучения.

На итоговый результат процессов фотолитографии — формирование защитных масок (рельефа) фоторезистов с требуемыми параметрами — в удовлетворительном для производства диапазоне технологических режимов влияют две основные группы взаимосвязанных факторов. Первая группа факторов определяет влияние физических эффектов дифракции и интерференции, ограничивающих область применения фотолитографии.

Предельная разрешающая способность проекционной фотолитографии определяется следующими соотношениями:

$$d_r = \lambda / 2NA; \quad (1)$$

$$R = k(\lambda / NA); \quad (2)$$

$$d_f = \lambda / (2NA)^2. \quad (3)$$

Исследованию и моделированию дифракционных явлений в процессах формирования масок фоторезистов посвящен ряд фундаментальных работ [1—3].

Вторая группа факторов может быть интегрирована представлена коэффициентом  $k$  в уравнении (2) и определяет влияние на разрешающую способность и профиль масок суперпозиции технологических характеристик фоторезистов и операций их обработки, а также методов формирования маски. При переходе в область предельной разрешающей способности резко сужается диапазон отклонений от оптимума всех условий формирования маски и их влияние приобретает решающее значение.

Субмикронная фотолитография подразумевает формирование масок вблизи физического предела разрешающей способности, а также и за этим пределом. В этом случае наилучшие результаты получены при использовании пороговых и анизотропных эффектов на различных стадиях фотолитографического процесса, а также при применении методов, позволяющих снизить влияние физических факторов путем разнесения функций маски по разным технологическим слоям. Эти приемы частично компенсируют эффекты дифракции, отражения, неравномерности профиля освещенности по глубине слоя и т.п. Кроме того, эти приемы зачастую обеспечивают повышение защитных свойств маски. Так, применение многослойных масок позволяет разнести функции изображающие и защитные в различные слои. При этом тонкий изображающий слой обеспечивает высокую разрешающую способность, а толстый нижний выполняет функции планаризации, антиотражающую, маскирующую, профилирующую и другие.

Контрастусиливающие слои (КУС) эффективно снижают влияние дифракции, методы локальной химической модификации, кроме того, позволяют значительно повысить контраст процесса за счет пропорционального усиления изображения и т.д. Подобные воздействия возможны на различных стадиях процесса формирования маски и их конкретный набор определяется необходимостью и достаточностью, так как в противном случае возможно такое усложнение технологии, которое вызовет снижение производительности, выхода годных, управляемости, воспроизводимости. Последние в значительной степени определяются качеством технологического оборудования, сред, микроклимата. Кроме того следует отслеживать влияние тех или иных методов на привносимую дефектность. При этом также можно разделить дефектность, вносимую из материалов, применяемых при формировании маски, и

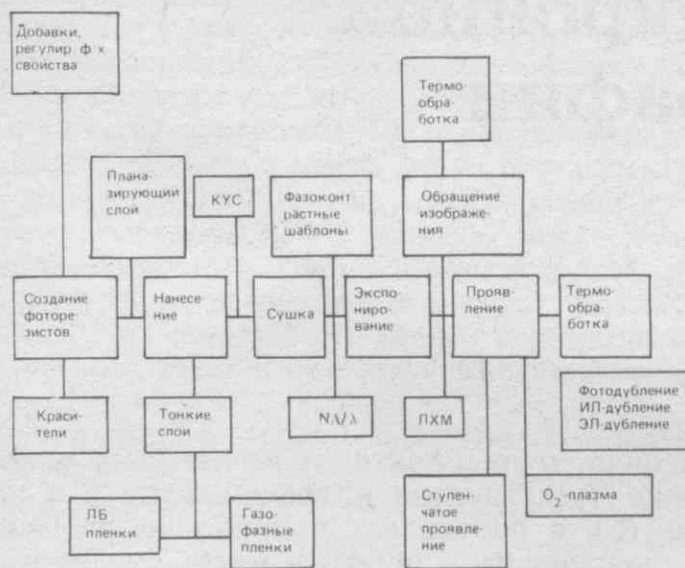


Рис. 1. Основные направления работ в области субмикронной фотолитографии

дефектность, вносимую из окружающей среды.

Основные стадии фотолитографического процесса и методы, применяемые в субмикронной фотолитографии представлены, на рис. 1.

В НИИФП развивается ряд технологических методов, представляющих интерес для субмикронной фотолитографии: введение добавок в фоторезист (красители, выглаживающие добавки, растворители), контрастусиливающие слои, метод локальной химической модификации (ЛХМ), многослойные (двухслойные) системы с плазмополимеризованными нижними слоями и тонкими изображающими слоями, полученными с применением процессов фотополимеризации, ЛХМ, Ленгмюра—Блоджетт.

**Контрастусиливающие слои.** В 1983 г. Гриффинг и Уэст [4] предложили метод повышения разрешающей способности, заключающийся в том, что на поверхность фоторезиста наносят

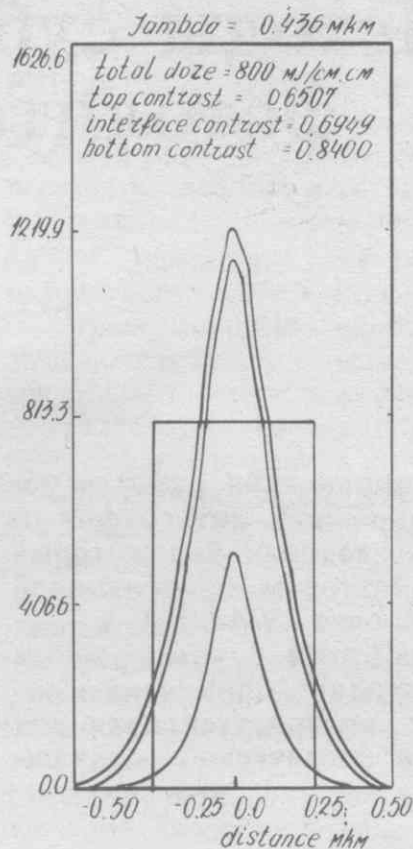


Рис. 2. Распределение освещенности в двухслойной системе КУС-фоторезист

пленку, обладающую свойством просветления под действием экспонирующего излучения. В этой же работе приведены рассчитанные оптические условия, при которых достигается эффект контрастусиления — начальное поглощение в пленке КУС  $>80\%$ , конечное —  $20\%$ . Так как локальная прозрачность КУС является возрастающей функцией поглощенной дозы, то дифракционная картина прошедшего через него излучения будет содержать только основные пики, а вторичные пики будут поглощены в пленке КУС. На рис. 2 представлены результаты моделирования процесса фотолитографии с применением КУС. Показано распределение интенсивности излучения на поверхности КУС, на нижней стороне КУС и на нижней стороне пленки фоторезиста. Видно, что после прохождения КУС и резиста дифракционный хвост существенно ослабляется. На рис. 3

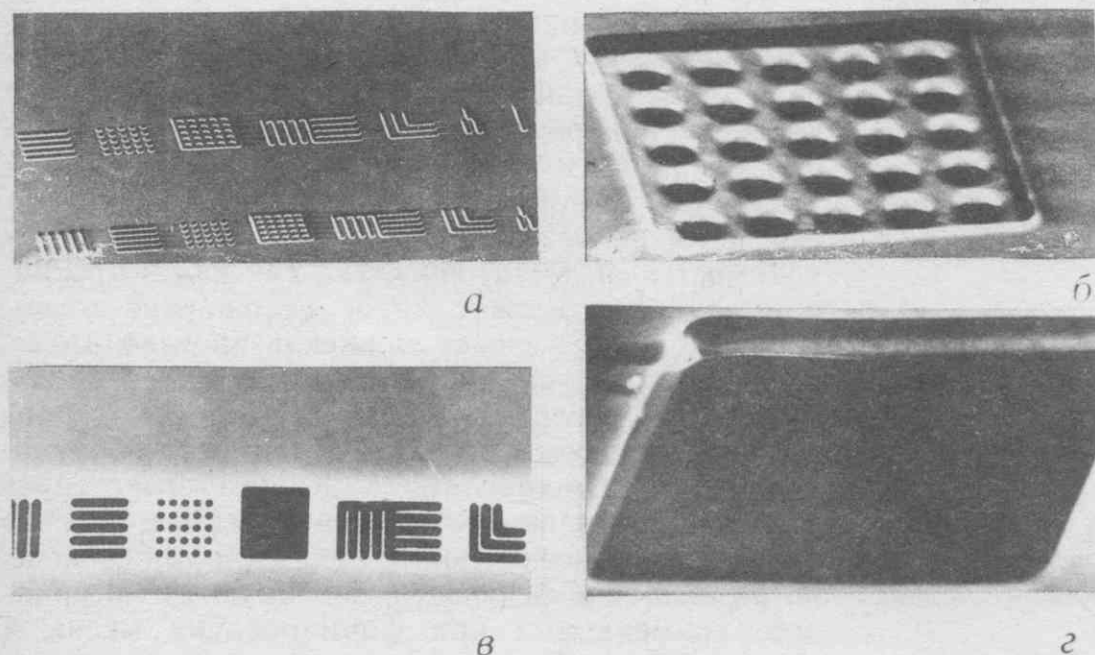


Рис. 3. Образцы структур, полученных методом проекционной фотолитографии (ЭМ-584А,  $\lambda=405$  нм) в слое ФП-051 МК с применением КУС (а,б) и без применения КУС (в,г)



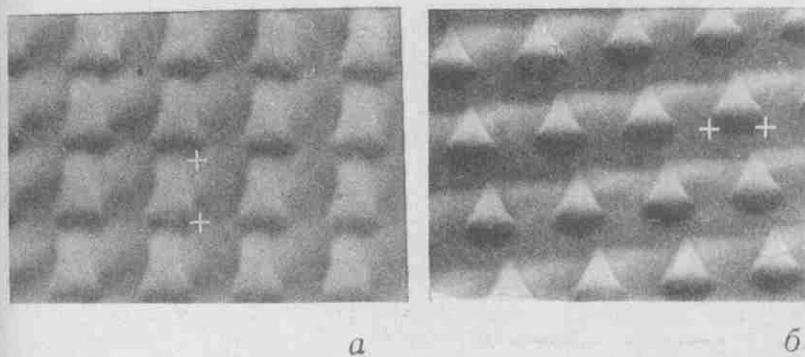


Рис. 4. Образцы структур в слое окрашенного (а) и исходного (б) фоторезиста ФП-051МК на поверхности Al

представлены типовые характеристики масок фоторезиста ФП-051 с применением КУС, который специально разработан для применения в субмикронной фотолитографии  $\lambda=405$  нм.

Видно, что применение КУС увеличивает разрешающую способность и фотографическую широту процесса. В настоящее время в НИИФП созданы композиции КУС и отрабатывается технология фотолитографии с их применением практически во всем диапазоне длин волн, применимых в фотолитографии, в том числе 248 нм, 254 нм, 266 нм и 365 нм.

**Фоторезист с красителем.** В 1970 г. Ю.С.Боков с сотрудниками впервые предложили метод ослабления потоков отраженного света путем введения в промышленный фоторезист красителей, поглощающих в актиничной области [5]. Для о-нафтохинондиазид новолачных фоторезистов при применении в процессах проекционной фотолитографии на *h* и *g* линиях было предложено использовать краситель жирорастворимый желтый К (4-N, N-диэтиламиноазобензол). Фотолитографические характеристики исходного и модифицированного фоторезиста в зависимости от коэффициента отражения *R* ( $\lambda=405$  нм) показывают увеличение фотографической широты, уменьшение приведенной чувствительности и контраста. В то же время введение красителя расширяет технологический диапазон для фоторезиста на слое Al более чем в два раза (для размеров элемента 5 мкм) (рис. 4). Особое значение вводимого красителя проявляется в области

Варианты	$H_{\min}$	$H_{\text{ср}}$	$H_{\max}$
Стандартный фоторезист			
Фоторезист с растворителем			
Фоторезист с красителем			
Фоторезист с красителем и растворителем			

воспроизведения микронного размера элемента (особенно на рельефной поверхности), где на первое место выходит форма профиля. Форма профиля масок фоторезистов определяется комплексом физических и технологических параметров.

В стандартном процессе фотолитографии можно различить несколько вариантов, позволяющих воспроизводить различные виды профиля в зависимости от экспозиции (*H*) (см. таблицу). Последний вариант является одним из вариантов, выполняющих основные требования субмикронной фотолитографии.

#### Метод локальной химической модификации.

Расчетное предельное разрешение проекционной фотолитографии согласно уравнению (1), (2) при переходе от излучения с длиной волны 436 нм к излучению с длиной волны 193 нм изменяется от 1,45 до 0,64 мкм (при  $NA=0,3$  и  $K=1$ ). Практически же требуется получение в этом диапазоне элементов с разрешением от 1 до 0,25 соответственно длине волны излучения  $\lambda$ . При этом толщина слоя фоторезиста жестко ограничивается глубиной фокуса, которая с увеличением *NA* и уменьшением  $\lambda$  быстро уменьшается. Это приводит к требованию использования максимально тонких пленок фоторезиста. Однако при этом резко снижаются защитные свойства маски фоторезиста. Для снятия этого противоречия применяют метод многослойной маски в различных вариантах — трехслойные маски с барьерным слоем и двухслойные маски с кремнийорганическим резистом (или другим, устойчивым к воздействию РИТ-О<sub>2</sub>). При этом существуют многочисленные разновидности метода, различающиеся выбором материалов для нижнего слоя, барьерного слоя и резиста для двухслойной маски. Преимуществом варианта трехслойной маски является возможность применения разбавленного стандартного фоторезиста. Однако, сложность формирования трехслойной маски, как правило, сводит на нет все преимущества этого метода, в связи с чем предпочтительнее выглядит двухслойный вариант. Здесь существует две проблемы, которые в той или иной степени решаются — это разработка соответствующего резиста и обеспечение процесса, исключая образование переходного слоя. В настоящее время имеется большое количество публикаций работ по созданию резистов для двухслойной маски. Их основой в большинстве случаев являются полиорганосилоксаны различного строения, в том числе с фенольными группами, позволяющие создавать позитивные материалы на основе о-НХД светочувствительных продуктов. В качестве нижнего слоя применяют слой высокосшитых органических полимеров, полиимиды, задубленные фоторезисты [6—9].

Более интересным методом такого рода является метод ЛХМ, который имеет две модификации. В классическом виде метод ЛХМ предусматривает формирование изображения в приповерхностном слое толстого позитивного фоторезиста. Благодаря высокой оптической плотности фоторезиста формирование изображения

производится в приповерхностных слоях, где при засветке образуются продукты фотолитографии, способные к взаимодействию с силилирующими агентами, например, с гексаметилендисилазаном (ГМДС). Продукты силилирования обладают устойчивостью к воздействию кислородной плазмы и служат маской при проявлении изображения методом кислородного реактивно-ионного травления (РИТ- $O_2$ ). При этом формируется негативное изображение. Влияние дифракционных эффектов резко снижается вследствие сильного поглощения фоторезиста, что обеспечивает высокую разрешающую способность метода. Такой процесс в литературе известен под названиями DESIRE или PLASMASK [10, 11]. Условием достаточной селективности проявления методом РИТ- $O_2$  является содержание кремния в силилированной области не менее 7% ат. [12]. С применением этого метода получены маски с разрешением 0,4 мкм в фоторезисте толщиной до 2 мкм. Для такого процесса необходим специальный фоторезист, отличающийся повышенным поглощением на рабочей длине волны, высокой функциональностью, термостойкостью. Особые требования предъявляются к процессу РИТ- $O_2$ , который должен обеспечить высокую селективность, анизотропию и чистоту проявления. Этим требованиям отвечает разработанный фоторезист на основе сополимера метилметакрилата с метакриловой кислотой о-НХД [13], на котором были получены субмикронные структуры. В дальнейшем для повышения плазмостойкости было предложено введение в состав такого фоторезиста новолачной смолы [14]. Другой разновидностью метода ЛХМ, сохраняющей тональность (позитив) изображения, является процесс, сочетающий элементы сухой и жидкостной технологии и отличающийся тем, что ЛХМ (силилированию) подвергается уже проявленный тонкий слой фоторезиста, нанесенного на органический базовый слой. Этот процесс занимает промежуточное положение между DESIRE-процессом и двухслойной технологией с кремний-органическими фоторезистами. Он включает формирование нижнего слоя, формирование тонкого слоя фоторезиста, экспонирование и проявление слоя фоторезиста, силилирование (газофазное или жидкостное) фоторезиста, РИТ- $O_2$  нижнего слоя, а также вспомогательные операции. На рис. 5 изображены схемы DESIRE- и процессы ЛХМ проявленного фоторезиста. Применение тонкого слоя фоторезиста позволяет улучшить разрешающую способность, а использование независимого нижнего слоя позволяет реализовать заданные функции. Предложено в качестве нижнего слоя использовать плазмополимеризованные пленки, которые в зависимости от условий плазменной полимеризации могут повторять рельеф или же планаризировать поверхность. Исследованы условия получения и свойства слоев на основе плазмополимеризованных алкилариллов, непредельных кислот и их производных. На рис. 6 представлены изображения масок, полученных при использовании плазмополимеризованного ксилола (ППК) и фоторезиста ФП-051 МК толщиной 0,35 мкм. В эту технологию хорошо вписываются маски с применением тонких светочувствительных слоев — пленок Ленгмюра—Блоджетт ( $h \sim 30$  нм) и фотополиме-

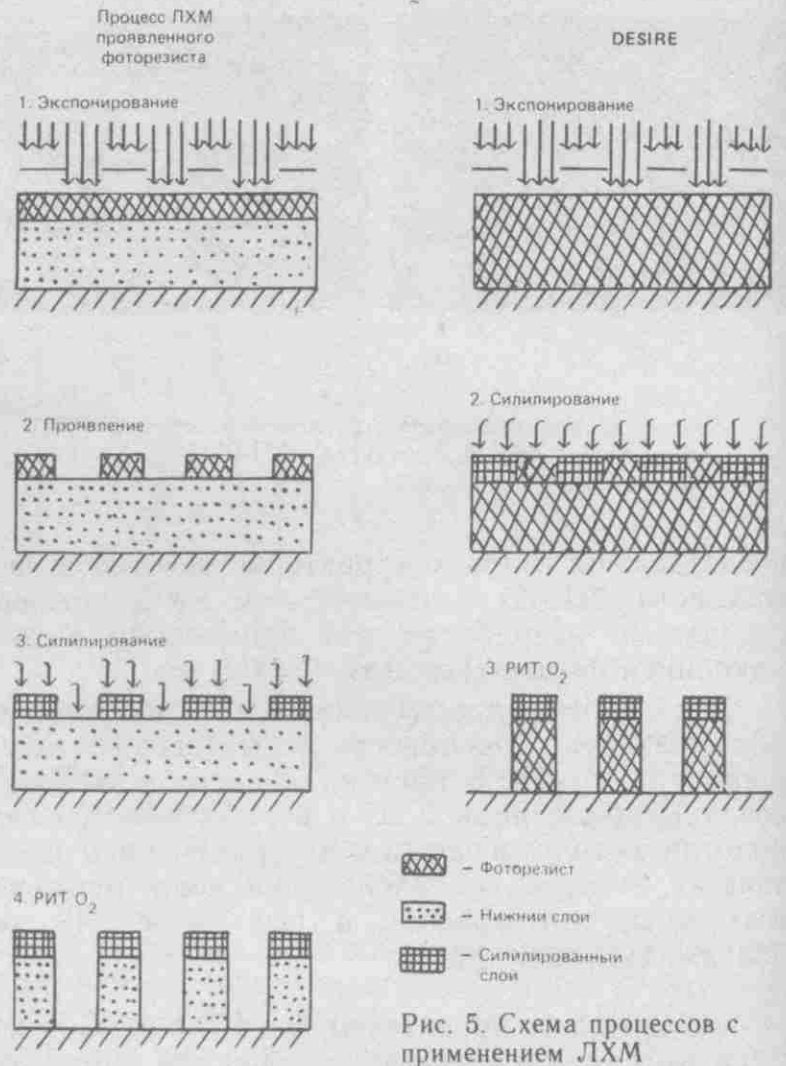


Рис. 5. Схема процессов с применением ЛХМ

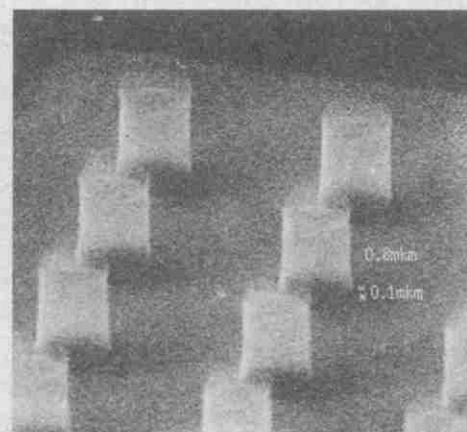


Рис. 6. Структуры, полученные с применением метода ЛХМ в маске ППК/ФП-051 МК

ризованных пленок ( $h \sim 100-150$  нм).

Кроме, того интерес представляют и другие методы (см. рис. 1) — ступенчатое проявление и введение добавок в состав фоторезиста, регулирующих физико-химические свойства. Ступенчатое проявление позволяет регулировать профиль проявленного изображения [15], а с помощью добавок можно задавать градиент изменения свойств фоторезиста по глубине, например, добавляя некоторые растворители, обладающие низкой летучестью, можно сформировать слой, растворимость которого увеличивается от поверхности к подложке и тем самым обеспечивается выравнивание профиля изображения [16].

Рассмотренные методы в оптимальном сочетании обеспечивают продвижение за физические пределы разрешения фотолитографии и позволяют формировать структуры на субмикронном уровне. При соответствующих параметрах проек-

ционной системы ( $\lambda$ ,  $NA$ ) и применении КУС, ЛХМ, добавок фотолитография способна быть основным методом формирования субмикронных структур с разрешением 0,2—0,3 мкм для создания СБИС и УБИС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мороз У. Микролитография. Принципы, методы, материалы. Часть 1.— М.: Мир, 1990, с. 466—496.
2. Donald W. Johnson, Chries A. Mack. Modeling the continuing realm of optical lithography.— Semiconductor International, 1992, vol. 34, N 5, p. 134—139.
3. Burggraaf P., Editor S. Lithography's leading edge, part 1: phase-shift technology.— Semiconductor International, February, 1992, p. 42—47.
4. Griffin B., West P. Contrast enhanced photolithography.— IEEE Trans. Electron. Dev. Lett., 1983, vol. EDL4, N 1, p. 14—16.
5. Бок в Ю.С. Введение в фотолитографию.— М.: Энергия, 1977.— 400 с.
6. Pilz W., Sponhobz T., Pongratz S. Submicron patterns formed by reactive ion etching.— Microelectron Eng., 1985, N 3(1—4), 46773.
7. High resolution double layer resist system using new silicone based negative resist (SNR)/M.Masao, T.Akinoby, J.Saluro et al.— J. Jap. Appl. Phys., 1983, Pt. 2, 22, N 10, p. 659—660.

8. Negative-working resist pattern formation.— Fujitsu Ltd. Jap. Kokai. Tokio Koho JP. 60, 116, 132 [85, 116, 132].
9. New trilayer and layer resist systems using silyl ethers of novolak a low molecular weight resist/K.Ryuji, Y.Yoshio, J.Toshio et al.— J. Vac. Sci. Technol., B, 1986, 4(1), p. 409—413.
10. Brust T.B., Turrer S.R. Mechanistic study of a selective gas-phase reactive microlithographic system.— SPIE, vol. 771 Advances in Resist Technology and Processing IV, 1987, p. 102—110.
11. Европейская заявка EPA 0.136.130 Method of making articles using gas functionalized plasma developed layer/L.Stillwagun, G.Taylor, T.Venkatesan et al.
12. Coormans F., Roland B., Lombaerts R. Effects of sililation parameters on the lithographic performance of the desire system.— Microelectronics Engineering, 1986, N 5, p. 291—297.
13. Бок в Ю.С., Киреев В.Ю., Фролов В.М. Ионно-плазменное проявление скрытого силилированного изображения в пленке фоторезиста.— Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1984, вып. 2, с. 11—14.
14. The scope and mechanist of new positive gas-phase functionalized plasma-developed resists/T.M.Wolf, G.N.Taylor T.Venkatesan, R.T.Kraetsch.— J. Electrochem. Soc., 1984, 131, N 7, p. 1667—1670.
15. Hopla R., Blankeney A., Wright P. A novel, high contrast positive photoresist system.— Proc. SPIE, 1985, N 539, p. 308.
16. Фролов В.М., Селиванов Г.К., Фирсов Р.Г. Исследование антиобъемного эффекта в фотолитографии.— Электронная промышленность, 1992, вып. 6, с. 14—17.

## Мембранные микроконструкции на основе прецизионной технологии микроэлектроники

Г.В.АКУЛОВА, В.С.КОРСАКОВ, С.Н.МАЗУРЕНКО, В.И.МИШАЧЕВ,  
Л.П.НИКОЛАЕВА, Н.С.САМСОНОВ, Л.А.СЕМЕНИХИНА,  
Н.Ф.ТРУТНЕВ

Мембранная технология позволяет создавать высокочувствительные рентгеношаблоны, разделительные вакуумно-плотные окна каналов вывода СИ, фильтры для различных областей спектра СИ, элементы микродатчика давления, расхода, наличия агрессивных сред, радиационного воздействия.

В технологии и исследованиях в области рентгеновской литографии широко применяются тонкие рентгенопрозрачные мембраны толщиной 0,5—3,0 мкм. Эти мембраны первоначально были предназначены только для рентгеношаблонов (РШ), но постепенно область их применения значительно расширилась, в частности: разделительные вакуумно-плотные окна каналов вывода синхротронного излучения (СИ), фильтры для различных областей спектра СИ, элементы микродатчиков давления, расхода, наличия агрессивных сред, радиационного воздействия и др.

На основе технологических процессов формирования мембранных микроконструкций и не-

которых стандартных технологий полупроводниковой микроэлектроники возможно получение изделий, имеющих широкое применение в различных областях науки и техники [1].

Мембранная микроконструкция обеспечивает свободное состояние тонких пленок, закрепленных по периметру опорной рамки и при этом их прочность, плоскостность, ненапряженность, размеростабильность и др. Комплекс технологических процессов изготовления мембраны с необходимыми параметрами имеет некоторые особенности, а именно:

— необходимость выбора материала с особыми требованиями к механическому или радиационному воздействию;

— возможность формирования свободных мембран на замкнутой или (как частный случай) на нескольких или одной опорах (мостик, консоль);

— формирование функциональных слоев на мембранной микроконструкции различной конфигурации и из различных материалов;

— специальные методы контроля технологических и конструктивных параметров.

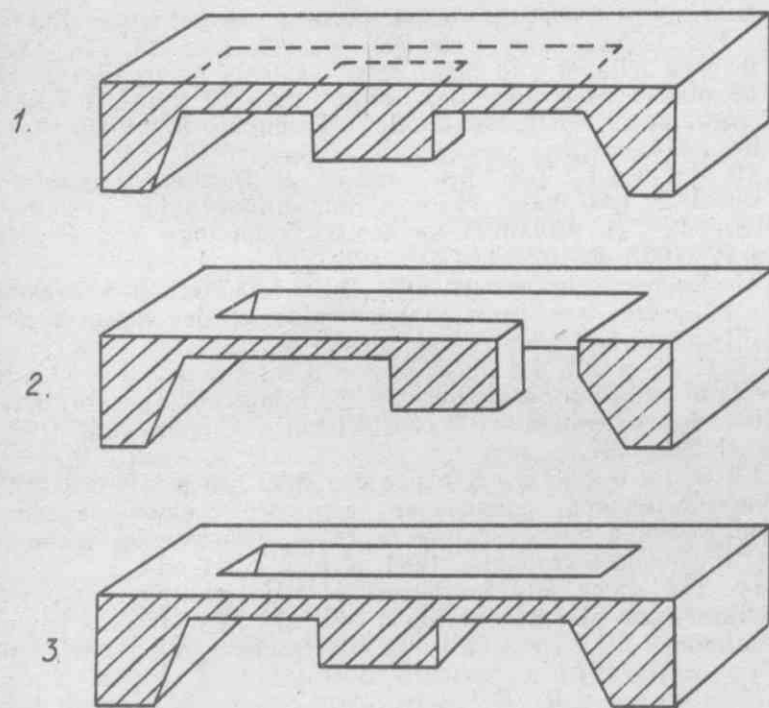


Рис. 1. Мембранные конструкции: 1 — мембрана с инерционной массой; 2 — консоль; 3 — мостик (струна)

На рис. 1 показаны наиболее распространенные мембранные конструкции, полученные для различных изделий. Выбор материала для мембраны определяется спецификой конечного изделия (рентгеношаблоны, вакуумное окно, фильтр, датчики давления и др.). При этом обязательными требованиями являются: прочность, размеростабильность, ненапряженность, долговечность, плоскостность, равномерность, упругость. Дополнительными могут быть: рентгеновская прозрачность, высокая аспектность литографии функциональных слоев, оптическая прозрачность, адгезионная прочность.

В качестве мембран применялись органические материалы: полиимид (ПИ), парилен

(ПРН) и полидифенилены (ПДФ). Мембранные конструкции на основе органических материалов достаточно прочны, ненапряжены, рентгено- и оптически прозрачны. Однако эти мембраны недолговечны, имеют низкую размеростабильность по сравнению с мембранами из неорганических материалов, нестойки к агрессивным средам и радиационному воздействию.

Мембраны на основе неорганических материалов размеростабильны, упруги, радиационно стойки, но имеют недостатки: хрупкость, низкую прочность, напряженность. Наиболее распространенные неорганические материалы, применяемые в мембранных конструкциях, — кремний и кремнийсодержащие соединения [2]. На рис. 2 показана полученная мембранная микроконструкция РШ, в таблице приведены параметры мембран.

Хорошие результаты дают АП, полученные из углеродной плазмы на модифицированной установке УРМ при рабочем давлении в вакуумной камере  $10^{-3}$  Па.

Кремний и кремнийсодержащие материалы являются универсальным материалом для изготовления РШ и ЧЭ микродатчиков различного назначения. Он обладает более высокой упругостью, чем нержавеющая сталь, его удельная

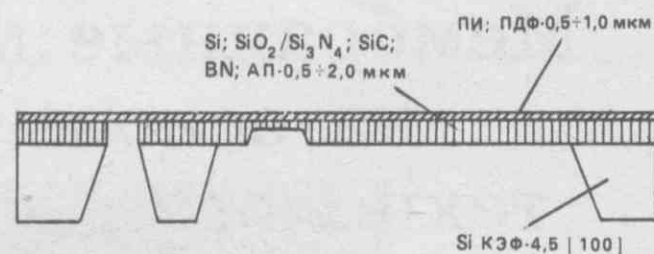


Рис. 2. Мембранная заготовка рентгеношаблона с окнами для знаков совмещения

Материал	Толщина, мкм	Площадь, мм <sup>2</sup>	Прочность, кгс/см <sup>2</sup>	Рентгенопрозрачность, %	Размеростабильность	Оптическая прозрачность, % при $\lambda = 0,63$ мкм
Si	2,0	Ø50	0,02	50,0	$10^{-6}$	20(50)*
Si/ПИ	1,5/0,5	40×40	0,15	50,0	$10^{-6}$	30
Si/ПИ	1,0/1,0	15×30	0,20	50,0	$10^{-6}$	40(60)*
ПИ	2,5	Ø90	0,25	50,0	$10^{-5}$	95
ПДФ	1,5	15×15	0,25	60,0	$10^{-5}$	95
SiO <sub>2</sub> /Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1,5	15×15	0,02	50,0	$10^{-6}$	95
SiO <sub>2</sub> /Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /ПИ	1,5/0,5	15×15	0,25	50,0	$10^{-6}$	95
BN	1,5	Ø10	0,05	50,0	$5 \times 10^{-6}$	50
SiC	1,5	Ø10	0,05	50,0	$10^{-6}$	50
АП	1,0	Ø10	0,3	60,0	$10^{-6}$	50

Примечание: \* — при наличии специальных окон для знаков совмещения.

масса соизмерима с алюминием. В отличие от большинства металлов, кремний выдерживает многократные нагрузки и не деформируется. Различные типы ЧЭ (мембраны, балки, консоли и т.п.) в виде микронных трехмерных механических структур способны быстро и точно воспринимать изменения, происходящие в окружающей среде.

Структуры микромеханических конструкций делятся на группы: статические, динамические, кинематические. К статическим конструкциям относятся трехмерные сопла, полости, капиллярные колонки, кольцевые отверстия, миниатюрные электрические разъемы и т.п. К динамическим структурам относятся диафрагмы, мембраны, микромостики, балки, консоли, решетки и т.п. К кинематическим структурам относятся микропередачи, турбины, пружины, вкладыши, электростатические моторы, клапаны, заслонки и т.п. Структуры статического и динамического типов используются в качестве ЧЭ микродатчиков, а кинематического в системах микророботов и для целей микрохирургии. Основным технологическим методом микрообработки кремния является анизотропное жидкостное травление в сочетании с методом сухого вакуумного травления (РИЛТ, ПХТ). Реагентами для анизотропного травления служат водные растворы гидразина, этилендиамина, щелочей. Несмотря на достижение максимальных значений параметров мембранных конструкций по прочностным характеристикам, они достаточно хрупки. Это в значительной мере определяется балансом внутренних напряжений между основной несущей деталью (мембраной, консолью, мостиком и т.д.) и воздействием последующих технологических процессов. Поэтому осаждение на свободную мембрану дополнительных слоев является ответственной операцией, например, осаждение тугоплавких металлов — золота толщиной 1,5 мкм при толщине мембраны 1,5—2,0 мкм. С этой целью был разработан процесс термоионного осаждения ненапряженных металлических покрытий, принцип которого состоит в следующем: пары рабочего вещества, например золота, поступают из тигля, разогреваемого электронной бомбардировкой, в зону скрещенных электрического и магнитного полей, где загорается разряд низкого давления. Образующийся в разряде поток ионов рабочего вещества ускоряется по направлению к подложке, на которую может быть подан отрицательный относительно тигля потенциал. Рост пленки металла осуществляется в условиях непрерывной бомбардировки собственными ионами при давлении  $10^{-5}$  мм рт.ст. В случае распыления тугоплавких металлов с температурой распыления выше, чем у золота, электронной бомбардировке подвергается не тигль, а непосредственно испаряемый материал. Данный метод обладает возможностью управления механическими напряжениями в пленке с помощью смещения тока и давления в вакуумной камере. Были получены пленки золота толщиной 1,5 мкм с внутренними напряжениями  $10^6 \div 10^8$  дин/см<sup>2</sup> и тантала соответственно — 0,8 мкм;  $10^7 \div 10^8$  дин/см<sup>2</sup>.

Метод формирования топологии функциональных слоев в маске рентгеношаблона путем трав-

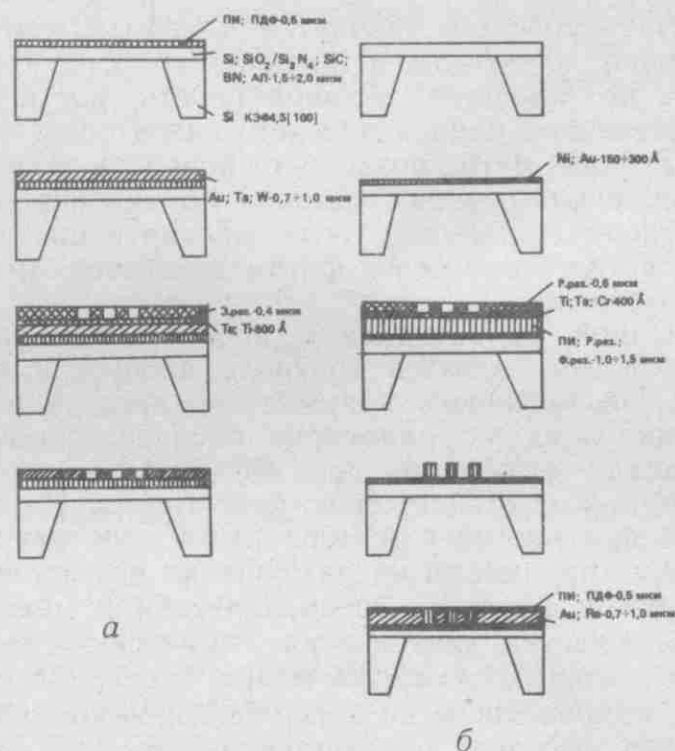


Рис. 3. Принципиальный техмаршрут изготовления РШ субтрактивным (а) и аддитивным (б) методами

ления называется субтрактивным. Формирование топологии функционального слоя с помощью промежуточного технологического слоя называется аддитивным методом. В этом случае матрица формируется в каком-либо органическом материале, а затем методом электрохимического осаждения выращивается функциональный слой необходимой толщины. Разработана технология получения маскирующего покрытия субтрактивным и аддитивным методами с высоким аспектным соотношением 5:1. Маршрут получения РШ субтрактивным и аддитивным методом показан на рис. 3. Аддитивный метод обязательно включает мокрый процесс электрохимии, что в случае применения комбинированной мембраны из органических и неорганических материалов не всегда возможно.

Формирование функционального слоя следует проводить после операции освобождения мембраны (рис. 3), так как в противном случае возникающие искажения в мембранной конструкции переносятся в функциональный слой. Формирование топологии в функциональных слоях субтрактивным методом на свободных мембранах является сложной задачей. Проблема заключается в том, что при ионно-радиационном воздействии нарушается баланс распределения напряжений в мембране и дополнительных технологических слоях настолько, что превышает предел прочности мембраны, приводящий либо к механическому разрушению, либо к недопустимой ее деформации. Данный факт связан с плохим отводом тепла на свободных мембранах. Для уменьшения влияния перегрева мембраны разработан процесс травления толстых покрытий из тугоплавкого металла методом РИЛТ. Охлаждение мембраны осуществляется струями гелия, проходящими через специальную камеру. В этом

случае заготовка находится в неподвижном состоянии и возможна неравномерность травления по площади. Равномерность достигается применением набора плоских генераторов.

Данный метод позволяет проводить травление тугоплавких пленок толщиной 1,5 мкм без дополнительных промежуточных маскирующих слоев непосредственно через фото-, электро- и рентгенорезисты.

Одной из актуальных проблем мембранной технологии является контроль прочности мембран. За прочность принимается предельная величина усилия, равномерно распределенного по площади мембраны, при воздействии которого мембрана сохраняет свою целостность. На практике при работе с мембранными конструкциями обычно причинами их разрушения являются воздействия: вакуума, пневматической и механической оснастки, ультразвука, химических сред, дополнительных технологических слоев. Воздействие, направленное по поверхности мембраны, является наиболее разрушающим. В этом случае напряжения, растягивающие материал мембраны, приводят к ее короблению, что практически делает ее непригодной для дальнейшего использования, а если коробление очень большое и к ее разрушению. При напряжениях, сжимающих материал мембраны, происходит максимальное натяжение мембраны и, если его величина превышает предел прочности, мембрана разрушается. Очевидно, что контроль и управление напряжениями, особенно в случае многослойной мембраны, необходим для получения достаточно прочных мембранных конструкций. Распределенное давление по поверхности мембраны связано с предельной нагрузкой на разрыв [4].

В основе принципа измерения напряжений в мембранных конструкциях используется принудительный изгиб с помощью гидро-пневмовоздействия. Вычисление напряжений проводится по формуле  $\sigma_p = \frac{P(d^2 + 4S_p^2)}{16S_p \cdot h}$  с экстраполяцией зависимости  $\sigma = \sigma(p)$  при  $p=0$ ; при этом  $P$  — распределенное давление, приложенное к мембране;  $h$  — толщина мембраны,  $d$  — диаметр мембраны,  $\sigma$  — начальное внутреннее напряжение,  $S_p$  — стрела прогиба мембраны. Измерения сводятся к контролю прогиба при фиксируемой нагрузке [4].

Для контроля напряжений в мембранах с малой площадью  $\varnothing 10$  мм и менее, когда величина стрелы прогиба трудно контролируема, нами разработана методика на основе акустического резонанса. Принцип метода заключается в зависимости резонансной частоты мембраны от ее механических параметров: плотности, толщины, диаметра и упругости материала мембраны.

Напряжения рассчитываются по формуле:  $\sigma = P_m(2,01f_{\text{вак}} \cdot r_m)^2$ , где  $P_m$  — плотность, например, кремния,  $f_{\text{вак}}$  — резонансная частота в вакууме,  $r_m$  — радиус мембраны. Определение напряжения в мембране сводится к определению резонансной частоты в конкретном объеме, величина которой входит в формулу:

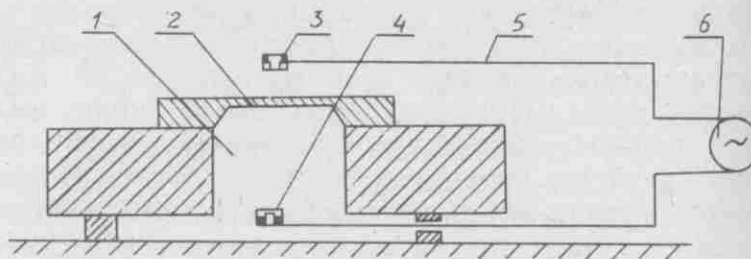


Рис. 4. Принципиальная схема устройства для измерения напряжений акустическим методом: 1 — камера замкнутого объема; 2 — мембрана; 3 — микрофон задающий; 4 — микрофон регистрирующий; 5 — электропроводки; 6 — генератор-регистратор

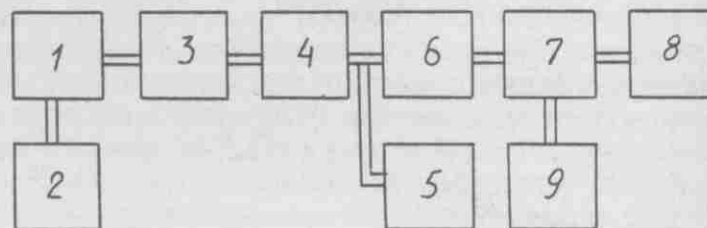


Рис. 5. Блок-схема измерительного стенда: 1 — генератор звуковой частоты; 2 — частотометр; 3 — микрофон; 4 — мембрана; 5 — интерферометр; 6 — микрофон в камере; 7 — усилитель; 8 — осциллограф; 9 — источник питания

$$f_{\text{вак}} = f_{\text{об}} \left( 1 + \frac{3,27 \cdot 10^5 r^2}{V \cdot P_m \cdot h_m \cdot f_{\text{об}}^2} \right)^{1/2} \frac{1}{\sqrt{2}}$$

где  $f_{\text{об}}$  — резонансная частота в камере с известным объемом,  $V$  — объем камеры. На рис. 4 показана принципиальная схема устройства для измерения напряжений акустическим методом, а на рис. 5 — блок-схема измерительного стенда.

Мембранные структуры, полученные методом стоп-слоя с последующим травлением монокристаллического кремния на определенную глубину, могут иметь, как положительные (мембрана натянута), так и отрицательные (мембрана сморщена) напряжения. Разработаны методы регулирования этих напряжений [5]. Для снижения напряжений проводится дополнительное подлегирование элементами с соответствующим эффективным радиусом атома. Например, в случае легирования кремния, эффективный радиус атома которого  $r_{\text{Si}} = 0,117$  нм, атомами бора ( $r_{\text{B}} = 0,089$  нм), то для снижения напряжений необходимо провести подлегирование атомами мышьяка ( $r_{\text{As}} = 0,18$  нм) или атомами германия ( $r_{\text{Ge}} = 0,122$  нм). При этом происходит компенсация несоответствия решеток, вызванная диффузией бора, и сохраняется селективность анизотропного травления. На основе мембранной конструкции разработана базовая технология изготовления рентгеношаблонов. В настоящее время получены образцы рентгеношаблонов с параметрами:

Минимальный размер элемента	0,5—0,3 мкм
Контраст	10
Рентгенопрозрачность	60%
Размеростабильность	$10^{-6}$
Оптическая прозрачность в окнах для знаков совмещения	60—90%
Прочность	0,02—0,25 кГс/см <sup>2</sup>
Размер мембраны	Ø90 мм
Опорное кольцо	Ø100 мм

Базовая конструкция является основной и для изготовления окон в каналах вывода синхротронного излучения, позволяющих разделять вакуум в накопительном кольце  $10^{-11}$  торр и рабочей камере мультипликатора. Варьируя различные материалы и используя их как слабые поглощающие покрытия, на мембране получены фильтры для выделения соответствующих спектральных зон синхротронного излучения (СИ). Используя базовую технологию РШ получены балометры для исследования СИ при его непосредственном воздействии [6].

Комплекс технологических процессов по созданию мембранных микроконструкций выливается в отдельное направление мембранной технологии. С помощью данной технологии получены образцы чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков давления и акселерометров.

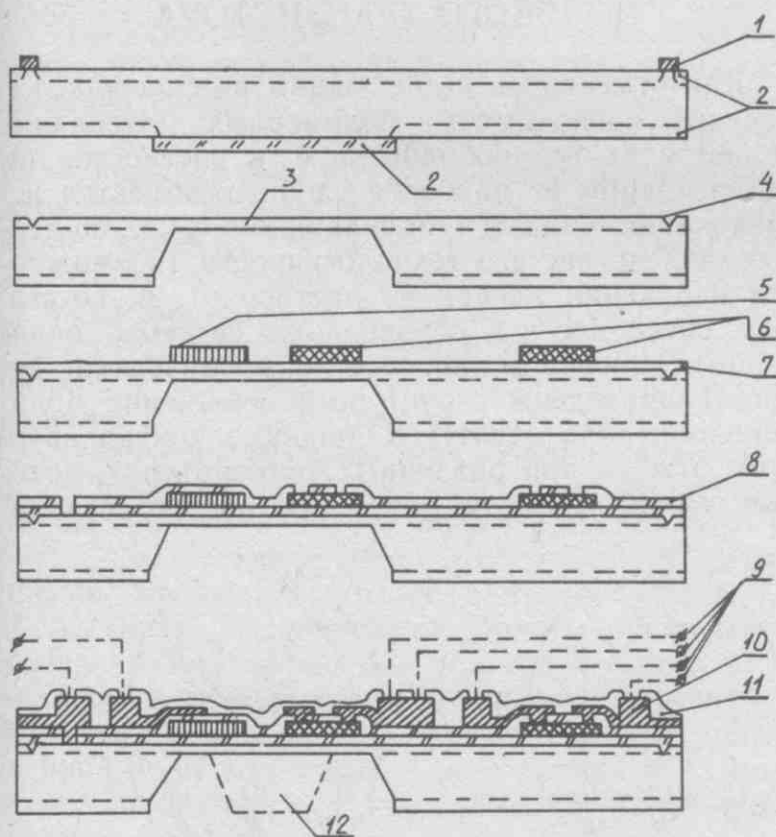


Рис. 6. Универсальный техмаршрут и принципиальная схема конструкции ЧЭ датчика давления и акселерометрии: 1 — окисление ( $\text{SiO}_2$  — 0,5 мкм), двухсторонняя фотолитография окон под мембрану и знаков совмещения; 2 — диффузия бора  $10^{20}$  см<sup>-3</sup> в подложку кремния Si КЭФ — 4,5(100); 3 — формирование мембраны Si+B — 2 мкм; 4 — знаки совмещения; 5 — пьезоэлектрический слой ZnO — 1 мкм; 6 — пьезорезисторы  $R$  — 1000 Ом; 7 — разделительный диэлектрик  $\text{Si}_3\text{N}_4$  — 0,1 мкм; 8 — изолирующий диэлектрик  $\text{SiO}_2$  — 0,2 мкм; 9 — электровыводы; 10 — металлизация и контактные площадки Al — 0,1 мкм; 0,8 мкм; 11 — защита — ПИ — 0,5 мкм; 12 — инерционная масса ЧЭ датчика акселерометрии

На рис. 6 принципиально показан унифицированный техмаршрут и конструкция ЧЭ датчика давления и акселерометрии со следующими параметрами:

Диапазон	0,1— $10^5$ Па (0,5— $10^3$ ) g
Частотный диапазон Резонансная частота (регулируемая)	0,15—150000 Гц 3—10 кГц
Чувствительность преобразователя	0,2—0,4 мВ/П (мВ/д)
пьезоэлектрический	20—30 мВ/П (мВ/д)
пьезорезистивный	$4 \times 4 \times 0,5$ мм
Габаритные размеры	$\leq 0,5$ г
Масса	

Особенностью технологии является проведение всех операций на свободных мембранах с учетом возникающих нагрузок и напряжений. Подобная базовая конструкция ЧЭ может найти применение для датчиков различного назначения: регистрации супернизких давлений, расходов, контроля ускорений в системах безопасности, наличия агрессивных сред и т.д. Пьезоэлектрические ЧЭ не требуют питания и имеют более широкий температурный диапазон. Пьезорезистивный тип ЧЭ имеет большую чувствительность и воспроизводимость технологии.

Вышеизложенное не является пределом использования и развития выделяющегося направления полупроводниковой технологии. Бурный рост достижений в рентгеновской литографии, аналитических исследований в пучках СИ и прикладных отраслях науки и техники предполагает дальнейшее совершенствование мембранной технологии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Изготовление микродатчиков методом трехмерной обработки кремния/Г.В.Акулова, В.С.Корсаков, С.В.Лиховид и др.— Электронная промышленность, 1992, вып. 3, с. 43—46.
2. M a l d o n a d o J.R. X-ray Lithography, Where it is Now, and Where it is Going.— J. of El. Materials., vol. 19, N 7, 1990.
3. Рентгеношаблоны на основе алмазных пленок/А.В.Аверин, Г.В.Акулова, В.С.Корсаков и др.— Электронная промышленность, 1992, вып. 3, с. 33—35.
4. Технологический контроль в производстве рентгеношаблонов/А.П.Алехин, Э.Н.Гамзаев, В.С.Корсаков и др.— Там же, с. 27—32.
5. Компенсация внутренних напряжений в кремниевых мембранах/В.И.Мишачев, С.Н.Мазуренко, В.С.Корсаков и др. 7-я Международная конференция по микроэлектронике-90, т. 2, с. 15 (Минск).
6. К а ш и ц к и й Л.М., М а з у р е н к о С.Н. Измерение профиля распределения мощности пучка мягкого рентгеновского излучения.— Электронная промышленность, 1992, вып. 3, с. 39.

# Проводящие полимеры — конструкционные материалы микроэлектроники и электротехники

(ОБЗОР)

Полимерные материалы с момента своего использования в различных областях техники получили широкое признание как материалы с высокими диэлектрическими свойствами (сопротивление —  $10^{12}$ — $10^{14}$  Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$ ). Однако в 1958—1960 гг. были получены полимеры с повышенной электропроводностью ( $10^2$ — $10^{-1}$  Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$ ), псевдометаллическими и полупроводниковыми свойствами. Такие полимеры (классический представитель которых — полиацетилен), имеющие систему полисопряженных химических связей, получили название проводящих полимеров (ПП), причем электропроводность таких полимерных систем можно направленно изменять в широких пределах как на стадии синтеза самого полимера, так и при дальнейшем воздействии на них различных факторов: термообработки, облучения различными видами электромагнитного и ядерного излучения и т.п.

Поэтому на протяжении всех этих лет исследования проводящих полимеров носили как фундаментальный (с целью изучения механизмов проводимости и методов синтеза), так и прикладной характер.

С использованием проводящих полимеров были созданы различные полупроводниковые приборы, например, тензодатчики, автоматические терморегуляторы, стабилизаторы напряжений электрических цепей [1], на основе легированных полианилинов разработаны материалы электродов химических источников тока [2], на основе солей полипирролов [3] — полимерные электролиты конденсаторов. Были разработаны макеты полевых транзисторов с использованием ПП в качестве активного полупроводника [4]. Обнаруженный эффект фотопроводимости в полифениленах, полинитрилах, полифталоцианинах [5] позволил использовать их в качестве фотодетекторов. Так, например, квантовый выход люминесценции некоторых полифениленвиниленов составил более 1%.

В 80-х годах исследовались свойства проводящих полимеров, связанные с квазиодномерной структурой полимерных макромолекул. Было установлено, что в высокоориентированных пленочных образцах подвижность носителей заряда в направлении молекулярной цепи достигает значения  $6000$  см $^2$ /В·с [6], что на 8—10 порядков превышает подвижность носителей заряда в массивных образцах. Возможно, именно это

свойство станет решающим аргументом в пользу широкого применения ПП в качестве материалов электронных приборов.

В НИИ физических проблем на протяжении последних лет проводились исследования в области химии и физики проводящих полимеров, особое внимание было уделено изучению возможности использования ПП для создания приборов с каналами субмикронных размеров.

## ТЕРМОКОНВЕРТИРУЕМЫЙ ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛ — КОНСТРУКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

Как отмечалось выше, одним из способов изменения проводимости полимерных материалов является их термообработка и, в частности, пиролиз. Одним из наиболее удобных объектов исследования является полиакрилонитрил, во-первых, вследствие его технологичности (возможности получения пленок из растворов), а, во-вторых, способности к образованию системы сопряженных связей в процессе термообработки. На рис. 1 приведены структурные изменения полиакрилонитрила (ПАН) в процессе контролируемого отжига при различных температурах, которые можно условно разделить на две стадии:

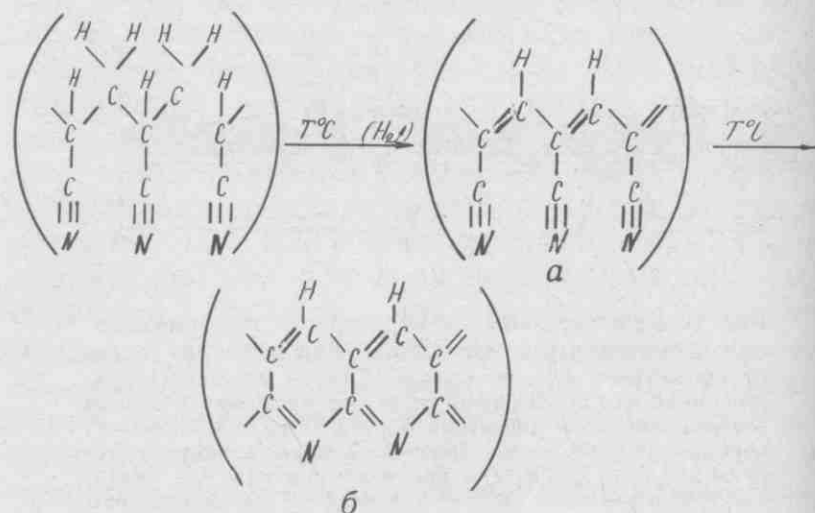


Рис. 1. Схема структурных изменений в полиакрилонитриле в процессе термического отжига



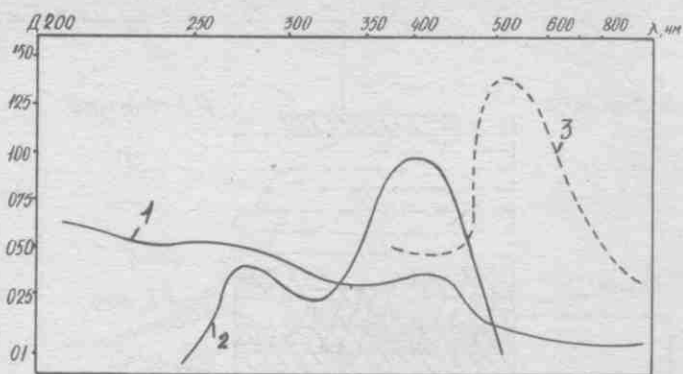


Рис. 2. Оптическая плотность  $D$  пленок ПАН после отжига при  $T=450^\circ\text{C}$ ; 1 —  $t=2$  мин; 2 —  $t=5$  мин; 3 — относительный спектр  $D(t=20 \text{ мин})/D(t=10 \text{ мин})$

I. Разрушение тройной C-N связи и образование сопряженной подсистемы с участием атомов C и N.

II. Образование двукратно сопряженной лестничной структуры при температуре отжига от  $400^\circ\text{C}$  до  $500^\circ\text{C}$ .

Такая структурная перестройка полимера подтверждается исследованиями ИК спектров [7], а также изменениями в спектрах пленок ПАН в ультрафиолетовом и видимом диапазонах.

Наиболее показательными являются исследования в УФ и видимой области, так как поглощающие свойства материалов находятся в прямой зависимости от его энергетической структуры. Сравнение спектров поглощения пленок ПАН, прошедших термообработку при  $T=450^\circ\text{C}$  в течение различного времени (рис. 2), позволяет судить об образовании на начальной стадии отжига пика поглощения в районе 400 нм (кривая 1, 2). Этот факт объясняется образованием сопряженной цепочки (C-N), параллельной насыщенным (—C—C—) связям.

Увеличение времени термообработки до 10 и далее до 20 мин приводит к сильному росту оптической плотности пленок полимера: кривая 3 на рис. 2 представляет собой относительный спектр пленок, прошедших отжиг в течение 20-ти — 10-ти минут. Возникновение полосы поглощения с максимумом около 520 нм свидетельствует о том, что в процессе термообработки образуется материал с относительно узкой шириной запрещенной зоны  $E_g=2$  эВ. Такая величина  $E_g$  позволит использовать этот полимер в полупроводниковых приборах.

Другой особенностью относительного спектра поглощения (рис. 2, кривая 3) является отсутствие максимума вблизи 400 нм, наблюдавшегося в спектрах пленок, прошедших отжиг в течение меньшего времени. Это позволяет сделать вывод о том, что при температуре отжига  $450^\circ\text{C}$  процесс образования сопряженной C-N-цепочки заканчивается в течение 10 мин.

При изготовлении макета полевого транзистора на основе термоконвертированного ПАН бы-

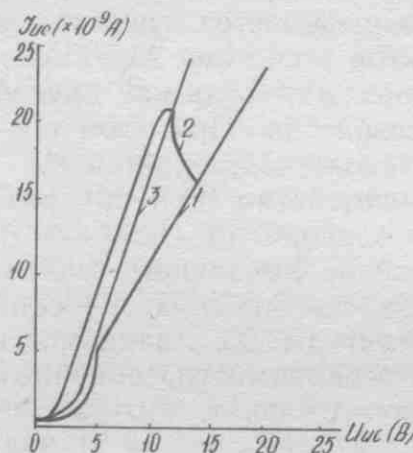


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики  $(I-U)_{ис}$  структур Au/ПАН/Au при  $U_s=0$  В (1),  $U_s=-10$  В (2),  $U_s=+10$  В (3)

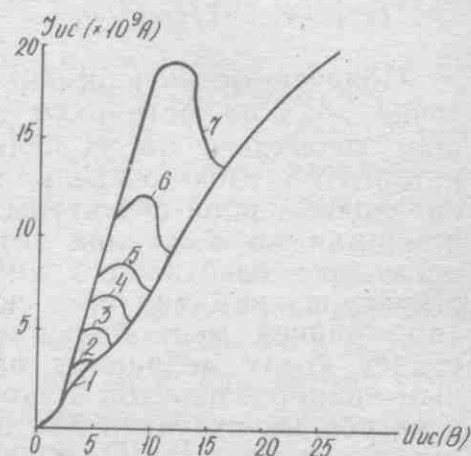


Рис. 4.  $(I-U)_{ис}$  — характеристики структур Au/ПАН/Au при различных напряжениях на затворе: 1 — 1 В, 2 — 2 В, 3 — 3 В, 4 — 4 В, 5 — 5 В, 6 — 6 В, 7 — 10 В

ли использованы структуры, полученные на кремниевых подложках с использованием в качестве подзатворного диэлектрика  $\text{SiO}_2$ . В системе Au/ПАН/Au длина канала составляла 0,7 мкм. Исследования вольт-амперных характеристик образцов, подвергнутых отжигу при температуре  $450^\circ\text{C}$  в течение 20 мин (соответствующему образованию двукратносопряженной лестничной структуре ПАН), показали, что они (ВАХ) носят неомический характер и имеют особенность в диапазоне напряжений между стоком и истоком (рис. 3). При этом сопротивление структуры изменяется в пределах от  $2 \cdot 10^7$  Ом при  $U_{ис}=1$  В до  $1,2 \cdot 10^9$  Ом при  $U_{ис}=10$  В.

Прикладываемое к затвору напряжение вызывает резкое изменение ВАХ. На рис. 3 помимо ВАХ при  $U_s=0$  приведены вольт-амперные кривые при  $U_s=-10$  В и  $U_s=+10$  В (кривые 2 и 3 соответственно). Необычный вид характеристики при подаче на затвор отрицательного напряжения можно объяснить, если предположить, что на границе раздела ПАН/AU образуется потенциальный барьер большой высоты, через который носители заряда туннелируют. Влияние потенциала затвора на величину тока можно объяснить увеличением концентрации носителей в области барьера и соответствующим изменением энергетической структуры в окрестности границы раздела.

Положительный потенциал на затворе ( $U_s=+10$  В) приводит к увеличению наклона ВАХ, практически не изменяя форму кривой (рис. 3,

кривая 3). Возможно это является следствием того, что один из контактов в системе АУ/ПАН/АУ преобразуется в омический, тогда как другой сохраняет запирающие свойства. При этом сопротивление структуры несколько снижается.

На рис. 4 приведено семейство ВАХ при различных напряжениях на затворе от  $U_3 = -1$  В до  $U_3 = -10$  В. Положение локального максимума  $I_{ис}$  смещается в область больших значений  $U_{ис}$  при увеличении амплитуды  $U_3$ . Зависимость  $U_{ис}$  от  $U_3$  носит, по всей видимости, линейный характер. Отметим также тот факт, что соотношение между  $I_{ис}(U_{ис}, U_3)$  и  $I_{ис}(U_{ис}, U_3 = 0)$  подчиняется определенной закономерности, описываемой выражением

$$I_{ис}^m(U_{ис}, U_3) / I_{ис}^m(U_{ис}, U_3 = 0) \approx 2.$$

Полученные экспериментальные данные достаточно ярко иллюстрируют возможности полимеров, основанные на их нелинейных свойствах, которые, в свою очередь, являются следствием квазиодномерной структуры ПП. В то же время, принимая во внимание тот факт, что подвижность носителей заряда в подобных полимерных структурах лимитируется скачковым механизмом (по крайней мере большинство исследователей отдаст этому механизму предпочтение), очевидным является переход к субмикронным размерам электронных структур при создании полупроводниковых приборов. Поскольку размеры молекул некоторых проводящих полимеров лежат в диапазоне от 0,1 мкм до 1 мкм, то переход к характерным размерам структур в 0,1—0,5 мкм (или менее) может существенно увеличить вероятность того, что канал между двумя металлическими электродами (для случая полевого транзистора) будет перекрываться набором молекул, обеспечивающих внутримолекулярный перенос заряда от истока к стоку, или, по крайней мере, увеличит вклад внутрицепочечного транспорта заряда через канал. Далее этот эффект мог бы быть усилен дополнительной ориентацией полимерной пленки.

Достижение успеха в этом направлении могло бы положить начало молекулярной (в истинном смысле слова) электроники, поскольку характеристики создаваемых в рамках молекулярной технологии устройств, определялись бы свойствами полимерных молекул.

### ЛЕГИРОВАННЫЕ ПОЛИАНИЛИНЫ — МАТЕРИАЛЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КАНАЛОВ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Приведенные выше данные показали принципиальную возможность использования ПП в качестве активного полупроводникового канала в полевых транзисторах с обычными затворами. В первом случае изменения проводимости исходного полиакрилонитрила было проведено его термообработкой. В предлагаемом варианте применяемый в качестве активного полупроводника электрохимически синтезируемый полианилин (ПАНИ) подвергался, так называемому, электрохимическому допированию.

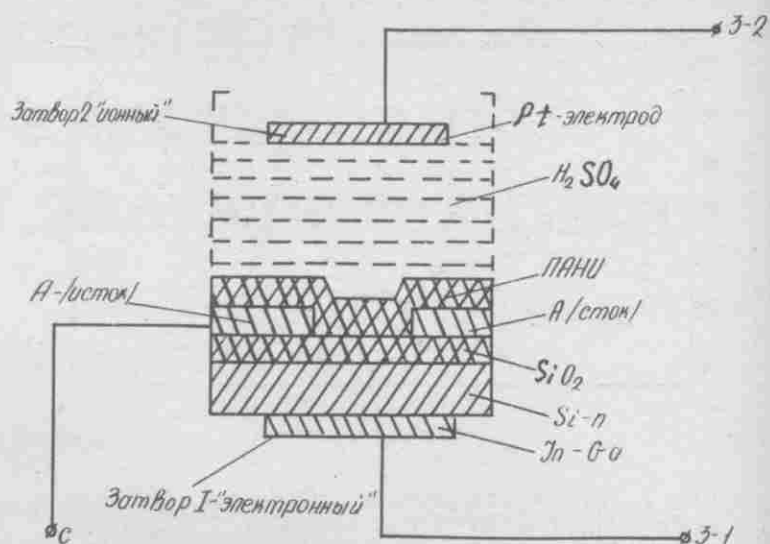


Рис. 5. Схема ячейки электрохимического транзистора

Из литературных данных известно, что такие труднорастворимые полимеры, как полианилин (ПАНИ), полипиррол (ППР), политиофен (ПТФ) могут быть синтезированы электрохимически в потенциостатическом или потенциодинамическом режимах [7, 8].

С целью получения пленок полианилина проводили электрополимеризацию анилина как в водных, так и ацетонитрильных растворах. Механизм полимеризации сопровождается переносом  $2e^-$  и  $2H^+$  с образованием соли полианилина [9]. Гладкие, плотные пленки ПАНИ получали электрополимеризацией при циклировании в интервале потенциалов от  $-0,5$  до  $+0,7$  В со скоростью развертки потенциала  $50$  мВс $^{-1}$ . Время синтеза зависело от требуемой толщины пленки ПАНИ и составляло от нескольких десятков минут до нескольких часов для пленок толщиной 1 мкм. Готовые образцы представляли собой темно-зеленые однородные проводящие пленки с сопротивлением 0,1—1 Ом·см.

На пленках ПАНИ, полученных электрохимическим легированием, был разработан полевой транзистор с двумя управляющими затворами: электронным и ионным (рис. 5).

Если напряжение на обычном (или электронном) затворе  $U_{31}$  создает электрическое поле, перераспределяющее плотность носителей заряда в канале, то потенциал на электрохимическом (или «ионном») затворе  $U_{32}$  регулирует диффузию допанта в пленку ПАНИ, вызывая, таким образом, изменение общего числа носителей, т.е. в конечном счете проводимость канала. Ионным затвором в этом случае служит референс-электрод электрохимической ячейки с 0,1 М раствором  $H_2SO_4$  в качестве электролита.

Совместное действие двух затворов  $z1$  и  $z2$  вызывает изменение выходных характеристик транзистора. Рабочий диапазон напряжений ионного затвора достаточно узок с оптимальными  $U_{32} = 0,3$  В.

Принцип работы электрохимического транзистора с пленкой ПАНИ основан на способности пленки ПАНИ легироваться и разлегироваться обратимым способом в растворах кислот (в данном случае в 0,1 Н растворе  $H_2SO_4$ ), при

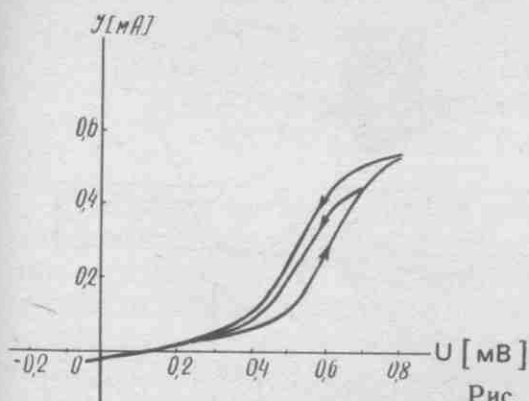


Рис. 6. Диодная характеристика ПАНИ-транзистора

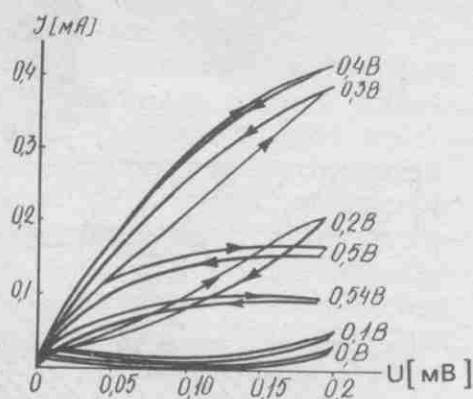


Рис. 7. Выходные характеристики ПАНИ-транзистора в зависимости от  $U_{з1}$

циклировании анодного напряжения, сопровождающегося изменением проводимости пленки ПАНИ.

Диодная характеристика описанного типа транзистора представлена на рис. 6, выходные характеристики полианилинового электрохимического транзистора — на рис. 7.

Полианилиновый электрохимический транзистор может быть использован в качестве индикатора кислотности среды в различных водных растворах, а при подходящей защите в органических растворителях для контроля технологических процессов. В работе было показано, что полианилиновый прибор реагирует на такие реагенты, как  $Ru(NH_3)_6^{3+/2+}$ ,  $Fe(CN)_6^{3-/4-}$ , а при дальнейшей модификации структуры она реагирует на  $H_2$  и  $O_2$  редокс-реагенты.

### ПОЛИГЕТЕРОАРИЛЕНА — ПСЕВДОСЕНСОРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОММУТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Как отмечалось выше, проводящие полимеры изменяют свою проводимость при воздействии различных факторов. Например, был обнаружен эффект скачкообразного (на 8—10 порядков) изменения их электропроводности при одноосном (трансверсальном в направлении ориентации) сжатии пленок этих материалов.

При этом проводимость полимерных пленок может достигать проводимости фольгированной меди. Структуры из полимерных пленок формировались на полированных пластинах кремния с напыленными контактами золота. Профиль по-

верхности, исследованной с применением профилометра «ALPHA-STEP-200», не превышал  $\pm 50$  Å. При толщине пленок до 5—10 мкм вероятность чисто механически «закороток» являлась малопредположительной. Проводимые исследования с применением ИК-ЭПР-ЯМР-спектроскопии показали отсутствие каких-либо изменений химической структуры этих пленочных материалов. В то же время их послойное скальпирование с последующей визуализацией жидкокристаллическими растворами (исследования проводились на сканирующем оптическом микроскопе «ТАСМА») показали возникновение пирамидальных дендритов при сжатии пленок в направлении, перпендикулярном ориентации. При этом размер каналов (в данном случае оснований пирамид дендритов) составлял величину порядка 500 Å.

Исследования с применением туннельной микроскопии пленок Ленгмюра—Блоджетта из полимеров полидифениленов и их производных также показали наличие зон ориентации порядка 500—700 Å. В этой связи авторами было выдвинуто предположение об образовании каналов проводимости в пленках такого типа полимеров при воздействии на них одноосного давления. Ранее подобный эффект наблюдался в полипропилене [14], но давление, необходимое для этого, достигало величин десятков тонн на квадратный сантиметр. В рассматриваемом в данной работе случае пороговое удельное давление составляет всего 100—150 г/см<sup>2</sup> при толщине пленки материала 5—8 мкм.

В настоящее время в НИИФП проводятся многопрофильные исследования с целью выяснения механизма возникновения такого эффекта. Одновременно была проведена работа по исследованию возможности применения возникающего эффекта тензопроводимости в пленках полидифениленов в псевдокоммутирующих устройствах. Были изготовлены структуры коммутирующих элементов (рис. 8). Для определения числа безотказных переключателей был использован ультразвуковой генератор PR0195-HF фирмы «Wentworth». На верхнюю контактную площадку коммутирующего элемента с помощью шарообразного зонда передавались механические колебания частотой 100 кГц. При этом элемент был подключен к источнику постоянного тока, а падение напряжения между контактами наблюдалось на осциллографе. Зависимость величины напряжения от времени имела форму меандра с частотой 100 кГц и шириной фронтов менее 1 мкс. Длительное наблюдение (до нескольких часов) показало, что изменение в форме меандра не происходит. Это указывает на то, что нижняя граница безотказного числа переключений составляет не менее  $10^7$ . Измерения при статичном нагружении структур показали существование некоторого порогового давления срабатывания, зависящего от толщины пленки полимеров. Установлено также, что сопротивление коммутационного элемента определяется, в основном, соп-

ротивлением материала разводящих дорожек и контактных пар, диапазон коммутируемого постоянного тока при напряжении 1—36 В составляет:  $1 \cdot 10^{-5}$ — $5 \cdot 10^{-1}$  А.

Подобная конструкция коммутирующих элементов полностью исключает отсутствие подвижных (трущихся) контактов и как следствие — «дребезга», а также обеспечивает герметизацию всех проводящих элементов, поэтому возможно применение такой конструкции в изделиях, контактирующих с агрессивными, взрывоопасными средами. Например, в индикаторах критического давления газо-нефтепроводов, химических реакторов и т.д.

В настоящее время в НИИФП совместно с НПО «Счетмаш» (г. Курск), НПО «Сапфир» (г. Москва), КБ «Точмаш» (г. Москва), АООТ «ЗИЛ» (г. Москва) проводятся совместные исследования с целью внедрения таких устройств в изделиях бытовой и специальной техники.

### ЛЕГИРОВАННЫЕ ПОЛИАНИЛИНЫ — АКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВЫСОКОЕМКОСТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

В ходе предварительных исследований было установлено, что проводящие полимеры, в частности, — полианилины в условиях определенных степеней легирования могут быть использованы в качестве диэлектрических материалов конденсаторов. Емкость конденсаторов, как известно, определяется диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon$ ) изолятора между их обкладками. Применяемые ранее полимерные материалы имеют  $\epsilon$  порядка 3—5. Разработки НИИПМ (г. Москва) и ВНИИСС (г. Владимир) по использованию цианэтилцеллюлозы с  $\epsilon=10$ —15 не привели к ожидаемым результатам ввиду ее практически полной нетехнологичности.

Применение легированного определенным образом и растворимого в муравьиной кислоте полианилина в качестве изолирующего материала дало хорошие результаты (табл. 1). Конденсаторы изготовлялись классическим методом по рулонной технологии.

Обкладки конденсатора — алюминиевая фольга толщиной 7 мкм. Расчет диэлектрической

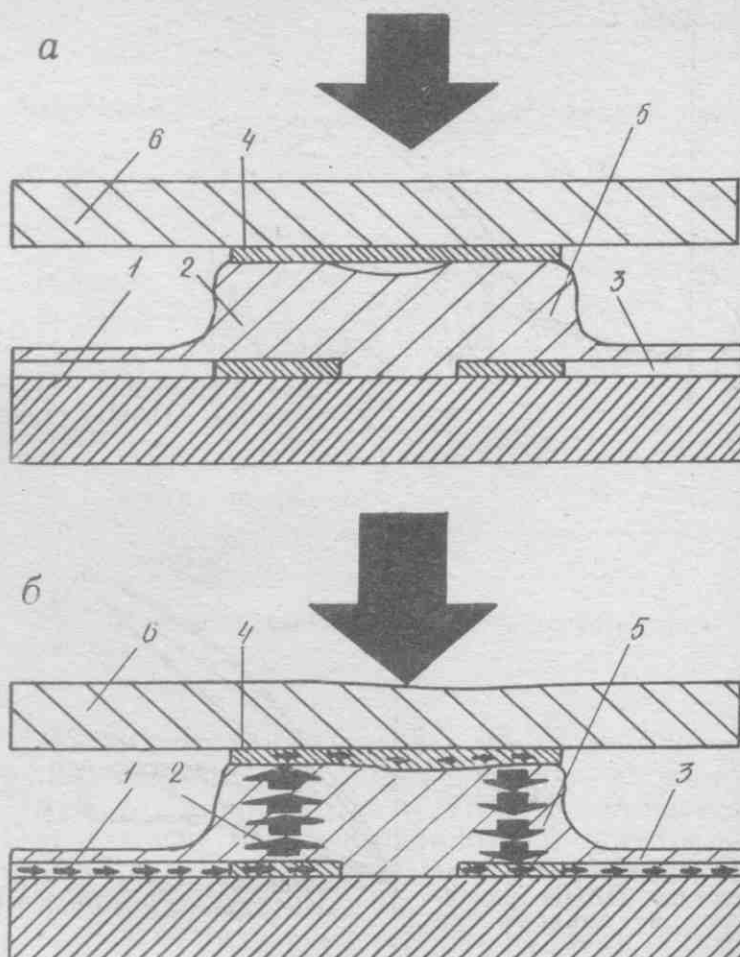


Рис. 8. Структура псевдосенсорного коммутирующего элемента: 1 — диэлектрическая подложка, 2, 4 — контактные площадки, 3 — токопроводящие дорожки, 5 — пьезорезистивная полимерная пленка, 6 — гибкая диэлектрическая подложка

проницаемости проводился по формуле:

$$E = \frac{113hc}{S},$$

где  $h$  — толщина диэлектрика, мкм;  $c$  — емкость образца, мФ;  $S$  — площадь обкладки, мм<sup>2</sup>.

Из таблицы видно, что величина диэлектрической проницаемости может во много раз превышать величину  $\epsilon$  в традиционных пленочных материалах. Следует особо подчеркнуть, что диэлектрическая прочность данного материала (при вышеуказанной толщине пленки) имела величину  $E=157$  кВ/мм ( $\nu=50$  Гц).

Таблица 1

Материалы	S, мкм	50 Гц		1 кГц		50 кГц		100 кГц	
		E	tgσ	E	tgσ	E	tgσ	E	tgσ
ПАНИ-I	2,43	29,9	0,60	19,2	0,116	16,5	0,049	16,2	0,035
ПАНИ-II	2,15	2035	0,174	1634	0,159	1037	0,318	924	0,372

Примечание: S — толщина пленки полианилина, ПАНИ-I — нелегированный полианилин, ПАНИ-II — легированный полианилин.

## ПРОВОДЯЩИЕ ПОЛИМЕРЫ В КАЧЕСТВЕ ТОНКОСЛОЙНЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

Несмотря на достоинства, современные литиевые химические источники тока (ЛИХИТ) имеют ряд существенных недостатков: низкую циклируемость, обусловленную термодинамической неустойчивостью металлического лития практически во всех традиционных растворителях, высокую стоимость, сложную технологию сборки. Наиболее разумным подходом к расширению сферы использования ЛИХИТ является переход к перезаряжаемому источнику (аккумулятору) с большим числом циклов заряд-разряд.

Наиболее перспективным способом повышения циклируемости ЛИХИТ является замена литиевых электродов на аноды (отрицательные электроды) с матричной структурой, в которых металлический литий находится в мелкодисперсном состоянии в полимерной матрице. Сочетание таких интеркаляционных анодов с интеркаляционными катодами, например литированного оксида ванадия, позволяет существенно снизить как взаимодействие анода с растворителем, так и дендритообразование при перезарядке ЛИХИТ.

Перспективным материалом для использования в качестве материала отрицательного электрода является термоструктурированный ПАН (ТСПАН), который обладает электронной проводимостью  $10-20 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , высокоразвитой поверхностью ( $>1000 \text{ м}^2/\text{г}$ ) и емкостью по литию до  $200 \text{ мА} \cdot \text{ч}/\text{г}$ .

Модификация полимерных пленок на основе ТСПАН недавно открытыми формами углерода — фуллеренами (С) и бариленами, которые представляют собой углеродные микроstructures в виде полых трубок диаметром 3—4 нм, в которые может внедряться литий, открывает перспективы получения новых электродных материалов, обладающих высокой емкостью по литию.

Тонкие пленки проводящих полимеров могут применяться в качестве мембран с селективной проводимостью по ионам лития, которые обеспечивают его транспорт к поверхности лития и его сплава, но препятствуют контакту металла с электролитом. Кроме того, на твердофазной границе металл-полимер подавляется рост дендритов (возможно вследствие выравнивания энергетического рельефа металла благодаря отсутствию центров с пониженной энергией активации кристаллизации).

Была разработана методика полимеризации ацетилена непосредственно на поверхности алюминия с образованием защитной пленки ПА. Заряд отрицательного электрода из такого композиционного материала сопровождается образованием литий-алюминиевого сплава и процессы заряда-разряда протекают обратимо. В ячейке ПА — конденсаторный  $\text{Al}/3\text{M LiBF}_4$ , ПК:ДМЭ(1:1)/ $\text{LiUOx}$  после технологического подзаряда, при котором образовался литий-алюминиевый сплав, напряжение разомкнутой цепи составляло 3,14 В. Циклируемость при  $i=0,1 \text{ мА}/\text{см}^2$  в интервале 3,2—2,5 В показало,

что кулоновская эффективность составляет 50—57%. В результате исследований нами предложен новый способ приготовления катодного материала путем обработки давлением со сдвигом смеси ПАНИ-сажа-фторопласт, что приводит к улучшению электрохимических характеристик ячеек с литиевым анодом.

При разработке аккумуляторов с большой емкостью препятствием стало изменение концентрации электролита в циклах заряда-разряда. Увеличение объема и/или концентрации электролита снижает отрицательное влияние упомянутого фактора, но ухудшает удельные характеристики аккумулятора. По нашему мнению, улучшить работу положительного электрода можно приблизив по механизму электрохимических реакций к интеркаляционным электродам, в которых происходит перенос катиона, а не аниона. Для этого в ПАНИ можно вводить неподвижный редокс активный полианион (полимолибдат, полимолибдосульфид и др.).

С использованием результатов наших исследований были изготовлены пуговичные (в корпусе типа ДМЛ-120) и рулонные (в корпусе типа А-316) аккумуляторы со следующими параметрами:

Таблица 2

Электрохимическая система	Тип аккумулятора	Напряжение холостого хода, В	Удельная энергоемкость, В·ч/кг	Число циклов	Срок хранения, годы
ТСПАН-Li	Пуговичный	3,0	600	$>100$	$>5$
ПАНИ-Li	Рулонный	3,0	80	$>500$	$>5$

Из представленных в данной статье результатов исследований отчетливо видно, что практическое применение проводящих полимеров многогранно. В настоящее время в институте осуществляется комплекс исследований по созданию оптоэлектронных приборов, электролюминесцентных экранов, полимерных гетероструктур с  $p-n$ -переходом и т.д. Результаты будут опубликованы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Органические полимерные полупроводники/Я.М.Паушкин, Т.П.Вишнякова, А.Ф.Лукин, С.А.Низова.— М.: Химия, 1971, с. 224.
2. Патент Франции 2650833, 1990 г., патенты Японии 85-37114, 85-70719, 90-299214, 90-299215, 90-299212, 90-299213, 90-51652, 90-9055, 90-76211.  
Kudo H., Tsuchi S., Kojima T. et al., Synth. Met., 41—43, 1991, 1133—1136.

3. L a s h i n o v A.N. Polymer films as a material for sensors.— Invited Review, 1992.

4. S p r a n g i n g H. et al. Phys. Lett., 84, 54 (1981).

5. П о л а к Л.С., Н е ч у ш ж и н А.М., Л у к и н а А.Ф., П а у ш к и н Я.М.— В сб.: «Полупроводниковые полимеры с сопряженными связями», ЦНИИТЭнефтехим, 1966, с. 144.

6. S a t o h M., K a n e t o K., K a t z u m i Y. Synth. Met. 1986, v. 14, N 4.

7. G e n i e s E.M., L a p k o v s k i M.— J. Electroanal. Chem., 1987, vol. 236, p. 2160.

8. S c h i z m e i s e n M., B e c k F.— J. Appl. Electrochem., 1989, vol. 19, p. 401.

9. K h a b i b u l a e v, K h a i r u l l i n I.I., Z a k h i d o v A.A., B u t l e r s N.— Preprint Inst. of Nucl. Phys. Uzb. Ac. Sci., p. 356, 18.04.86.

10. Thin Solid Films, 162, 1988, 333—342.

11. Ц а р е в В.Н., З у е в а А.Ф., Е ф и м о в О.Н., К о р с а к о в В.С., П л а в и ч Л.А. «Анодноактивный ма-

териал и способ его получения», заявка № 1473646 от 29.06.87 г.

12. K a z m e r s k i L.L. (ed). Polycrystalline and Amorphous Thin Films and Devices.— Academic Press. N.Y., 1980.

13. P a u l E.W. et al.— J. Phys. Chem., 1985, 89, 1441.

14. A r k h a n g o r o d s k i i U.M., I o n o v A.N., T u c h k e v i c h U.M., S h l i m a k I.S.— Superhigh conductivity in oxidized polypropylene at room temperature, Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 51 (1990) 56—61.

В.С.КОРСАКОВ, С.И.МАКСИМОВ,  
Л.А.ПЛАВИЧ, Н.Ф.ТРУТНЕВ, В.И.НОВИКОВ,  
С.В.ТИМОФЕЕВ, С.Н.МАЗУРЕНКО,  
Н.С.САМСОНОВ, О.Н.ЕФИМОВ, А.Ф.ЗУЕВА,  
А.Н.ЛАЧИНОВ, М.Г.ЗОЛОТУХИН, А.А.ЗАХИДОВ,  
Г.П.КАРПАЧЕВА

## Высоковольтная электронно-лучевая литография для изготовления структур ультраСБИС

А.Е.БЕЛИОВСКИЙ, В.С.КОРСАКОВ, В.В.МАРТЫНОВ

Модернизация установки электронной литографии RM-12 в высоковольтный литограф позволяет получить высокую вертикальность края в толстом резисте при аддитивной технологии изготовления рентгеношаблонов УБИС.

Процесс формирования топологических структур является определяющим при переходе к проектированию и созданию ультрабольших интегральных схем (УБИС). Среди известных литографических методов фотолитография пока еще сохраняет свое лидирующее положение, прежде всего, за счет высоких показателей производительности и прогрессивного совершенствования метода (шаблоны с фазовым сдвигом, эксимерные лазеры в качестве источников освещения, высокоапертурные проекционные системы), дающего возможность реализации размеров вплоть до 0,16 мкм [1].

Оценки показывают, что для создания УБИС класса ДОЗУ 256М достаточным будет разрешение 0,15 мкм. Хотя и возникнут значительные проблемы с обеспечением совмещения и контролируемого клина проявления слоя резиста. Дальнейшее продвижение по шкале субмикронных размеров (0,15 мкм и менее) возможно будет только с применением электроно-, ионо- и рентгенолитографии. Традиционным первостепенным методом в этом ряду является электронолитография, т.к. именно этот метод позволяет осуществить процесс формирования рисунка за одну стадию экспонирования с необходимым разрешением и точностью совмещения. Регулирование энергии электронов в широком диапазоне

(3—100 кВ) позволяет в сочетании с различными активночувствительными структурами (одно- и многослойные структуры), управлять параметрами проявляемого рельефа. Управление процессом электронно-лучевого экспонирования с коррекцией эффектов близости, учетом рельефа и характеристик подложки позволяет получать контролируемый топологический рисунок маски.

В отечественной практике остаются пока еще мало изученными технологические особенности высоковольтной электронно-лучевой литографии (ВЭЛЛ), поэтому предварительные технологические эксперименты на единичных экземплярах, модифицированных ЭЛУ представляют уже сейчас значительный практический интерес.

В настоящее время целесообразность использования ВЭЛЛ для изготовления высокоаспектных структур размером 0,1—0,3 мкм на мембранах подтверждена многими экспериментами [2, 3]. Аддитивная технология изготовления рентгеношаблонов, включающая в себя экспонирование толстых (0,5—1,0 мкм) резистивных слоев с последующим гальванопластическим заполнением протравленных в резисте областей металлом с большим  $Z$  (чаще всего — золотом) требует повышенных (50—100 кВ) по сравнению с обычными (10—30 кВ) ускоряющих напряжений. Это связано с тем, что при высоких энергиях число электронов, поглощенных в единице объема электронорезиста практически равномерно по глубине, что в свою очередь дает возможность получать прямоугольный профиль края, необходимый при формировании высокоаспектных структур.

Продемонстрирована возможность получения высо-

коаспектных структур с характерными размерами в 0,12 мкм, по аддитивной технологии и при средних (40 кВ) ускоряющих на коммерчески доступном ЕЛЛ типа EVMF [4], однако это было сделано для строго периодического рисунка и требовало подбора параметров процесса в узком интервале значений.

Первые модельные работы проводились на просвечивающих растровых электронных микроскопах (ПРЭМ) [3, 5]. В последние годы модернизацией электронно-лучевых литографов с обычными ускоряющими напряжениями в высоковольтные занимаются многие фирмы. Так, например, для нужд изготовления рентгеношаблонов "Cambridge Instruments" изменяет ускоряющее в EVMF-300 и в EVMF-4 до 50–200 кВ. Подобная попытка была осуществлена и в [3], где авторам пришлось столкнуться с трудноразрешимыми инженерными проблемами конструкторского и схемотехнического характера.

Некоторые фирмы создают специализированные колонны только для изготовления рентгеношаблонов, например, 100 кВ колонна в UHV — исполнении с термоавтокатодом Zr/H [6]. Применение подобных высокоярких источников позволяет получить пучки с большой глубиной фокуса и минимизировать ошибки, связанные с неоднородностью положения мембраны по высоте, однако требует UHV — исполнения по крайней мере верхней части колонны с использованием специальной техники [7].

В Голландии в университете г. Дельфта создается высоковольтный прибор для высокоскоростной (High Speed Electron Lithography — HISEL) литографии для этой системы используется СВЧ фабрикатор пучка с параметрами: размер элемента 0,1 мкм, скорость записи до 1 см<sup>2</sup>/с, при 100 кВ параметры идеальны для производства рентгеношаблонов [8]. Модифицированный ПРЭМ "HB-501" имеет разрешение 6 нм в поле 100x100 микрон при энергии 100 кВ [5].

В нашей стране регулярные экспонирования при энергиях 100 кВ ведутся только в ФИАНе. Для этого используется модернизированный сканирующий электронный микроскоп "HB-501" фирмы "Cambridge Instruments" в сверхвысоковакуумном исполнении с автоэмиссионным катодом. Разрешение в 0,1 мкм рутинно достижимо, однако прибор не имеет привода стола и способен экспонировать только лабораторные образцы. В качестве управляющего устройства в модернизированной "HB-501" используется приставка C1 (см. таблицу).

Возможно использование при экспонировании 0,25 мкм элементов рентгеношаблонов электронного литографа высокого разрешения с векторным управлением JEOL JBX5DII при 50 кВ, 100 pA токе и 50 нм зонде с Гауссовым распределением плотности по сечению.

Таким образом режим экспонирования 50 кВ ускоряющего, 0,1–0,5 нА — ток пучка и 50 нм — диаметр пучка вполне можно считать исходным для отработки технологии изготовления рентгеношаблонов и задача сводится к практическому обеспечению этого режима при адекватной для данной топологии системе управления отклонением и прерыванием пучка.

В НИИФП проведены работы по модернизации обычной установки электронной литографии в высоковольтную [11].

В исходной установке электронно-лучевого экспонирования ZRM-12 при этом необходимо было внести следующие изменения:

Название (разработчик) систем-приставок	Количество ЦАП/разрядность, бит	Процессор в генераторном изображении	Управление столом
ЕЛЛИ-1 (ИПТМ, Черноголовка)	2/12	Нет	Нет
ЕЛЛИ-2 (ИПТМ, Черноголовка)	2/12	Нет	Есть
ЕЛЛИ-3 (ИПТМ, Черноголовка)	2/12	Нет	Есть
ЕЛЛИ (ИПТМ, Черноголовка)	2/16	Нет	Есть
ELPHY-1 (RAITH, Германия)	2/16	Нет	Нет
ELPHY-2 (RAITH, Германия)	6/16	FORTH	Нет
ELPHY-3 (RAITH, Германия)	8/16	FORTH	Нет
MASTER-LAB (США)	2/16	Нет	Нет
C1 («С1», Англия)	4/16	Нет	Нет
LITCOM (Австрия)	7/16	TR800	Возможно
НИИФП (разработаны авторами, Россия)	2/12	1801BM3	Есть

— обеспечить электрическую прочность на пробой ускоряющего промежутка катод—анод до 50–100 кВ;

— обеспечить совпадение плоскости наименьшего сечения пучка с плоскостью прианодной сменной диафрагмы;

— изготовить источник повышенного ускоряющего напряжения со стабилизированным питанием катода и управляемым смещением модулятора;

— повысить амплитуду импульсов бланкирования пучка;

— увеличить силу объектной линзы для обеспечения фокусировки при повышенных напряжениях;

— изготовить прецизионную и удобную в обращении систему управления электронным пучком с адекватным программным обеспечением.

Выполнение первых двух требований приводит к существенным электронно-оптическим и конструктивным изменениям в установке и на данном этапе работы были выполнены только частично.

Установка катодно-модуляторного узла с установочным изолятором от ПРЭМ-100 с увеличением расстояния катод—анод с 13 до 27 мм обеспечила необходимую электрическую прочность при повышенных ускоряющих напряжениях.

За основу модернизированного источника питания были взяты основные узлы источника от микроскопа класса ПРЭМ-100 с дискретно меняющимся ускоряющим 50–75–100 кВ, стабилизированным накалом и автосмещением.

Сила объектной линзы была увеличена путем подмотки дополнительных витков в основную секцию (одну из восьми) фокусирующей катушки.

Настройка на оптимальные параметры производилась обычным для установки ZRM-12 образом: ускоряющее напряжение 50 кВ и ток эмиссии примерно 100 мкА. Ток пучка порядка 0,1 нА. Изображение тест-объекта получалось во вторичных электронах с использованием датчика Эверхарта. Особенностью было то, что в качестве тест-объекта служила окись вольфрама, напыляемая на край экспонируемой пластины. Таким образом снималась проблема несовпадения плоскости тест-объекта настройки и плоскости экспонирования, которая возникает при работе с субмикронными размерами.

Качество настройки оценивалось по качеству визуализируемого на экране изображения напыленных зерен окиси вольфрама. Исходя из субъективной оценки эквивалентности качества изображения в штатной и переделанной ZRM-12 сделана прикидочная оценка диаметра зонда в 50 нм.

При вышеприведенных параметрах пучка на резисте толщиной 0,5 мкм, нанесенном на 1,5 мкм мембрану, были получены линии шириной 0,25 мкм.

Одной из основных инженерных проблем в электронной литографии является управление самим перемещением пучка, его интенсивностью и формой. Для этого служат приставки-системы управления экспонированием (см. таблицу).

Все эти системы отличаются и по составу программного обеспечения и по функциональным возможностям, возможно создание и адаптация новых программ, а также подключение добавочных узлов. Стоимость их тоже отличается на несколько порядков. Количество пар программируемых ЦАП определяет программируемые возможности введения коррекций в экспонируемое изображение. Так, например, корректировка поворота изображения на ЕЛЛИ-3 производится вручную и не может быть осуществлено автоматическое совмещение по меткам, т.к. отсутствует канал ввода изображения в управляющую ЭВМ, приставка-система ЕЛРНУ, начиная со второй модели, обладает такими возможностями.

Следует сказать, что системы управления могут существенным образом преобразовать функции и возможности ЭЛУ, в частности — увеличить производительность не только в несколько раз, но и на порядок [13].

Генератор изображения может быть выполнен в конструктиве КАМАК [12]. Устройства, превращающие любой сканирующий электронный микроскоп в электронный литограф, описаны в работах [13, 14], могут быть применены для модернизации морально и физически устаревших устройств управления экспонированием, в т.ч. и серии ZRM.

Следует отметить, что программное обеспечение и особенно те его части, которые определяют возможности системы, обладают авторской защитой и не могут свободно использоваться с другими системами. Подобные комплексы программ создаются коллективами, включающими программистов высокого уровня, радиостов, литографистов-технологов, и их создание занимает несколько, а иногда и, как правило, — десятки человеко-лет.

В двух словах это можно сформулировать так — если не покупается готовая установка за очень большие деньги у лидирующей фирмы, то требуется большая изобретательность и квалификация для подгонки отдельных программных модулей и конструктивных узлов.

Авторами на первоначальном этапе был создан

управляющий модуль на базе ПЭВМ типа ДВК, включающий в себя 2 ЦАП на 12 двоичных разрядов, и плату ввода/вывода на 40 бит. К ЦАП подключены оконечные усилители отклонения пучка блока сканирования BS ZRM-12, а к дискретному вводу/выводу программно управляемые шаговые двигатели стола. Ведущим инженером-программистом Мытаревым Ю.Н. разработаны базовые программы для функционирования системы.

На втором этапе работы к этой системе было добавлено система-приставка ЕЛЛИ-3 [12].

Топологии уровня 64М-256М, входящие в программу рентгенолитографии, предъявляют к системам управления еще более жесткие требования — точность позиционирования 0,01 мкм, которая может быть достигнута при величине шага отклонения в 0,0025 мкм. Использование схемных решений с термокомпенсацией тока каждого бита ЦАП в отдельности [14], если имеется ЦАП на 20 бит, очень усложняет схему, но зато позволяет добиться требуемой точности.

Большой интерес представляет компоновка устройства управления на основе "ЕВРОКОНСТРУКТИВА" [16] в стандарте VME, т.к. это позволит создать гибкую систему с возможностью использования практически любых применяемых в управлении ЭЛ микропроцессоров (Motorolla, RISC и др.).

**Полученные результаты.** 1. В установку ZRM-12 внесены необходимые конструктивные изменения для модернизации ее в высоковольтную ЭЛУ. Достигнутые параметры пучка удовлетворяют минимальным требованиям, предъявляемым при изготовлении рентгеношаблонов (размер элемента 0,25 мкм на мембране толщиной 1,2 мкм и резисте толщиной 0,5 мкм при 50 кВ ускоряющего напряжения).

2. Создан макет системы управления экспонированием, способный работать от ПЭВМ типа ДВК. Созданы базовые элементы программ экспонирования. Подключена базовая часть системы управления ЭЛЛИ (ИПТМ).

**Выводы:** разработанный макет экспериментальной высоковольтной ЭЛУ, включающий элементы универсальной системы управления, позволяет провести предварительные исследования и отработку технологии ВЭЛЛ, а также приступить к созданию технологически пригодной высоковольтной ЭЛУ. Дальнейшие экспериментальные работы должны быть связаны с отработкой систем совмещения, исследованием радиационных повреждений формируемых активных структур и комплексным изучением вопросов прецизионности трехмерной структуры маски в электронорезисте.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Системный подход к созданию субмикронной технологии/Ю.С.Боков, В.И.Жильцов, В.В.Мартынов, Н.С.Самсонов.— Электронная промышленность, 1993, № 8, с. 7—16.
2. E. van de Ven B.Koek. 100 kV Electron Beam Lithography for high aspect ratio features smaller than 0.5 mkm.— Solid State Technology, Feb., 1990.
3. С б е ж н е в Г.Т., П е с о ц к и й Н.Ф. Управляющие системы и машины.— Киев, Наукова Думка, 1982, с. 58—59.
4. High Aspect Ratio, 0,1 mkm Structures Obtained by Single Layer Resist and Conventional Electron Beam Lithography/M.Gentili et al.— Microelectronic Engineering, 1991, 13, p. 213—216.
5. B o g l i V., B e n e k i n g H. Nanometer scale fabrication in a 100 keV e-beam system.— Microelectronic Engineering, 1985, 3, p. 117—123.



6. 100 kV Schottky electron gun/J.B.McGinn et al.— J. Vac. Sci. Technol. B 9(6), Nov/Dec 1991, p. 2925—2928.

7. Белиовский А.Е. Функциональные узлы для установок сверхвысоковакуумной аналитики.— Тезисы Всесоюзного научно-технического семинара «Современные методы электронной микроскопии и их применение», 1983, с. 17.

8. Mulder E.H., K.D. van der Mast. A 3,5 GHz electron beam shaper Microelectronic Engineering 13, 1991, 157—160.

9. A field emission e-beam system for nanometer lithography/D.Stephani et al.— J. Vac. Sci. Technol., 1983, B1, p. 1011.

10. Patterning tungsten films with an electron beam lithography system at 50 keV for x-ray mask applications/K.W.Rhee et al.— J. Vac. Sci. Technol., W9(6), Nov/Dec 1991, p. 3292—3296.

11. Белиовский А.Е. Из опыта модернизации

ZRM-12 в высоковольтный литограф. Тезисы VIII симпозиума по РЭМ, 1993, г. Черноголовка, с. 17.

12. Бабин С.В., Давыдов А.В., Ерко А.И. Исследовательский комплекс для электронно-лучевой литографии.— Приборы и техника эксперимента, 1987, № 2, с. 191—196.

13. Проспект фирмы «Jenoptik-RAITH» Electron Beam Lithography System ELPHY-III. 1993 г.

14. Реклама фирмы TECHNOSERT на приставку к электронным микроскопам для электронно-лучевой литографии LITCOM. 1991 г.

15. Nobuyuki Yasutake et al. «NOVEL-2» Variable-Shaped Electron Beam Lithography System for 0,1 mkm Patterns with Refocusing and Eddy Current Compensation. Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 31(1992), pp. 4241—4247.

16. Реклама ЭЗНАП РАН «Системы в стандарте УМЕ» Черноголовка, 1992.

## Высокоэнергетическая ионная имплантация. Оборудование и технология

А.А.АВДИЕНКО, А.Н.ШОКИН

**На основе технологических и эксплуатационных требований, а также физико-технических возможностей изложены некоторые правила комплексного подхода к компоновке и конструированию имплантеров нового поколения. Созданы высокоэнергетические малогабаритные установки «ПРИЗ-500» и «ВИТУС-0,7», подтверждающие эффективность выработанных правил.**

Начиная с 80-х годов происходит переход технологии микроэлектроники (МЭ) на принципиально новый уровень: изготовление СБИС с трехмерной компоновкой элементной базы и увеличением степени интеграции до десятков мегабит на кристалл. При этом возникает ряд технологических проблем, для решения которых необходимо расширить энергетический диапазон ионных имплантеров в сторону больших энергий. Использование высокоэнергетической (0,1—1 МэВ) имплантации позволит решить такие проблемы, как создание «ретроградных» карманов, глубокая подгонка порогов, создание скрытых проводящих, изолирующих, геттерных слоев и т.д. Высокоэнергетическая имплантация малых доз расширяет технологические возможности и позволяет разрабатывать и выпускать заказные микропроцессоры, в которых имплантация примеси в область канала может осуществляться уже после формирования МОП-структур, что должно существенно увеличить выход годных благодаря снижению разброса по пороговому напряжению, снижению уровня микродефектности, а также за счет возможно-

сти подгонки до требуемого уровня порогового напряжения по результатам измерения порогового напряжения транзисторов на материале подложки.

Наличие прецизионного оборудования высокоэнергетической имплантации позволит гибко управлять параметрами активных и паразитных компонентов в структурах кремний-на-изоляторе (КНИ).

Кроме того, применение технологии высокоэнергетической имплантации и разрабатываемое оборудование найдут широкое применение при изготовлении логических схем повышенной информационной емкости с биполярной элементной базой для формирования скрытых слоев, изоляции элементов, а также в схемах, выполненных на соединениях типа  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^VI$  и др., для изоляции элементов схем радиационными дефектами (протонная изоляция), создания заданного распределения легирующей примеси по глубине, площади, без использования длительных температурных воздействий.

### Высокоэнергетические имплантеры

Для выполнения технологических задач производства современных микроэлектронных приборов к имплантерам предъявляются следующие основные требования: энергия однозарядных ионов до 700 кэВ; широкий диапазон разделяемых масс; разрешение по сепарации  $1/100 \Delta m/m$ ; точность набора дозы не хуже 1%; однородность легирования не хуже 1%; размер обрабатываемых пластин до 150 мм; рабочий вакуум в приемной камере не хуже  $1 \cdot 10^{-4}$  Па.

Для обеспечения высокой производительности ток пучка ионов на мишени должен быть настолько большим, насколько возможно удержание температуры подложки в требуемом технологическом диапазоне.

Загрузка пластин в рабочую камеру из стандартных кассет производится через шлюзовое устройство, чтобы обеспечить минимальную привнесенную дефектность. С целью повышения выхода годных с единицы площади чистых помещений предприятия габаритные размеры имплантера должны быть минимальными.

Все остальные параметры по обеспечению системы управления, защиты персонала, готовности, наработки на отказ и т.д. не должны быть хуже общепринятых и достигнутых к настоящему времени на имплантерах, применяемых при производстве СБИС.

Для сравнительного анализа имплантеров различных фирм возможно введение классификации по основным и дополнительным параметрам. Энергетические, массогабаритные, конструкционные и эксплуатационные характеристики связаны между собой и могут быть выражены количественно параметром оптимальности  $P$  следующим образом:

$$P = EI/SMW,$$

где  $E$  — энергия пучка, кэВ;  $I$  — ток пучка, мА;  $S$  — площадь, занимаемая установкой, м<sup>2</sup>;  $M$  — масса установки, т;  $W$  — потребляемая мощность, кВт.

Параметр оптимальности, очевидно, характеризует также и трудозатраты на изготовление, затраты на подготовку помещения, монтаж, эксплуатацию.

По параметру оптимальности имплантеры можно разделить на четыре основных класса (разделение на подклассы по дополнительным характеристикам для упрощения опустим):

Класс	$P, \text{МэВ}$
4	<0,01
3	0,01—0,1
2	0,1—2
1	>2

При разработке ВЭ-имплантеров существует несколько различных подходов:

— на фирмах General Ionex, NVEE, National Electrostatics ускорители применялись в качестве ВЭ-имплантеров. Кроме того, все эти фирмы предлагают системы для резерфордовского обратного рассеяния;

— традиционные фирмы по выпуску оборудования ионной имплантации (типа Eaton, Varian и др.) развивают ускорительную часть, подгоняя ее под выпускаемое оборудование;

— фирмы General Ionex и др. выпускают тандемные ускорители с перезарядкой отрицательных ионов и с потенциалами земли на источнике и приемной камере;

— фирмы Shimadzu (Japan) и др. выпускают радиочастотные ускорители типа "RFQ-1000". Их основное преимущество — возможность получения миллиамперных ионных пучков с энергией в МэВ-ном диапазоне при сравнительно небольших габаритах и нулевом потенциале на приемной камере и источнике.

Фирма Eaton (США) разработала и изготовила 5 ускорителей NV-1000 с высокочастотной системой ускорения по цене 5 млн.долл. Из-за больших габаритов (длина более 10 м), высокой стоимости и большой

Фирма	Тип	Энергия, кэВ	Ток, мкА (класс)
VEECO-ACC	300 R	300	75 (3)
	300 XP	300	до 3 мА
	400 HPH	400	(3)
NISSIN-ELECTRIC	R0-400	400	до 40 (2)
	R0-400M	400	до 300 (2)
HVEC (США)		2000	до 400 (2)
		350	до 75
		500	до 75
HVEE B.V.	HVE-500	500	до 75 (3)
	HVE-600	600	до 75 (3)
		1000	до 40 (3)
		2000	до 40 (3)
VARIAN/EXTRION	400-10	400	(3)

сложности ремонта и обслуживания установки сбыта не имеют.

Фирма NEC, США выпускает серию установок типа SDH с энергией до 9 МэВ с малыми токами. Ускоритель — с перезарядкой (тандем). Для целей производства СБИС не применяется.

Наиболее приемлемые с технологической точки зрения высоковольтные имплантеры, выпускаемые зарубежными фирмами, представлены в таблице.

Отечественная промышленность выпустила несколько установок "Везувий-9", "Везувий 2-450" и "Везувий 2-3" с энергией выше 200 кэВ. Все они относятся к установкам класса 3.

В Новосибирском институте ядерной физики СО РАН по заказу и техническому заданию нескольких фирм, в том числе НИИФП, была разработана и выпущена в малой серии малогабаритная высокоэнергетическая установка нового поколения "Приз-500" для имплантации протонов [1,2]. Опыт работы на этих установках в течение нескольких лет показал правильность идеологии построения установки, достаточно высокие эксплуатационные характеристики и ее необходимость для решения ряда специальных задач, таких как создание локальных изолирующих областей при изготовлении ИС на материалах  $A^{III} B^V$ , создание скрытых изолирующих областей в кремнии [3], проведение процессов протонно-ускоренной диффузии и др. Необходимо отметить также и некоторые недостатки установки: ограничение по типу ионов (протоны, молекулярный водород, гелий), малый диаметр пластин (60 мм), невысокий ток пучка (10 мкА), ручная загрузка.

Из приведенного краткого анализа можно видеть, что на мировом рынке имплантеров пока нет установок высокого класса с энергией в требуемом диапазоне.

#### Физические концепции построения высокоэнергетических имплантеров

Имплантер, удовлетворяющий современным требованиям технологии производства приборов МЭ можно разделить на две основные системы: ионный ускоритель и приемную камеру. Разработка этих систем должна проводиться согласованно, так как мощность ионного

пучка на мишени и теплоотвод от нее, а также размер пучка и система сканирования его по пластине взаимосвязаны. Однако, при такой общности есть и специфические требования к каждой системе [4,5].

**Ускоритель.** Ускоритель представляет собой ускорительную вакуумную трубку, на которой установлены: источник ионов, система сепарации ионов, ионно-оптическая система, формирующая пучок и направляющая его на мишень. Высокое напряжение генерируется в большинстве типов промышленных установок каскадным генератором. Для обеспечения электрической прочности все элементы, находящиеся под напряжением, закрываются экранами и образуют высоковольтный терминал.

Выбор оптимальной величины рабочей напряженности электрического поля в элементах высоковольтного выпрямителя определяет два весьма важных параметра имплантера: габариты и надежность. При снижении градиента напряжения на 20% объем баков ускорителя растет на 80–100%, а при рабочем градиенте выше оптимального вероятность пробоя растет экспоненциально. Требование быстрой замены источника ионов или других элементов ускорителя, а также малого времени восстановления электрической прочности после высоковольтного пробоя определяет выбор газовой изолирующей среды. Наиболее удобным является элегаз ( $\text{SF}_6$ ). Коэффициент качества этого газа по отношению к воздуху составляет 2,6. Пробивное напряжение увеличивается пропорционально давлению вплоть до 15–16 атм. При давлении 4 кгс/см<sup>2</sup> пробивная напряженность составляет 350 кВ/см. Учитывая возможные перенапряжения в неоднородных полях высоковольтных электродов, и запас прочности 1,5, можно проектировать высоковольтную изоляцию с рабочим градиентом 30 МВ/м при давлении 10 атм.

Однако, конденсаторы каскадного генератора и изоляционные конструкции имеют напряженность перекрытия на 20–50% ниже, кроме того, коэффициент заполнения конструкции металлическими деталями достигает 0,9. Таким образом, продольный градиент, достижимый при современных элементах генератора, составляет 1–1,5 МВ/м.

Определяющим продольный градиент ускорительной трубки является перекрытие по вакуумной поверхности. Предельные величины для перекрытия коротких (2,0 см) изоляторов составляют 100 кВ/см. Однако прочность ускорительной трубки, составленной из таких коротких секций и в лучших ускорительных трубках с напряжением 1,0 МВ не превышает 2,0 МВ/м.

Обеспечение высокого продольного градиента ускорительной трубки очень важно для формирования ионного пучка, т.к. уширение пучка при движении в вакууме определяется внутренним расталкиванием частиц под действием кулоновских сил. Величина уширения пропорциональна квадрату длины пути пучка. По этой причине у всех современных имплантеров (особенно сильноточных) расстояние от источника ионов до мишени выбирается минимально возможным. По этой же причине необходимо разделение пучка ионов по массам как можно раньше после выхода из источников, т.к. доля требуемых ионов, как правило, мала (при получении ионов  $\text{V}^+$  из  $\text{VF}_3$  10%), а кулоновские силы отталкивания пропорциональны полному току пучка. По этой причине, а также с целью снижения затрат мощности на ускорение ненужных ионов система сепарации устанавливается между ионным источником и ускорительной трубкой. Такая компоновка, кроме

того, снижает затраты мощности на питание электромагнита сепаратора, т.к. сепарация происходит при низких энергиях.

Другим аспектом, определяющим конструкцию ускорительной трубки и компоновку ускорителя является рассеяние ионов пучка на молекулах остаточного газа. Этот процесс ведет к потере тока ионов, увеличению энергетического разброса пучка, а также к загрязнению пучка ионами остаточного газа и нейтральными частицами в результате процессов рекомбинации и перезарядки. Количество "нейтралов" и паразитных ионов определяется сечением процессов и остаточным давлением в ускорительной трубке.

При увеличении энергии от 60 до 1000 кэВ сечения рекомбинации и перезарядки уменьшаются на порядок, а вакуум в трубке определяется потоком газа из источника ионов и условным проходным отверстием.

Таким образом, для достижения лучших характеристик пучка необходимо предельно уменьшать длину пути ионов, а это означает, что мишень должна быть расположена как можно ближе к низковольтному концу ускорительной трубки.

**Рабочая камера.** Для обеспечения в рабочей камере необходимых условий бездефектной обработки пластин с высокой производительностью должны быть соблюдены следующие требования, определяющие конструкцию и компоновку:

- предотвращение локального перегрева пластин под пучком ионов путем сканирования пучком по поверхности пластин в групповом режиме;
- интенсивный отвод тепла от пластин за счет плотного прижатия к охлаждаемой подложке;
- достижение высокой однородности легирования с помощью тщательного контроля процесса сканирования;
- получение высокого вакуума в камере путем уменьшения сечения канала для пропускания пучка из ускорительной трубки.

Все эти требования одновременно выполняются при использовании в качестве держателя пластин быстро вращающегося диска с контролируемым радиальным перемещением оси его по отношению к пучку. Такая система двойного механического сканирования используется во всех без исключения имплантерах разработки 80-х годов. При такой системе сканирования конструктивно просто решаются вопросы компенсации поверхностного заряда, постоянства угла падения пучка на пластины, однородности легирования, автоматической загрузки–выгрузки.

Кроме того, при быстром вращении диска с наклонными пьедесталами удается обеспечить прижатие пластин за счет центробежной силы и довести отвод тепла до 1–3 Вт/см<sup>2</sup>. Охлаждающая пьедестала вода вводится через вал диска. В случае отвода тепла за счет лучеиспускания эффективность охлаждения может быть увеличена за счет расположения под и над диском криогенных теплопоглощающих панелей.

Таким образом, основываясь на технологических требованиях и физических возможностях, возможно создание высокоэнергетического имплантера высокого класса.

#### Высокоэнергетические имплантеры на многозарядных ионах

В связи с тем, что оборудование ионной имплантации у нас и за рубежом длительное время имело предел

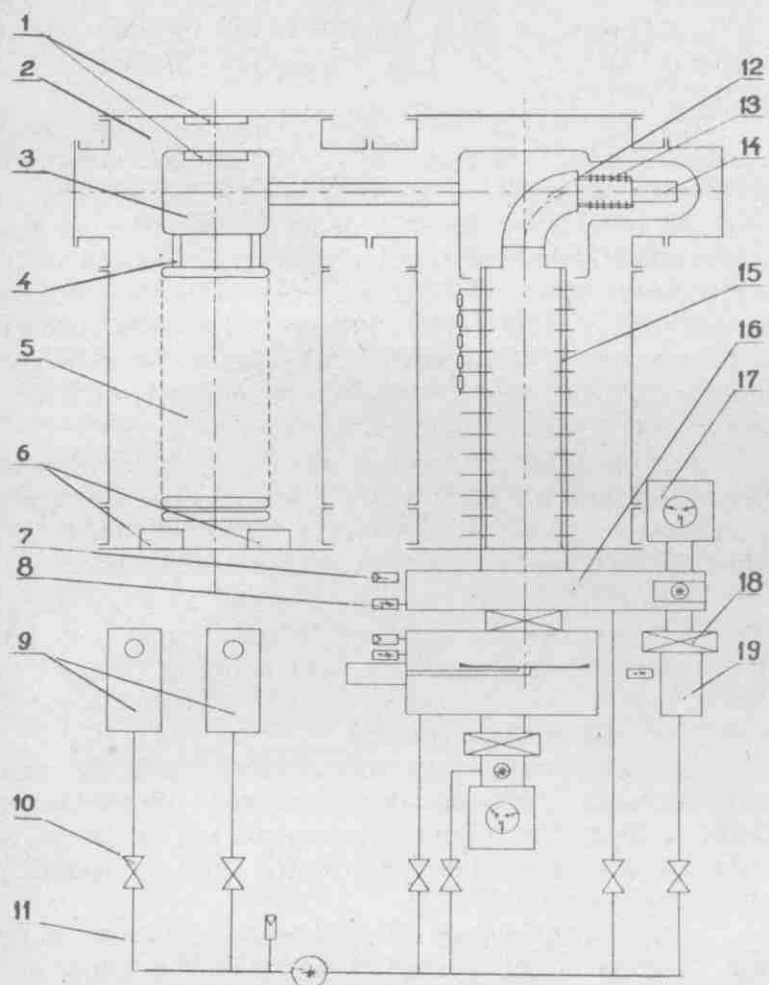


Рис. Функционально-компоновочная схема имплантера ВИТУС-0,7: 1 — разделительный трансформатор высоковольтного терминала; 2 — сосуды высокого давления; 3 — высоковольтный терминал; 4 — демпфирующий резистор; 5 — каскадный генератор; 6 — повышающие трансформаторы; 7 — форвакуумные датчики; 8 — высоковакуумные датчики; 9 — форвакуумные насосы; 10 — форвакуумные клапаны; 11 — азотные ловушки; 12 — магнит-сепаратор; 13 — ионно-оптическая система; 14 — источник ионов; 15 — ускорительная трубка; 16 — пучковый тракт; 17 — магниторазрядные насосы; 18 — шибберные затворы; 19 — турбомолекулярный насос

по ускоряющему напряжению  $\sim 150$  кВ, был разработан способ имплантации многозарядными ионами. Это направление активно разрабатывалось в НИИ вакуумной техники им. С.А.Векшинского на базе установок "Везувий-9", "Везувий-15", "Везувий-16". Под эти установки разработан специальный источник многозарядных ионов с разрядом Пеннинга с подогревным катодом, разработан ряд мер для обеспечения моноэнергетичности пучка: высококачественные безмасляные насосы, дополнительные азотные ловушки в область ионного источника, электронное зеркало между массеппаратором и ускорительной трубой, дополнительный массеппаратор.

Имплантация многозарядными ионами дает вполне приемлемые результаты по точности и однородности легирования. Однако необходимость получения моноэнергетичного пучка, устранения последствий эффектов перезарядки и низкая доля двух-, а тем более трехзарядных ионов в источнике по сравнению с однозарядными сильно осложняют проблему. Кроме того, применение многозарядных ионов на обычных ускорителях с ограничением по ускоряющему напряжению

100–150 кВ не позволит реально повысить энергию ионов выше 300–450 кэВ.

В связи с изложенным становится очевидной необходимость разработки высокоэнергетических имплантеров на однозарядные ионы.

### Высоковольтный ионный технологический ускоритель ВИТУС-0,7

Функционально-компоновочная схема имплантера представлена на рисунке.

Ускоритель выполняется с вертикальным расположением ускорительной трубки, на верхнем торце которой располагается магнит-сепаратор, ионно-оптическая система и ионный источник. Параллельно ускорительной трубке устанавливается каскадный генератор. На верхней секции генератора закрепляется демпфирующий резистор с малой индуктивностью, обеспечивающий защиту каскадного генератора от волны напряжения с крутым фронтом, возникающей при пробоях ускорительной трубки. На демпфирующем резисторе устанавливается край высоковольтного терминала с системой питания ионного источника и вторичная обмотка разделительного высоковольтного трансформатора.

Все элементы закрываются потенциальным экраном, а питание ионного источника осуществляется сквозь соединительный экран. Такая компоновка позволяет расположить собственно ускоритель и генератор высокого напряжения в двух сосудах высокого давления, заполняемых элегазом до давления 6 атм. Средний продольный градиент каскадного генератора — 1,1 МВ/м, а предельный — 1,4 МВ/м, он определяется электрической прочностью конденсаторов К15-10. Поперечный рабочий градиент принимается равным 13 МВ/м. Сквозь каскадный генератор проходят два световолокна для управления и контроля работы источников вторичного питания.

Первичная обмотка разделительного трансформатора располагается на верхней крышке сосуда и питается от инвертора 50 Гц — 20 кГц мощностью 1 кВт.

Ускорительная трубка — металлокерамическая длиной 600 мм и диаметром проходного отверстия 80 мм. Внешний диаметр трубки по градиентным кольцам — 300 мм.

Рабочий градиент ускорительной трубки с ионным пучком в течение смены составляет 1,6 МВ/м, а предельный близок к 2,0 МВ/м.

Ионный источник — Пигатрон с постоянными магнитами. При потребляемой мощности 30 Вт источник обеспечивает полный ток 700 мА. Ионно-оптическая система — четырехэлектродная. Магнит-сепаратор — девяностоградусный с градиентом спада поля  $\mu = -0,5$ , что обеспечивает двухкоординатную фокусировку на входной электрод ускорительной трубки. Магнит разработан в двух модификациях — с постоянными магнитами и с электромагнитом (мощностью 700 Вт). Радиус равновесной траектории — 200 мм, разрешающая способность 1/100 в диапазоне масс 1–135 а.е.м.

В целом конструкция ускорителя и сосудов высокого давления обеспечивает доступ к любым элементам через боковые и верхние крышки без разборки всего ускорителя.

На сосуд ускорительной трубки надевается свинцовая защита от неиспользуемого рентгеновского излучения, каждый элемент которой не тяжелее 60 кг (диаметр сосудов по фланцам — 600 мм, высота 1400 мм).

Ускоритель устанавливается на раме (каркасе), внутри которой размещаются: форвакуумная система, пучковый тракт, рабочая камера, шкафы питания и управления.

Пучковый тракт представляет собой прямоугольный короб, соединяющий ускорительную трубку и рабочую камеру. На пучковом тракте устанавливаются магниторазрядный насос НМД-0,4, турбомолекулярный насос ВМН-500 и шибер, отсекающий пучковой тракт от рабочей камеры. На шибере устанавливается цилиндр Фарадея для измерения тока пучка при настройке ускорителя.

Рабочая камера откачивается насосом НМД-0,4. Механизм сканирования закрепляется на боковом фланце камеры и представляет собой диск диаметром 500 мм, приводимый во вращение через магнитную муфту. Частота вращения — до 200 об/мин. Муфта с диском устанавливается на конце консоли и перемещается таким образом, что пучок движется по радиусу диска. Привод консоли осуществляется шаговым двигателем под контролем ЭВМ. Пластины закрепляются по периферии диска в специальных сменных держателях.

Крышка камеры уплотняется тремя пневмоцилиндрами и при открывании опускается вниз. Диск на позиции загрузки выдвигается из камеры на 180 мм. Камера перегрузки пластин подсоединяется вместо крышки. Камера имеет два шлюзовых устройства, в которых устанавливается пустая и заполненная стандартные кассеты. После откачки шлюзов транспортные устройства опускают кассеты на уровень диска. Переходный шибер открывается при уравнивании вакуума в рабочей камере и камере перегрузки. Диск придвигается непосредственно к кассетам, позиционируется и пластины перемещаются горизонтальными транспортерами — одна с диска в пустую кассету, а другая из кассеты на диск. За один оборот диска происходит весь цикл загрузки-выгрузки.

#### Технические параметры ВИТУС-0,7

Энергия однозарядных ионов, кэВ	70—700
Ток пучка на мишени, мкА	N-50 Ne-200 B-20
Размер пучка на мишени, мм	5×10
Точность набора дозы, %	не хуже 1
Однородность легирования, %	не хуже 1
Вакуум в ускорительной трубке, Па	рабочий $7 \cdot 10^{-4}$ предельный $2 \cdot 10^{-5}$
Вакуум в рабочей камере, Па	рабочий $2 \cdot 10^{-4}$ предельный $2 \cdot 10^{-5}$
Диапазон сепарируемых масс, а.е.м.	1—140
Разрешающая способность, $\Delta t/t$	1/100
Диаметр обрабатываемых пластин, мм	до 150
Время вывода на рабочий режим, мин	не более 30
Время, необходимое для замены любого узла, ч	не более 16
Время смены источника, ч	не более 2
Управление установкой и технологическим процессом	АСУ-ПЭВМ
Габаритные размеры (без камеры перегрузки), мм	2200×1100×2500
Масса установки, кг	не более 2500
Потребляемая мощность, кВт	не более 20
Площадь, необходимая под установку, м <sup>2</sup>	не более 6

Управление установкой происходит от ПЭВМ через крейт "КАМАК". Силовые блоки, тиристорные и транзисторные ключи обеспечивают все приводы и коммутации вакуумной арматуры, насосов, инверторов. Все силовые блоки и крейт "КАМАК" устанавливаются в навесных шкафах с каркасами "Вишня".

Таким образом по совокупности параметров имплантер ВИТУС-0,7 относится к классу I и не имеет аналогов в своем диапазоне энергий и токов.

К настоящему времени Русской высоковольтной компанией (г.Липецк) совместно с заводом "Луч" (г.Кострома) и НПО "Адрон" (г.Новосибирск) разработана, изготовлена и поставлена на ряд предприятий опытная партия установок "ВИТУС-0,7". С использованием опыта создания этих установок в АО "Корона семикондуктор ЛТД" (г.Зеленоград) разработана и подготовлена к производству усовершенствованная установка "ВИТУС-0,7М", полностью удовлетворяющая требованиям, предъявляемым к оборудованию для производства СБИС в условиях чистого производства высокого уровня.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Система высоковольтного питания и управления ускорителя протонов ПРИЗ-500/А.А.Авдиенко, А.Ф.Булусев и др.— Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Техника физического эксперимента», 1985, вып. 1(22), 1-96, с. 62—67.
2. Ускорительный технологический комплекс имплантации ионов водорода ПРИЗ-500/А.А.Авдиенко, А.Ф.Булусев и др.— 10-е Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1987.
3. Крылов Б.Г., Шокин А.Н., Юрасов В.П. Создание скрытых изолирующих слоев в кремнии на основе имплантации протонов.— Электронная промышленность, 1992, № 6, с. 22—24.
4. Авдиенко А.А. Физические принципы построения высокоэнергетических малогабаритных имплантеров нового поколения. 3-я Международная конференция по ионной имплантации и ионно-лучевому оборудованию. Болгария, Елените, 1990, (тезисы), с. 99.
5. Авдиенко А.А., Куликов А.И. Высокоградная ускорительная трубка для ионных имплантеров. 3-я Международная конференция по ионной имплантации и ионно-лучевому оборудованию. Болгария, Елените, 1990, (тезисы), с. 100.
6. Разработка установки имплантации ионов с энергией 700 кэВ/А.А.Авдиенко, В.В.Горбунов, В.М.Боровиков и др.— Шестое Всесоюзное совещание по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. Л.: 1988.

# Сополимеры акрилового ряда высокочувствительные рентгенорезисты

А.В.НОВОЖИЛОВ, В.С.КОРСАКОВ, С.И.МАКСИМОВ

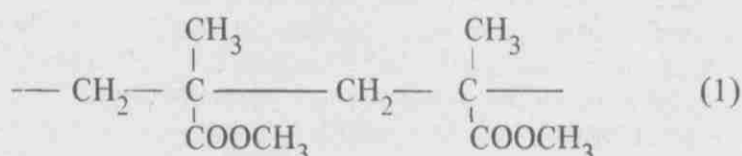
Высокая чувствительность сополимеров акрилового ряда к синхротронному излучению делает их перспективным материалом для рентгенорезистов.

Чувствительность к излучению является одной из важнейших характеристик рентгенорезиста, поскольку в значительной мере определяет материальные затраты при проведении процесса рентгенолитографии. В связи с этим повышению чувствительности рентгенорезистов уделяют особое внимание при их разработке.

Несмотря на разносторонние исследования, проведенные в последние годы с целью поиска новых классов перспективных полимеров для позитивных рентгенорезистов, практическое применение в технологии рентгенолитографии остается за различными сополимерами акрилового ряда, прежде всего из-за их высокой разрешающей способности и стабильности свойств при проведении технологических операций [1-3].

Благодаря высокой разрешающей способности (до 0,05 мкм) полиметилметакрилат (ПММА) одним из первых метакриловых полимеров нашел применение в процессах электро- и рентгенолитографии, однако в технологических процессах использование ПММА в качестве рентгенорезиста нерационально из-за относительно низкой чувствительности к рентгеновскому излучению (500-1000 мДж/см<sup>2</sup>) и плохой плазмостойкости в большинстве процессов сухого травления.

За последние 10-15 лет проведено множество исследований по модификации ПММА, направленных на повышение его чувствительности к излучению [2-4]. С точки зрения радиационной химии повышение чувствительности может быть достигнуто ослаблением (С-С)-связей основной цепи ПММА (1)



путем частичной замены СН<sub>3</sub>-групп в α-положении на электроотрицательные или электроположительные атомы или группы атомов (Br, Cl, F, CF<sub>3</sub>, COOH, CN, NH<sub>2</sub> и т.д.) [5]. В результате величина радиационно-химического выхода деструкции G<sub>д</sub> (число связей, разорванных при поглощении 100 эВ излучения) может возрасти от 1,4-1,8 (для ПММА) до 6-8. Однако на практике не всегда с увеличенным G<sub>д</sub> сополимера порционально возрастает его чувствительность к излучению. Поскольку за чувствительность позитивных резистов принимается минимальная доза, необходи-

мая для получения полностью проявленного (удаленного) слоя резиста на облученных участках, на скорость растворения облученных областей влияет не только величина, но и ряд других факторов: полидисперсность полимера, наличие микропор вследствие образования газообразных продуктов деструкции, изменение температуры стеклования облученных участков, склонность к образованию сшитых структур в процессе экспонирования. Поэтому увеличение чувствительности метакриловых резистов может быть достигнуто не только замещением СН<sub>3</sub>-групп в α-положении полимерной цепи, но и частичной или полной заменой СН<sub>3</sub>-групп спиртового радикала на некоторые другие группы атомов, природа которых в значительной степени определяет указанные выше факторы. К сожалению, количественный расчет оптимального состава метакриловых сополимеров с целью повышения их чувствительности практически невозможен вследствие отсутствия значений исходных параметров и комплексного влияния разнородных факторов на величину не только чувствительности к излучению, но и на другие литографические характеристики, такие как разрешающая способность и плазмостойкость. В связи с этим проводимые в НИИФП исследования чувствительности к СИ сополимеров акрилового ряда различного химического строения представляют не только теоретический, но и практический интерес.

Синтез образцов акриловых сополимеров проводился полимеризацией в растворе по радикальному механизму в присутствии динитрила азоизомаляной кислоты. Условия синтеза (концентрация мономеров, инициатора полимеризации, тип растворителя, температура, степень конверсии) выбирались такими, чтобы свести к минимуму разброс молекулярно-массовых характеристик сополимеров. Величины молекулярных масс синтезированных сополимеров, определенные вискозиметрическим методом, имели приблизительно одинаковые значения (180-210 тыс.), что практически исключало влияние различия величины молекулярной массы на чувствительность к СИ при проведении испытаний.

С целью исключения влияния различных факторов операций литографического процесса на значение чувствительности все операции строго оптимизировались и контролировались (тип подложки, толщина слоя резиста на подложке, температура сушки, состав проявителя и его температура, время проявления).

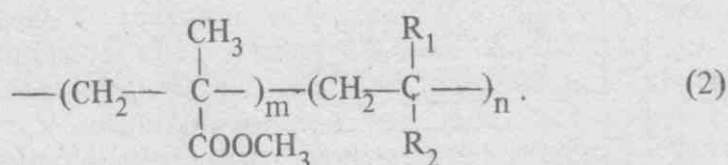
Экспонирование пучком СИ производилось на синхротроне ФИ РАН С-60 с энергией 630 МэВ. На каждой кремниевой пластине с нанесенным слоем резиста толщиной 0,6 мкм формировалось по 10 полосок шириной 2 мм различными дозами в выбранном интервале доз. После проявления определялась минимальная доза D<sub>мин</sub>, необходимая для получения полного проявления

Чувствительность к СИ некоторых сополимеров метилметакрилата

№№ п/п	Название модифицирующего мономера	n, мол. %	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	Чувствительность к СИ D <sub>мин</sub> , мДж/см <sup>2</sup>
1	(ПММА)	0	CH <sub>3</sub>	COOCH <sub>3</sub>	460
2	Метакриловая кислота	2	CH <sub>3</sub>	COOH	246
3	Метакриловая кислота	5	CH <sub>3</sub>	COOH	232
4	Метакриловая кислота	10	CH <sub>3</sub>	COOH	213
5	Метакриловая кислота	20	CH <sub>3</sub>	COOH	172
6	Метакриловая кислота	30	CH <sub>3</sub>	COOH	284
7	Глицидилметакрилат	10	CH <sub>3</sub>	COOCH <sub>2</sub> CH—CH <sub>2</sub> O	304
8	Акрилонитрил	10	H		213
9	Циклогексилвинилкетон	10	H	COC <sub>6</sub> H <sub>11</sub>	95
10	Хлорциклогексилвинилкетон	10	H	COC <sub>6</sub> H <sub>10</sub> Cl	72
11	α-фторфенилакрилат	10	F	COOC <sub>6</sub> H <sub>5</sub>	475
12	Хлорэтилметакрилат	10	CH <sub>3</sub>	COOCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> Cl	1150
13	Винилацетат	10	H	OCOCH <sub>3</sub>	735
14	Гексафторизопропилметакрилат	10	CH <sub>3</sub>	COOCHCF <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	176
15	Гексафторизопропилметакрилат	20	CH <sub>3</sub>	COOCHCF <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	123
16	Гексафторизопропилметакрилат	30	CH <sub>3</sub>	COOCHCF <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	47
17	Гексафторизопропилметакрилат	50	CH <sub>3</sub>	COOCHCF <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	35
18	Трихлорвинилацетат	10	H	OCOCCL <sub>3</sub>	169
19	Трифторвинилацетат	10	H	OCOCF <sub>3</sub>	246
20	Гептафторизобутилметакрилат	10	CH <sub>3</sub>	COOCH <sub>2</sub> CF(CF <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	138
21	Гептафторизобутилметакрилат	20	CH <sub>3</sub>	COOCH <sub>2</sub> CF(CF <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	151
22	Гептафторизобутилметакрилат	25	CH <sub>3</sub>	COOCH <sub>2</sub> CF(CF <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	238
23	Гептафторизобутилметакрилат	30	CH <sub>3</sub>	COOCH <sub>2</sub> CF(CF <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	268
24	α-фторметилакрилат	50	F	COOCH <sub>3</sub>	35
25	α-хлор-тетрафторпропилакрилат	50	Cl	COOCH(CF <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> H	72

слоя резиста, которая и принималась за меру чувствительности сополимеров к СИ.

В таблице представлена чувствительность к СИ (D<sub>мин</sub>) сополимеров общей формулы (2):



$$m + n = 100$$

Приведены сополимеры как с одинаковым содержанием различных модифицирующих мономеров (n = 10), позволяющим оценить влияние химической структуры данного мономера на чувствительность, так и сополимеры с различным содержанием одного и того же мономера, что дает возможность проследить зависимость чувствительности от количества модифицирующего мономера (см. табл.).

Не вдаваясь в детальный анализ экспериментальных данных, представленных в таблице, поскольку они представляют собой результат влияния одновременно ряда факторов, о чем было сказано выше, все же в ряде случаев можно однозначно увидеть, как проявляет себя та или иная химическая структура. Так, более высокую чувствительность сополимера 10 по сравнению с сополимером 9 можно объяснить увеличением поглощения им излучения за счет атома хлора, а ухудшение чувстви-

тельности сополимера 11 по сравнению с ПММА — наличием фенильного кольца, несмотря на имеющийся атом фтора в α-положении, который также способствует поглощению СИ. Атомы хлора вносят больший вклад в поглощение СИ, чем атомы фтора (сополимеры 18 и 19). Комплексное влияние различных факторов проявляется в том, что в случае сополимеров ММА с метакриловой кислотой (образцы 2–6) чувствительность проходит через максимум, а у гептафторсодержащих сополимеров (сополимеры 20–23) снижается с увеличением доли фторсодержащего мономера (это можно объяснить усилением процессов сшивки при облучении за счет СН<sub>2</sub>-групп спиртового радикала). Низкая чувствительность сополимера 12, по-видимому, связана также с процессами структурирования с участием активных концевых СН<sub>2</sub>Cl-групп. При отсутствии в спиртовом радикале СН<sub>2</sub>-групп (сополимеры 24, 25) чувствительность к СИ высока.

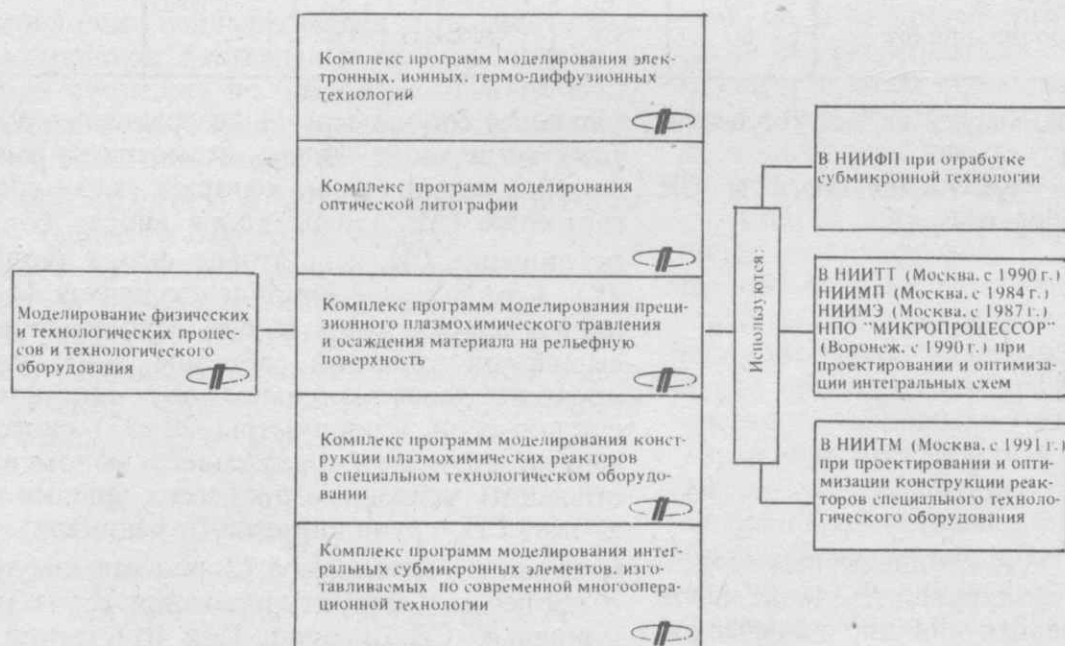
ЛИТЕРАТУРА

- Haller I., Feder R.— J. Electrochem. Soc., 126, 154 (1979).
- Eranianu A., Coutlet A.— Am. Chem. Soc., Symp. Ser., 151, 275 (1981).
- Moreau W.— Opt. Eng., 22, 181 (1983).
- Moreau W., Moyet W.— J. Vac. Sci. Technol., 16, 1989 (1979).
- Helbertl., Cook C.— J. Electrochem. Soc., 126, 694 (1979).

МАШИННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ОПИРАЕТСЯ НА ИЗВЕСТНЫЕ ЗАКОНЫ. ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ И РАЗРАБОТАННОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, ОБЪЕДИНЯЮТ МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ЭВМ И СОСТАВЛЯЮТ ОСНОВУ СОВРЕМЕННЫХ ОПЕРАТИВНЫХ ПРИЕМОМ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПОВЕДЕНИЕ ПРИБОРОВ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ.

РОЛЬ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСОБЕННО ВЕЛИКА ПРИ АНАЛИЗЕ СЛОЖНЫХ, НЕ ДОСТУПНЫХ НАТУРНОМУ ЭКСПЕРИМЕНТУ, ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ. ИНСТИТУТ РАЗРАБОТАЛ ОРИГИНАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СУБМИКРОННОЙ И НАНОМЕТРОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ, РАЗВИВАЕТ МЕТОДЫ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СО СВЕРХМАЛЫМИ ТОПОЛОГИЧЕСКИМИ РАЗМЕРАМИ, ПРОВОДИТ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ИССЛЕДУЕТ НА МОДЕЛЯХ ВОЗМОЖНОСТИ РЕНТГЕНОЛИТОГРАФИИ В ПУЧКАХ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ РАЗРАБОТАНО ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО БАЗИСА СБИС.





# Математическое моделирование процессов субмикронной и нанотехнологии

В.Л.КУСТОВ

Математическое моделирование процессов субмикронной и нанотехнологии открывает возможности количественных оценок хода технологических процессов и разработки прикладных программ для этих целей.

Успешное развитие микротехнологии в направлении субмикронных и нанометровых размеров элементов требует глубокого понимания физико-химических основ техпроцессов на атомно-молекулярном уровне.

В перспективных разработках встречаются структуры с линейными размерами до единиц нанометров и включающие монослои. Число атомов твердого тела (ТТ), заключенных в таких элементах, составляет до  $10^6$  (объем  $2 \times 100 \times 100$  нм) и даже  $10^3$  (монослой на площади  $10 \times 10$  нм).

Основу технологии изготовления элементов с субмикронными и нанометровыми размерами составляют радиационно-стимулированные (РС) низкотемпературные воздействия на материалы и структуры, представляющие собой уникальный сплав разнообразных по природе явлений, относящихся к физике и химии газоплазменных сред, границ раздела и твердых тел, механике и электродинамике сплошных сред, взаимодействию излучения с веществом.

Важной частью исследований и разработок техпроцессов (ТП) является математическое моделирование (ММ), воспроизводящее на ЭВМ в рамках принятой модели ход реальных процессов. Построение математических моделей ТП приводит к уравнениям тепло-массопереноса, физической и химической кинетики, статфизики, квантовой механики, оптики и электродинамики, а разработка прикладных программ требует знания и применения на практике разнообразных математических методов, таких как разностные схемы, конечные элементы, оптимальное управление, методы Монте-Карло, стохастической и молекулярной динамики, макрочастиц.

Настоящая статья посвящена выполненным и продолжающимся разработкам средств ММ в ГосНИИФП им. Ф.В.Лукина.

**Пучковые технологии и средства контроля (ПТСК).** Электронные и ионные пучки широко применяются в технологии в качестве технологических инструментов и средств контроля процессов. Ионная имплантация (ИИ), ВИМС, ОРР стали индустриальным стандартом. Электронные

пучки составляют основу процессов литографии, отжига, окисления, формирования силицидов. Широко известны РЭМ, ПРЭМ, Оже- и фотоэлектронная спектроскопия. СТМ составляют основу сканирующей микроскопии с атомным разрешением и в будущем — инструмент нанотехнологии.

При изготовлении субмикронных и нанометровых элементов изменяются и контролируются свойства материалов и структур на пространственных масштабах, сравнимых с пробегами и разбросом пробегов заряженных частиц в твердых телах (ТТ) в используемом диапазоне энергий, что создает новую ситуацию в применении ПТСК. Актуальными примерами является локальная ИИ в рельефные структуры, прохождения электронов через тонкие пленки, генерация вторичных электронов, визуализация субмикронных элементов в РЭМ и атомное разрешение СТМ.

Важнейшим аспектом применения ПТСК в микротехнологии является построение количественных двух- и трехмерных моделей взаимодействия электронов и ионов с субмикронными и наноструктурами, разработка программного обеспечения для АРМ ПТСК, что составило идеологию разработанной программной системы FLUENCE. Диапазон возможностей системы и подробное описание моделей, положенных в ее основу, а также применение содержится в работе [1].

Несмотря на многообразие применений пучков заряженных частиц, физика процессов их взаимодействия с ТТ довольно общая и для ее корректного описания, как правило, требуется решение двух достаточно независимых задач:

— вычисление дифференциальных элементарных процессов взаимодействия частиц пучка с атомами и электронами ТТ, определение на их основе соответствующих длин пробега, тормозной способности ТТ и разброса энергетических потерь на единицу длины пути;

— расчет распространения пучка в ТТ с учетом энергетических потерь и углового рассеяния частиц в элементарных процессах, включая генерацию каскадов вторичных частиц и кинетику химических взаимодействий.

В диапазоне энергий электронов и ионов ( $10^0$ — $10^3$  кэВ) элементарные процессы разделяются на два класса — рассеяние на ядрах атомов и взаимодействие с электронной системой ТТ. Для описания упругого рассеяния электро-

нов часто достаточно использовать экранированный кулоновский потенциал. Рассеяние энергетических ионов на ядрах атомов описывается как парное столкновение [2, 3].

Для прямого статистического описания неупругих процессов с участием электронов удобно использовать эмпирический подход, для которого достаточно информации о числе электронов и энергиях связи оболочек атома. Если детальное описание неупругих электронных процессов не требуется, то торможение электронов в ТТ рассчитывается с помощью функции тормозной способности. Электронное торможение быстрых тяжелых ионов в FLUENCE также описывается функцией тормозной способности. Распространение заряженных частиц в ТТ моделируется методом Монте-Карло (ММК).

FLUENCE включает иерархию моделей, поскольку каждый техпроцесс или метод контроля обладает характерным для него видом, объемом и формой представления информации. Для литографии представляется адекватным расчет пространственного распределения плотности выделенной в резисте энергии, для чего достаточно приближения непрерывных потерь. Оценка предела разрешения электронной и рентгеновской литографии требует прямого описания неупругих процессов ионизации атомов для учета вклада в экспонирование каскадов вторичных электронов. Прямое описание неупругих процессов необходимо и для расчета угловых и энергетических распределений отраженных и вторичных электронов в РЭМ, ФЭ и спектроскопии энергетических потерь.

При моделировании ИИ и ионной литографии обычно можно пренебречь кристаллической структурой ТТ и рассчитывать распределение ионов по глубине и плотность объемных потерь энергии, необходимую для оценки распределения радиационных дефектов. При расчете энергетических и угловых спектров отраженных и распыленных частиц, структуры слоя, модифицированного РИТ, перемешивания атомов на границах раздела, генерации радиационных дефектов необходимо прямое описание каскадов вторичных частиц.

Возможности и расширение пакета FLUENCE представлены в табл. 1.

**Формирование элементов с латеральными размерами 0,3—0,5 мкм методами проекционной УФ и низковольтной электронной литографии.** Топологические размеры 0,3—0,5 мкм, требуемые в технологии кремниевых УБИС, можно воспроизвести любым из трех традиционных способов локального экспонирования резистов: УФ проекционной (УФП), рентгеновской в пучках СИ или электронной литографией.

В практической литографии определяющим параметром является линейный размер и профиль окна в резисте после проявления, определяющийся параметрами оборудования и технологией резистов.

Частицы	Область применения		
	Технология	Контроль	
Ионы	Формирование сплавов Распыление	ВИМС	F L U E N C E I F L U E N C E II
	Тонкие мембраны Литография Имплантация	Обратное резерфордское рассеяние	
Электроны	Электронная литография Быстрые термические процессы Мембраны	Спектроскопия энергетических потерь РЭМ на первичных электронах	
	Рентгеновская литография	РЭМ на вторичных электронах Оже-спектроскопия Фотоэлектронная спектроскопия	

В УФП литографии основная тяжесть практического воспроизведения субмикронных размеров, близких к теоретическим пределам, в простейших анализируемых схемах приходится на уменьшение длины волны экспонирующего излучения при сохранении глубины фокуса, разработку многослойных резистов, содержащих контраст-усиливающие слои, локальную химическую модификацию (ЛХМ) поверхности резистов [9], включая наиболее перспективный процесс силилирования [10], позволяющий радикально решить проблему глубины фокуса и отражающих слоев в проекционной литографии [5, 11].

*Проекционная УФ литография на многослойных резистах, содержащих контрастно-усиливающие слои.* Усиление контраста при использовании КУС обусловлено тем, что локальная прозрачность верхнего слоя возрастает с увеличением поглощенной дозы. Это позволяет вырезать из дифракционной картины освещенности «хвосты» слабой интенсивности, тем самым усиливая контраст изображения перед попаданием излучения на поверхность фиксирующего изображения нижнего резиста (рис. 1). Теоретические разработки усиления контраста [5], методика его измерения по данным пропускания/поглощения света в КУС и математического описания составили основу разработанного пакета прикладных программ UVLIT-1.0, включающего процедуры моделирования процессов экспонирования, проявления (включая ЛХМ) и обработки экспериментальных данных по поглощению с целью определения оптических констант КУС [6, 8].

*Низковольтная электронная литография (НВЭЛ).* Основные выводы при ММ низковольт-

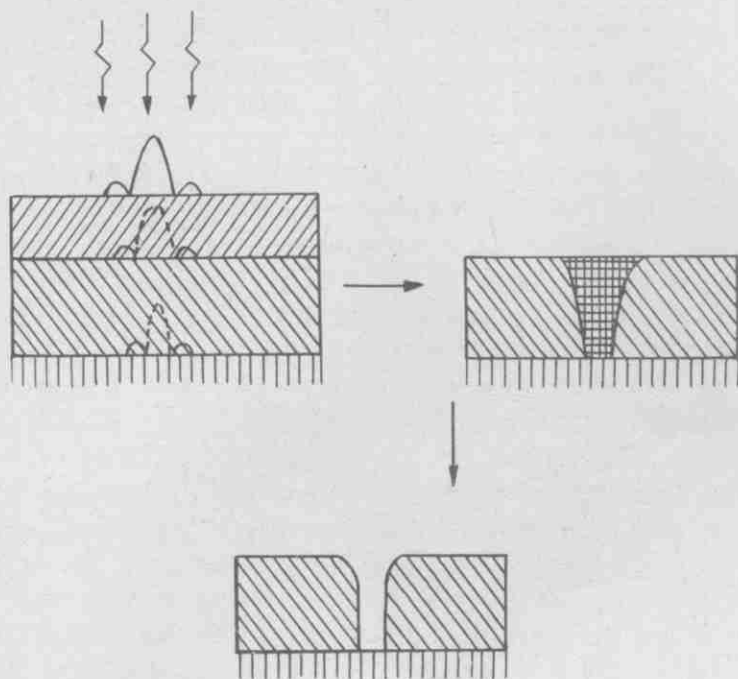


Рис. 1. Схема УФП с применением контраст-усиливающих слоев

ной электронной литографии с помощью пакета FLUENCE состоят в следующем [7].

1. Существует диапазон энергий электронов, в котором возможно формирование изображения в резисте с шириной линии менее 0,2 мкм при толщине экспонированного слоя порядка 0,1 мкм.

2. НВЭЛ обладает следующими преимуществами по сравнению с высоковольтной литографией:

- отсутствие воздействия электронов на материал подложки;
- меньшая подверженность эффекту близости и большая контрастность;
- малая доза экспонирования по сравнению с традиционной техникой.

3. НВЭЛ требует нетрадиционной технологии обработки резистов. Оптимальной, по-видимому, является ЛХМ их поверхности.

**Локальная химическая модификация резистов.** В соответствии с работами [4, 6] математическая модель силирования экспонированных резистов построена на основе совместного решения уравнения кинетики заполнения центров химического связывания кремния и уравнения диффузии ГМДС в экспонированные области с известным начальным распределением центров, определяемым локально поглощенной дозой. Начальное распределение центров моделируется с помощью пакета UVILIT-1,0.

Математическая модель проявления ЛХМ резистов основана на формуле для изменения толщины силированного резиста в процессе ПХТ с учетом ионного распыления [12]. Входящие в выражение величины в модели являются функциями координат, рассчитываемыми на основе данных, полученных на стадии моделирования ЛХМ, а профиль проявления рассчитывается с помощью стандартной методики по известной

локальной скорости изменения толщины силированного резиста в процессе ПХТ [13].

Все выполненные работы по ММ субмикронной литографии инициировались и выполнялись совместно с Ю.С.Боковым, возглавлявшим до 1994 г. технологический отдел НИИФП. Результаты работ освещены в [4—8].

**Плазмохимические и газофазные процессы.** Одной из ключевых задач субмикронной технологии является воспроизведение литографических размеров методами сухого травления в функциональных слоях (ФС), состоящих из различных материалов. Требования к качеству процесса травления выражаются такими технологическими параметрами (ТП), как однородность и величина скорости травления по пластине, селективность травления ФС, анизотропия. Необходимые значения ТП определяются топологическими нормами элементов и допусками на них.

Разработка процесса ПХТ и выбор конструкции реактора ставят следующие задачи для ММ:

- исследование определяющих ТП физико-химических процессов;
- разработку математических моделей процессов ПХТ;
- создание прикладных программ, позволяющих выбрать оптимальную конструкцию реактора и режим процесса.

Ниже кратко изложены математические модели ПХ процессов и реакторов для их проведения, включенных в пакеты ELEDIS и ECRPLA, а также результаты их применения.

**Приэлектродные слои и энергетические распределения ионов, бомбардирующих подложку в ВЧ-емкостных и ЭЦР реакторах.** Возможности процессов ПХТ в значительной степени определяются плотностью, однородностью, угловыми и энергетическими распределениями потоков ионов, формируемых в приэлектродных слоях (ПС) в широко применяемых ВЧ емкостных и ЭЦР реакторах (ВЧЕР и ЭЦРР).

Величина и однородность потоков определяет скорость травления и ее разброс по пластине, направленность движения — анизотропию, а энергетическое распределение ионов (ЭРИ) — селективность ПХТ. Основные характеристики ПС, определяющие ЭРИ, включают соотношение между длиной свободного пробега ионов и толщиной слоя (столкновительный и бесстолкновительный ПС — СПС и БПС), соотношение между ионной плазменной частотой  $f_{pi}$  и частотой ВЧ генератора  $f_g$  ( $f_g < f_{pi}$  — резистивный,  $f_{pi} < f_g$  — емкостной ПС), соотношение между временем пролета слоя ионами  $t_r$  и обратной частотой ВЧ генератора ( $t_r < f_g^{-1}$  — ЭРИ определяется мгновенным значением падения напряжения на ПС,  $t_r \gg f_g^{-1}$  — ЭРИ соответствует среднему по ВЧ периоду значению напряжения на ПС —  $U_{sh}$ ).

Решение задачи о временной зависимости, падения напряжения на слое  $U_{sh}(t)$  позволяет, таким образом, рассчитать ЭРИ [6, 14].

В резистивной модели ПС планарного ВЧЕР характеристики разряда определяются из условий равенства мгновенных значений протекающих через электроды токов проводимости, баланса напряжений в цепи генератор—разряд и равенства нулю заряда, протекающего через разряд за период ВЧ поля при наличии блокирующей емкости. Расчет ЭРИ для в области параметров ВЧЕР, характерной для технологических приложений, основывается на бесстолкновительности движения ионов в ПС.

Разработанная модель была применена для моделирования ПС и ЭРИ в асимметричном планарном ВЧЕР в аргоне при давлении 50 мТорр, в диапазоне частот 70—1000 КГц и напряжений 300—700 В. Результаты расчетов и измерений представлены на рис. 2, 3.

Разработанная модель применима также к расчету ПС в ЭЦРР, управляемых внешней цепью ВЧ — смещения [6, 14]. Она входит в состав пакетов ELEDIS и ECRPLA. Рассчитанные ЭРИ используются затем для определения выхода реакций физического распыления и ПХТ, степени радиационных повреждений и анизотропии процесса ПХТ в программе ММ формирования рельефа при ПХТ и РИТ.

*Плазмохимический реактор с магнитным зеркалом на основе электронно-циклотронного резонанса.* Достигнутые в ЭЦРР параметры процесса травления позволяют сделать вывод о их применимости для глубинного травления кремния и формирования субмикронных затворов.

ЭЦРР являются технически сложной системой, поэтому уже на стадии их конструирования необходимо активное применение ММ с целью обеспечить нужные ТП, что требует решения на ЭВМ следующих задач:

- переноса электронов, ионов и химически активных частиц (ХАЧ) на подложку и стенки камеры ЭЦРР с учетом подключенной цепи смещения;

- расчета ЭРИ, энергетических распределений электронов и химической кинетики в плазме разряда;

- моделирования микрорельефа заданной структуры в процессах травления или осаждения с учетом одновременного воздействия на ее поверхность потоков ионов, электронов, ХАЧ и инертных частиц.

Все перечисленные задачи включены в пакеты ELEDIS и ECRPLA.

Источником плазмы в ЭЦРР является разрядная камера, в которой осуществляется разогрев электронов плазмы СВЧ волной, для которой в части объема камеры выполняется условие частотного резонанса с циклотронным вращением электронов. При частоте СВЧ волны 2,45 ГГц резонансная величина магнитного поля  $B_c = 875$  Гс, что позволяет упростить расчет электронных и ионных потоков на подложку и проводящие стенки камеры, к которым подключена цепь смещения, поскольку движение частиц можно считать замагниченным.

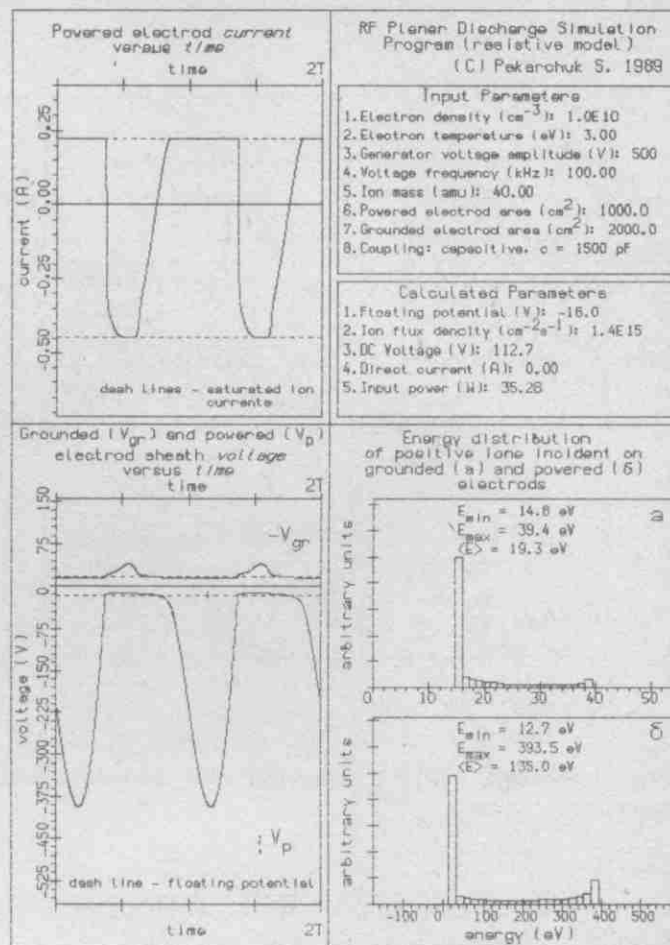


Рис. 2. Временные зависимости падений напряжений в ПС и разрядного тока. ЭРИ ионов, бомбардирующих электроды

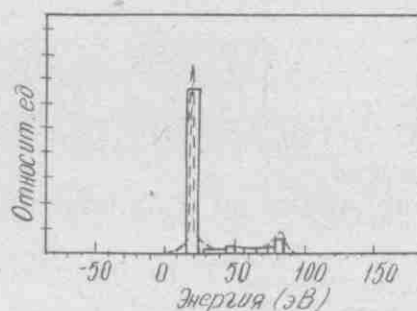


Рис. 3. Расчет ЭРИ ионов  $AgH^+$  в сравнении с экспериментальным [15]

Изменение потока ионов вдоль магнитных силовых линий (МСЛ) связано в этом случае лишь с их расходимостью и уходом части ионов поперек поля из-за столкновений, а величину потоков электронов определяют тормозящие падения напряжений в ПС вблизи электродов.

Величина и знак поперечного тока, замыкающего цепь смещения через плазму, зависит от поперечных к направлению МСЛ градиентов потенциала и концентрации плазмы. Плотность поперечного тока включает дрейфовую и диффузионную составляющие с коэффициентами подвижности и диффузии поперек магнитного поля.

Модель плазменных потоков в ЭЦРР с магнитным зеркалом включена в пакет ECRPLA и позволяет рассчитывать: ВАХ ЭЦР-реактора; конфигурацию и плотность плазменных потоков на подложке и стенках камеры; падения напряжения в приэлектродных слоях; энергетические распределения ионов, воздействующих на под-

Экспериментальные и расчетные характеристики реактора ASTeX 1500

Параметр	Давление $P_k$ , Па					
	0,05	0,27	0,67	1,33	2,00	2,66
$\varphi_R$	37	35	32	28	25	22
$\varphi_K$	23	20	12	12	10	9
$\Phi_R - \Phi_K$	28	23	22	22	19	20
$(n_{iR}/n_{iK})_{\text{экс.}}$	22	18	25	34	46	75
$(n_{iR}/n_{iK})_{\text{расч.}}$ $T_{iR} = T_{eR}$	24	23	24	25	25	26
$(n_{iR}/n_{iK})_{\text{расч.}}$ $T_{iR} = 1 \text{ эВ}$	54	50	48	48	44	45
$(\Phi_R - \Phi_c)_{\text{расч.}}$	41,8	37	34	29	26	24
$(\Phi_R - \Phi_n)_{\text{расч.}}$	53	46	42	38	33	30
$(\Phi_n - \Phi_c)_{\text{расч.}}$	-11	-10	-9	-8	-7	-6
$\Phi_K$	51	43	34	34	29	29

ложку и стенки камеры; в условиях подключения реактора к внешней электрической цепи управления — постоянного или ВЧ смещения.

В качестве тестирования пакета ECRPLA проводился анализ ЭЦРР, разработанного фирмой Applied Science and Technology — ASTeX 1500. Результаты моделирования сравнивались с экспериментальными данными работы [16], в которой по ВАХ ленгмюровских зондов были определены температура электронов  $T_e$  и концентрация ионов  $n_i$  в области разряда ( $R$ ) и в вакуумной камере ( $K$ ) реактора.

На рис. 4 показаны распределения плотностей ионных потоков на подложке и стенках камеры, степень неоднородности которых по подложке от центра к краю не превышает 5%.

Взятые из эксперимента значения  $n_{iR}$ ,  $T_{eR}$ ,  $T_{iR}$  в области разряда позволили провести расчеты ВАХ разряда, падений напряжения в ПС и ЭРИ на подложке и боковых стенках камеры.

В табл. 2 приведен ряд результатов измерений и расчетов, выполненных по программам ELEDIS и ECRPLA. Сравнивалось отношение концентраций ионов в разряде и камере  $n_{iR}/n_{iK}$ . Сравнение расчета и эксперимента показывает, что при низких давлениях аргона в вакуумной камере  $P_k < 1$  Па наблюдается их количественное совпадение при  $T_{iR} = T_{eR}$ , а при более высоких давлениях  $P_k > 1$  Па соответствие имеет место при  $T_{iR} < T_{eR}$ . В табл. 2 также приведены измеренные плавающие потенциалы зондов  $\varphi_R$  и  $\varphi_K$ , расчетные разности потенциалов разряда с камерой ( $\Phi_R - \Phi_K$ ), подложкой ( $\Phi_R - \Phi_n$ ), стенкой камеры ( $\Phi_R - \Phi_c$ ), а также разность ( $\Phi_n - \Phi_c$ ), вызванная неоднородным магнитным полем. Сравнение расчетных значений  $\Phi_R - \Phi_n$  с плавающим потенциалом зонда в камере  $\varphi_K$  относительно разряда показывает хорошее количественное совпадение.

*Химическая кинетика и функция распределения электронов по энергиям в ВЧ и СВЧ разрядах.* Постановка самосогласованной задачи о

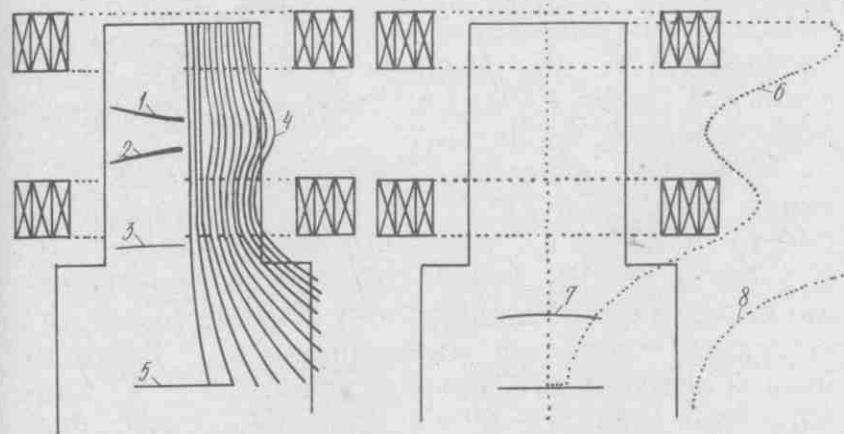


Рис. 4. Конфигурация магнитного поля и плотности ионных потоков в реакторе ASTeX 1500: 1, 2, 3 — ЭЦР слои; 4 — траектории электронов и ионов; 5 — подложка; 6 — распределение магнитного поля на оси реактора; 7, 8 — плотности ионных потоков на подложке и стенках камеры

генерации и разогреве электронов в плазме и химической кинетике ВЧ и ЭЦР разрядов с динамической функцией распределения электронов по энергиям (ФРПЭ) является задачей последующих версий пакетов ELEDIS и ECRPLA. Здесь рассмотрены отдельно задачи химической кинетики с заданной ФРПЭ и разогрева электронов в условиях ЭЦР.

Математическая модель химической кинетики включена в пакеты ELEDIS и ECRPLA и описана в [6] на примере разложения  $SF_6$  в разрядах низкого давления с гетерогенной рекомбинацией. Кинетика и пространственное распределение многокомпонентной системы взаимодействующих частиц описываются уравнениями переноса, учитывающими через константы скоростей генерацию радикалов, ионов и электронов в плазме, их рекомбинацию и гибель. Уравнения замыкаются граничными условиями взаимодействия частиц со стенками камеры и условиями прокачки газа. При расчете состава плазмы необходимо соблюдение локальной электронейтральности плазмы.

На рис. 5 приведены результаты расчетов с помощью пакетов ELEDIS и ECRPLA кинетики накопления радикалов в плазме  $SF_6$ . Математическая модель разогрева плазмы в условиях ЭЦР и генерации химически активных частиц включает энергетический баланс электронов, расчет на его основе их температуры с последующим использованием модельных ФРЭЭ.

Возможен и прямой путь нахождения энергетического баланса электронов плазмы — это использование соответствующего момента кинетического уравнения.

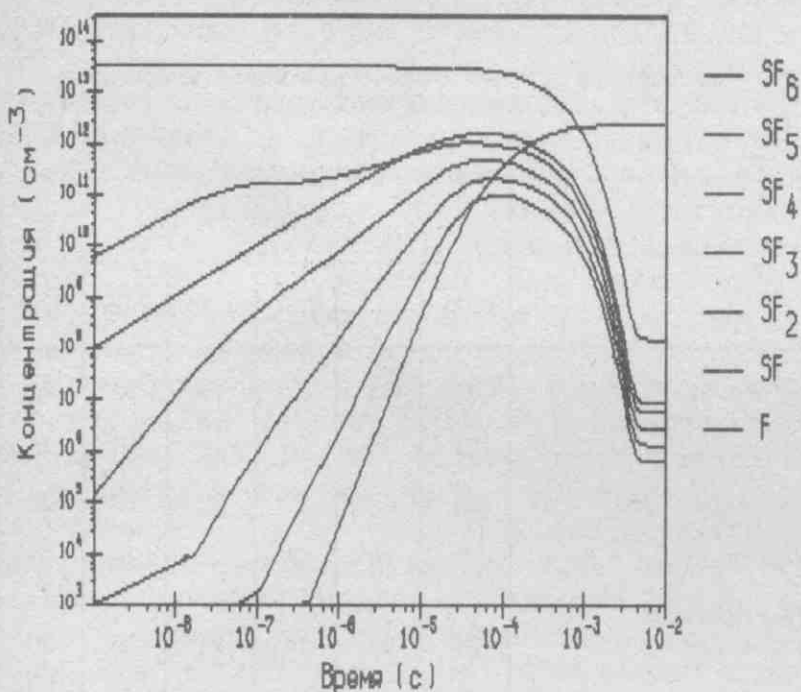


Рис. 5. Кинетика накопления радикалов в плазме SF<sub>6</sub>:  $n_e = 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ,  $p = 1 \text{ Торр}$ ,  $S_0 = 600 \text{ см}^2$ ,  $S_1 = 100 \text{ см}^2$ ,  $u = 10 \text{ см/с}$

тического уравнения для ФРЭЭ или прямое моделирование ФРЭЭ в плазме ЭЦРР. В пакете ECRPLA реализовано прямое моделирование методом Монте-Карло ФРЭЭ в ЭЦРР [6].

Основной механизм ЭЦР-возбуждения плазмы заключается в создании для электронов условий циклотронного резонанса — совпадении частоты вращения в постоянном магнитном поле  $\omega_c$  с частотой электрического поля СВЧ волны  $\omega_E$ .

В работе [6] были получены решения уравнения Лоренца вблизи и в отдалении от ЭЦР-поверхности, определяемой условием  $\omega_c = \omega_E$ , позволяющие провести прямое численное моделирование ФРЭЭ методом Монте-Карло при заданных элементарных процессах рассеяния электронов на частицах плазмы. Вследствие слабой ионизованности ЭЦР-плазмы обычно достаточно при моделировании ФРЭЭ учитывать взаимодействие электронов только с нейтральными атомами.

Для описания неупругих процессов использован эмпирический подход, аналогичный принятому в пакете FLUENCE. Пример расчета ФРЭЭ с помощью пакета ECRPLA приведен на рис. 6.

*Математическое моделирование формирования рельефа в функциональных слоях и структурах в плазме.* Формирование субмикронных структур и глубинное травление кремния на практике осуществимо только методами ПХТ, включая РИТ. Основные требования к ПХТ вертикальных элементов: высокая скорость процесса  $V \geq 1 \text{ мкм/мин}$  и анизотропия  $A \geq 50$ , однородность скорости  $\Delta V/V \leq 0,02 - 0,05$ , селективность по отношению к резистивной маске  $\geq 20$ . Выполнение приведенных требований зависит от боль-

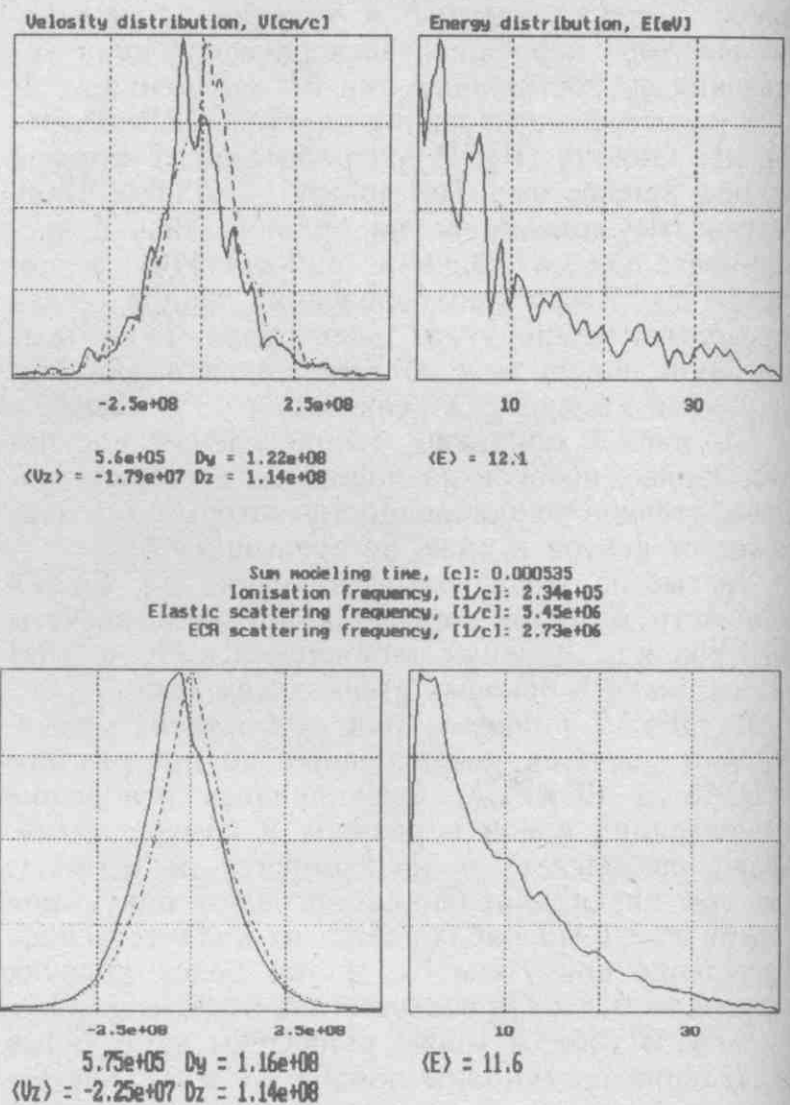


Рис. 6. Расчет ФРЭЭ в ЭЦРР с помощью пакета ECRPLA

шого числа факторов и, несмотря на обширные исследования, в настоящее время отсутствует полное понимание механизмов РИТ и ПХТ.

ММ указанных процессов включает разработку моделей спонтанного травления кремния (СТ), физического распыления, ионно-стимулированного травления, расчет локальных потоков химически активных частиц (ХАЧ) и ионов в формируемых структурах с учетом электростатической фокусировки ионов в ПС и динамику профилей [17, 18]. Модели ПХТ и РИТ, включенные в пакет ECRPLA, учитывают все вышеперечисленные процессы.

Приведем некоторые результаты моделирования процессов ПХТ структур с применением пакета ECRPLA в сравнении с измерениями [19]. В работах [6, 19] отмечалось, что форма профиля определяется следующими параметрами: отношением скоростей анизотропного и изотропного травления для плоской поверхности  $R$ , анизотропией ионного пучка для смещенного распределения Максвелла  $A_i = v_{\perp 0}/V_{\parallel}$  и коэффициентом отражения ХАЧ от поверхности  $\alpha$ .

На рис. 7 представлены примеры моделирования профилей ПХТ кремния в ВЧЕР и ЭЦРР. Маска предполагалась стойкой. При моделировании использовалось значение анизотропии

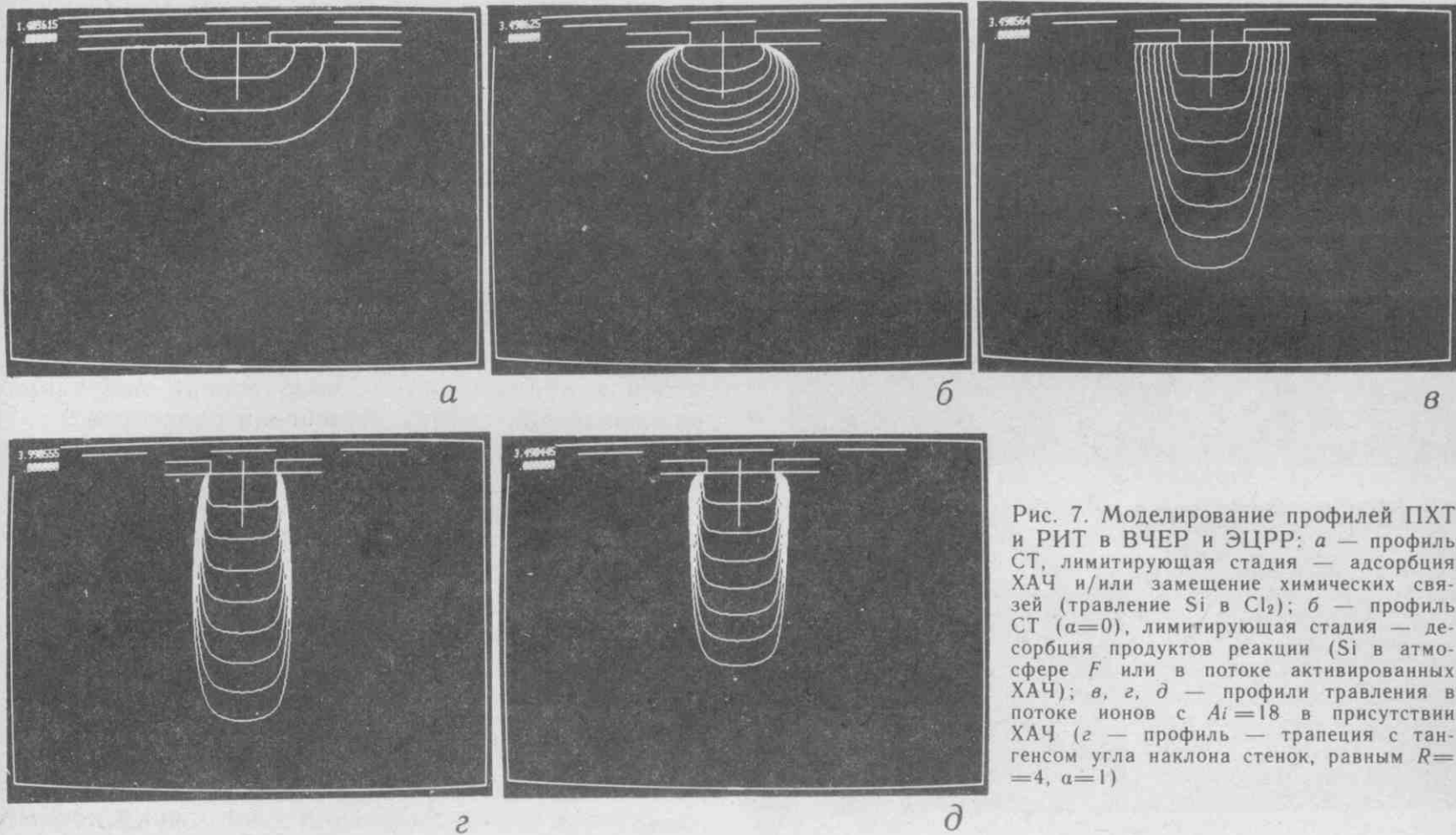


Рис. 7. Моделирование профилей ПХТ и РИТ в ВЧЕР и ЭЦРР: а — профиль СТ, лимитирующая стадия — адсорбция ХАЧ и/или замещение химических связей (травление Si в Cl<sub>2</sub>); б — профиль СТ ( $\alpha=0$ ), лимитирующая стадия — десорбция продуктов реакции (Si в атмосфере F или в потоке активированных ХАЧ); в, г, д — профили травления в потоке ионов с  $A_i=18$  в присутствии ХАЧ (г — профиль — трапеция с тангенсом угла наклона стенок, равным  $R=4$ ,  $\alpha=1$ )

ионного пучка  $A_i=18$ . Профили СТ показаны на рис. 7 а, б. Рис. 7,а соответствует СТ в газах, лимитирующей стадией которого является адсорбция ХАЧ и/или замещение химических связей (травление Si в Cl<sub>2</sub>). Рис. 7,б — пределу, моделирующему процессы, для которых лимитирующей стадией является десорбция продуктов реакции (Si в атмосфере F).

Основная характеристика потока ионов — его анизотропия  $A_i$ , определяющая величину бокового подтравки и глубину, начиная с которой скорость травления резко замедляется [20]. На рис. 7,в,г,д приведены профили РИТ в потоке ионов с  $A_i=18$  в присутствии ХАЧ. Отметим случай с  $\alpha=1$  (рис. 7,г), в котором профиль имеет форму трапеции с тангенсом угла наклона стенок, равным  $R=4$ .

На рис. 8 показаны результаты травления Si в планарном ВЧЕР в атмосфере SF<sub>6</sub> с Cl-содержащими добавками. На рис. 8,а — травление Si через фоторезистивную маску в чистом SF<sub>6</sub>. Малая анизотропия свидетельствует о существенном вкладе СТ, а отсутствие подтравки — о том, что оно происходит под действием возбужденных атомов F.

Результаты заметно меняются при введении Cl-содержащих добавок (рис. 8,в,д — 35% CCl<sub>4</sub>), Хемосорбирующиеся на поверхности Si атомы Cl, не замещая химических связей Si—Si, уменьшают травление атомами F ( $R \gg 1$ ). Оптимальные профили травления были получены при рабочем давлении 8—10 Па, при этом анизотропия превышала 30.

Появление подтравки, полученное при двух-слойной маске ФР/SiO<sub>2</sub> (рис. 8,г), предполагает многократное повышение концентрации атомарного F. Возможной причиной этого является наличие в плазме атомов O, распыленных с поверхности SiO<sub>2</sub>.

Анализ ситуаций, возникающих при ПХТ, показывает, что большинство из них может быть качественно описано в рамках принятой модели.

**Механизмы низкотемпературного плазменного окисления кремния.** Подробное изложение работ по низкотемпературному и термическому окислению кремния содержится в работах [6, 21, 22]. Отметим, что согласно результатам работы [22] наблюдавшаяся кинетика роста окисла в низкотемпературном плазменном процессе в ЭЦР-реакторе в кислородной плазме может быть качественно интерпретирована на основе модели Кабрера—Мотта.

**Программные разработки.** Конечным результатом разработок средств ММ процессов субмикронной технологии стали пакеты прикладных программ, описанные выше. Перечислим их в порядке упоминания в тексте: FLUENCE-1,5 — ММ пучковых технологий и средств контроля; UVILIT-1,0 — ММ УФП литографии на многослойных резистах с КУС, силилирования и плазменного проявления; ECRPLA-1,5 — ММ ЭЦРР для ПХТ, включает пять взаимосвязанных модулей, использующих общие данные:

— MAGSYS — расчет магнитной системы реактора;

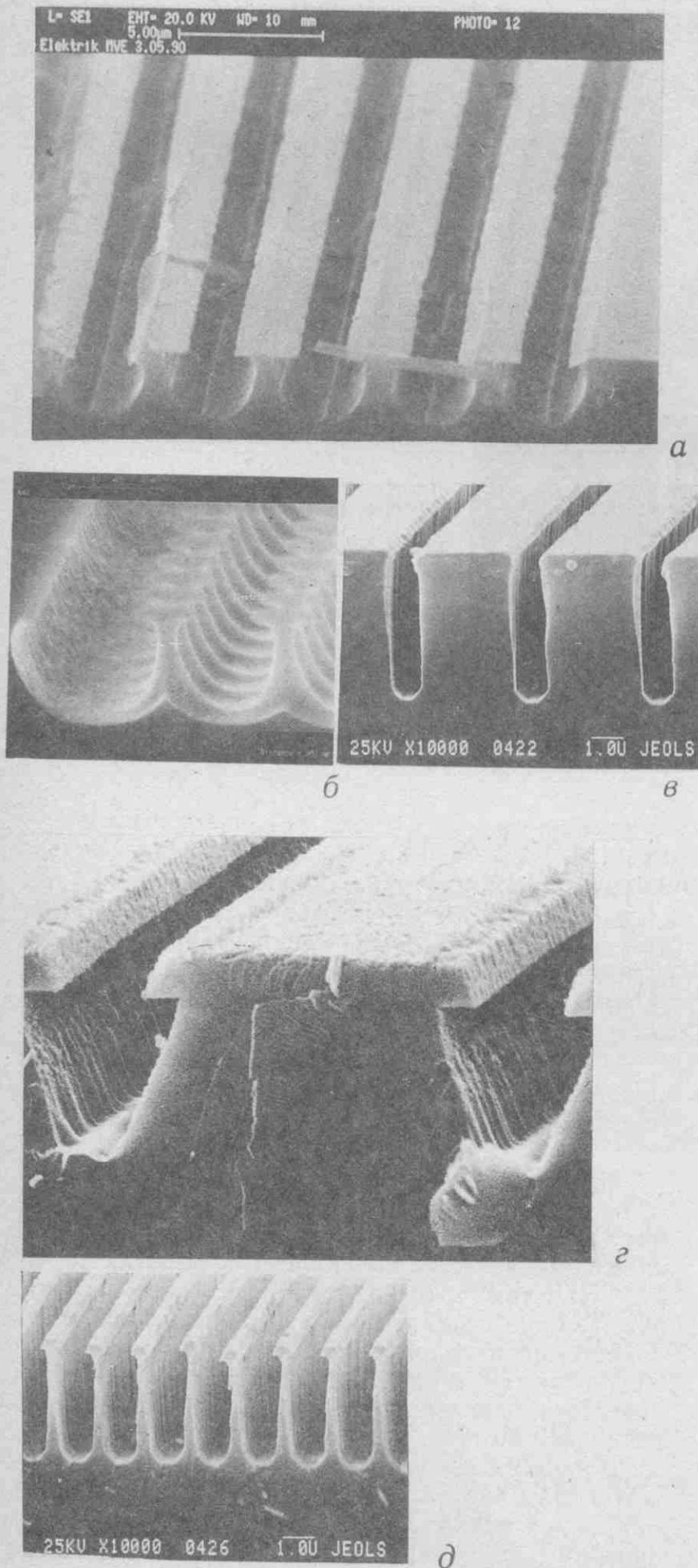


Рис. 8. Результаты травления Si в планарном ВЧЕР в атмосфере  $SF_6$  с Cl-содержащими добавками: а — травление Si через маску в чистом  $SF_6$  (малая анизотропия, существенный вклад СТ, отсутствие подтравы — действие атомов F); в, д — 35%  $CCl_4$  (хемосорбированные на Si атомы Cl частично блокируют травление атомами F, оптимальные профили получены при давлении 8—10 Па, анизотропия превышает 30); г — двухслойная маска ФР/ $SiO_2$  (появление подтравы — повышение концентрации атомарного F, возможная причина — наличие в плазме атомов O, распыленных с  $SiO_2$ )

— ELEDIS-1,0 — расчет плазменных потоков в ЭЦР реакторе;

— ENDISE — моделирование ФРЭЭ в зоне разряда;

— KINDIS — моделирование химической кинетики в ЭЦР разряде;

— IRESIM — моделирование формирования рельефа методами ПХТ и РИТ;

ELIDIS-1.5 — ММ электрофизических характеристик ВЧ-емкостных и ЭЦР реакторов, включая плазменные потоки, приэлектродные слои, ЭРИ, временные зависимости разрядного тока и падений напряжения на разряде при различных электрических схемах включения реакторов;

DEPOS-1.5 — ММ процессов осаждения и напыления.

**Радиационно-стимулированные процессы в микротехнологии.** Радиационно-стимулированные процессы (РСП) составляют основу субмикронной и нанотехнологии, а исследование их механизмов и разработка математических моделей представляется важнейшей задачей ММ [23, 24]. Ниже рассматриваются некоторые вопросы описания и ММ РСП в приложении к процессам очистки поверхности, осаждения и ПХТ функциональных слоев [14, 18, 25, 26].

*Воздействие излучения на монослойные пленки.* Процессы десорбции хемосорбированных частиц и разложения ФС под воздействием электронов, УФ- и рентгеновских квантов являются объектом обширных фундаментальных и прикладных исследований. В приложении к воздействию на монослойные пленки, а также на атомы и молекулы, радиационно-стимулированная десорбция (РСД) привлекательна из-за селективного воздействия на частицы.

Одним из основных прикладных аспектов РСД является управляемое изменение степени покрытия поверхности адчастицами в условиях техпроцессов, характеризуемое ее отношением  $\gamma$  к покрытию в отсутствие облучения [14, 18, 25, 26]. Величина  $\gamma$  зависит от температуры и состава газа и поверхности, давления адсорбирующихся частиц, частот РСД  $\nu_R = \sigma_R \cdot J_R$  и термодесорбции  $\nu_T = \nu_T^0 \exp(-E_D/kT)$ .

Приведем количественные оценки величины  $\gamma$  для области параметров, характерной для технологических применений. Область значений энергии активации десорбции  $E_D$  хемосорбированных частиц традиционно определяется интервалом 0,43—4,3 эВ. Число адцентров на Si —  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Диапазон значений  $\nu_T^0$  для атомов и молекул:  $10^{15} \cdot (T[K]/300K)^2 - 3 \cdot 10^{16} \cdot (T[K]/300K)^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , давлений газа  $10^{-1} - 10^{-6}$  Торр, температуры газа и поверхности в пределах 300—1200 К. Сечения ЭСД лежат в интервале  $\sigma_{Rz} = 10^{-16} - 10^{-19} \text{ см}^2$ , ФСД —  $\sigma_{R\Phi} = 10^{-17} - 10^{-20} \text{ см}^2$ .

Плотности потоков частиц, стимулирующих десорбцию, зависят от источника излучения. Двумя наиболее интенсивными источниками являются электронная пушка и накопительное кольцо (НК) — источник ВУФ и рентгеновских кван-



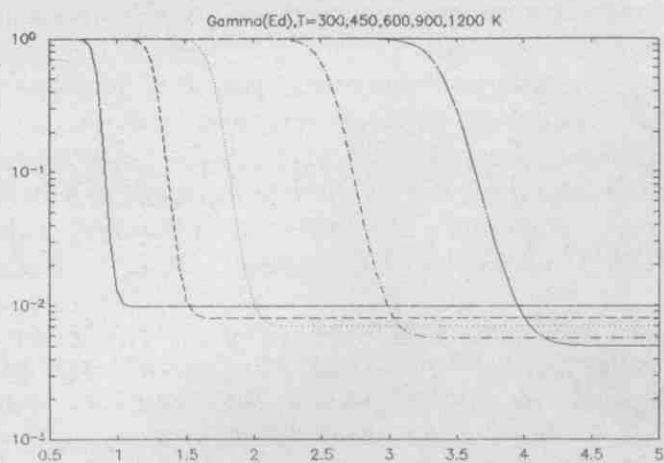


Рис. 9. Изменение степени покрытия поверхности кислородом при включении РСД

тов. Так, плотность потока электронов, формируемого электронной пушкой, составляет до  $J_e = 2,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Применение ФСД возможно при использовании ВУФ или мягкого рентгеновского излучения, поскольку пороговые энергии ФСД составляют 5—20 эВ. Наиболее перспективными источниками фотонов необходимых энергий могут служить эксимерные лазеры на  $\text{KгCl}$  ( $h\nu = 5$  эВ),  $\text{AgF}$  ( $h\nu = 6,42$  эВ), обладающие интенсивностью до  $6 \cdot 10^{18}$  фотонов/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ), а также НК. Так, интенсивность пучка фотонов НК DORIS при энергии электронов 3 ГэВ и токе 500 мА в диапазоне 50—4000 эВ может составить до  $10^{18}$  фотонов  $\cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{мрад}^{-2}$ . Таким образом, частоты РСД для рассматриваемых источников излучения лежат в интервалах:  $\nu_{\text{РД}} = 25\text{—}250 \text{ с}^{-1}$ ,  $\nu_{\text{РФ}} = 1\text{—}10 \text{ с}^{-1}$ .

Проведенный анализ диапазона параметров, входящих в математическую модель процесса РСД, позволяет оценить эффективность процесса. На рис. 9 показана эффективность ЭСД очистки поверхности от кислорода  $\gamma$  для различных значений температуры. ЭСД уменьшает степень ее покрытия на два и более порядка.

**Радиационно-стимулированные (РС) гетерогенные реакции травления, осаждения и окисления.** Общие статистические и кинетические схемы описания РС гетерогенных реакций, включая процессы ПХТ и РИТ, как и результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований, в приложении к субмикронной технологии достаточно полно отражены в литературе [18, 26, 27].

Появление в качестве технологического инструмента в области нанотехнологии СТМ дает возможность по-новому оценить роль РСД в перспективных предельно локализованных технологических операциях формирования рельефа и ФС, ставит задачи разработки математических моделей для систем зонд СТМ — газоплазменная среда — поверхность на атомно-молекулярном уровне.

**Физико-математическое моделирование процессов нанотехнологии.** В нанометровом диапазоне размеров становится возможным получить информацию на атомно-молекулярном уровне о химических и структурных изменениях в ТТ, ФС и на поверхностях в условиях внешних направленных воздействий — нагрева, давления, механических напряжений, радиации и т.п. путем исследования динамики взаимодействующих атомов и молекул на ЭВМ.

**Физические модели процессов микротехнологии, решаемые методами молекулярной динамики (МД).** На практике ММ перечисленных явлений сводится к исследованию миграции ансамблей взаимодействующих частиц под действием внешних и самосогласованных полей вблизи рельефных поверхностей на них и в тонких пленках с возможным изменением фазового состояния частиц (газ, адслой, объемный раствор, химическая связь), а также с учетом их генерации, рекомбинации и гибели.

Таким образом, если возможны построения модельных потенциалов взаимодействия между участвующими в процессе частицами, расчет сечений РСД, локальных потоков облучения и внешних полей, то модификацию ФС в ходе ТП можно рассматривать как задачу, решаемую методами МД [24].

**Миграция частиц по поверхности и в пленочных структурах.** Моделирование миграции атомов, молекул или ионов требует решения системы уравнений движения для ансамбля  $N$  взаимодействующих частиц во внешних полях:

$$m \cdot \ddot{\vec{r}}_i(t) = \vec{F}(\vec{r}_i, t) - \nabla_{\vec{r}_i} U(\{\vec{r}_i\}, t), \quad i=1, \dots, N, \quad (1)$$

где  $m$  — масса частицы;  $\vec{r}_i$  — ее положение в момент времени  $t$ ;  $\vec{F}$  — внешняя сила;  $U$  — энергия межчастичного взаимодействия.

Интегрирование системы уравнений (1) на практике, как правило, производится для парных взаимодействий между частицами и лишь в отдельных случаях учитываются трехчастичные взаимодействия.

Значительного сокращения затрат машинного времени и памяти ЭВМ при моделировании миграции частиц в среде можно достичь, рассматривая движение одной или нескольких частиц и учитывая влияние среды (газ, поверхность, ТТ) на их движение как обобщенное трение и случайные силы. Математически задача сводится к решению обобщенного уравнения Ланжевена (ОУЛ) для положения частицы в среде  $r$  или ее скорости  $\dot{r}$  [28]:

$$\dot{\vec{r}}(t) = -\int_0^t \beta(t-s) \cdot \vec{r}(s) \cdot ds + \frac{1}{m} R(t), \quad (2)$$

в котором функция памяти среды  $\beta(t)$  и случайная сила  $R(t)$  связаны второй флуктуационно-диссипативной теоремой (ФДТ-2):

$$\langle R(t) \cdot R(\tau) \rangle = m \cdot k \cdot T \cdot \beta \cdot (t - \tau). \quad (3)$$

Вид функции памяти определяется средой. Подробное изложение свойств ОУЛ и численных алгоритмов его решения содержится в работах [14, 29, 30] и в приведенной в них библиографии.

Уравнения (1)–(3) и их комбинации составляют основу математического аппарата методов МД и стохастической динамики (СД) в приложении к моделированию миграции частиц в ходе техпроцессов.

*Методы МД и стохастической динамики.* Для проведения численного эксперимента необходимо задать потенциалы взаимодействия между частицами, распределить их в соответствии с условиями начала ТП (фазовый, структурный состав, давление, температура и т.д.), определить внешние воздействия на частицы в ходе моделируемого ТП и задать необходимый объем и вид представления информации для последующего анализа и интерпретации.

Знание положений и скоростей атомов и молекул, получаемое в процессе моделирования, позволяет вычислить любые характеристики исследуемой системы в любой момент времени. К ним относятся парные корреляционные функции, определяющие упорядоченность в системе, коэффициенты диффузии, вязкости и теплопроводности.

Пространственно-временные масштабы, доступные для МД, определяются производительностью ЭВМ. Количество частиц обусловлено емкостью памяти и может достигать  $10^6$ – $10^7$  единиц, что достаточно для исследования модификаций в субмикронных и нанометровых элементах ( $10^7$  атомов содержатся в кубе  $50 \times 50 \times 50$  нм).

Наиболее значительным ограничением является быстродействие ЭВМ, поскольку необходимое для вычисления взаимодействия между каждой парой частиц число операций составляет  $d \cdot N^2$ , где  $d \approx 10$ . Масштаб реального времени, доступного для методов МД, составляет тысячи периодов тепловых колебаний атомов в ТТ, что требует часов времени стандартного процессора при производительности  $10^7$  оп./с для анализа  $10^3$  частиц.

Развитие методов МД в направлении снижения трудоемкости связано с применением спецпроцессоров, которые позволяют на порядки увеличить число частиц и уменьшить время расчетов. ПЭВМ со спецпроцессорами превращают МД в мощный инструмент исследования, делая доступными массовые расчеты.

Другое направление связано с разработкой гибридных методов, позволяющих сократить число частиц в расчетах, не теряя существенно объема получаемой информации. Это, прежде всего, метод стохастической динамики, в основе которого лежит моделирование обобщенного броуновского движения частиц в различных средах. При этом ньютоновские уравнения дви-

жения традиционного метода МД заменяются на ОУЛ [28–30]:

$$d\vec{V}/dt = -\int_0^t \beta(t-s) \vec{V}(s) \cdot ds + \frac{1}{m} [R(t) + F_{\text{ext}}(t) + F_{\text{int}}(t)], \quad (4)$$

где  $F_{\text{ext}}(t)$  — внешняя сила;  $F_{\text{int}}(t)$  — сила, действующая на частицу со стороны других частиц. ФДТ-2 обеспечивает релаксацию выделенных частиц к термодинамическому равновесию. Корреляционные свойства случайной силы  $R(t)$  определяются атомно-молекулярными взаимодействиями составляющих среду частиц.

Численное решение ОУЛ требует построения разностных схем, разработки методов генерации случайной силы с заданными корреляционными свойствами, обработки численного алгоритма на модельных задачах, имеющих аналитическое решение. Перечисленные задачи рассматриваются в работах [17, 30].

*Методы расчета электростатических полей в пленочной структуре  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , формируемых зондом СТМ.* Расчет электростатических полей (ЭП), формируемых зондом СТМ в вакууме, диэлектрике и в кремнии, необходим по двум причинам. Во-первых, ЭП определяют высоту и форму потенциального барьера для электронов и, тем самым, величину автоэмиссионного или туннельного тока. Во-вторых, напряженность и направленность ЭП в диэлектрике и приповерхностном слое кремния определяют условия миграции подвижных частиц в пленочной структуре. Последние, в частности, формируют индуцированный СТМ информационный потенциальный рельеф структуры.

Математически задача расчета ЭП состоит в решении двумерного уравнения Лапласа для потенциала в вакууме, диэлектрике и кремнии в осесимметричной области  $(r, z)$ , незамкнутой в направлении полярной оси  $r$ . Граничные условия для потенциалов включают эквипотенциальность зонда СТМ, опорного электрода (или поверхности кремния, когда он сильно легирован) и соотношение между нормальными составляющими градиента потенциала на границах раздела вакуум—диэлектрик и диэлектрик—кремний.

Возможным прямым методом решения уравнения Лапласа в дифференциальной форме является метод преобразования Фурье (ПФ) в сочетании со специальной методикой учета зонда СТМ в качестве внутреннего электрода [31]. При небольшом числе параметров, описывающих вклад в потенциал от зонда, возможно достичь высокой точности вычислений. В основе методики лежит предположение о гладкости функции плотности поверхностных зарядов на зонде, что позволяет представить ее аналитически в виде разложения по некоторой системе функций. Значения коэффициентов разложения затем определяются из условия минимизации квадратичного

функционала, фиксирующего отклонения от граничных условий.

Наиболее общим методом решения уравнения Лапласа является метод функции Грина, представляющий интегральный эквивалент дифференциальному уравнению. Более подробно методика решения уравнения Лапласа методом функций Грина, включая примеры расчетов, изложена в [14].

Как видно из статьи, новая технология рождается не на пустом месте и преемственность знаний и опыта, приобретенных при разработке субмикронных техпроцессов, позволит избежать многих издержек предыдущего этапа и организовать исследования и разработки с четким осознанием важности перехода от измерений традиционных элементов микроэлементами или ангстремами к пониманию новых функциональных возможностей образований из конечного числа атомов и молекул в открытых самоорганизующихся системах.

Автор помнит многочисленные глубокие обсуждения проблем микротехнологии с Ю.С.Бокковым, инициировавшим и постоянно поддерживавшим многие начинания в области математического моделирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ермошин С.Н., Колсанов В.В., Кустов В.Л. Моделирование и создание АРМ пучковых технологий и средств контроля.— *Электронная промышленность*, 1991, № 5, с. 12.
2. Zigler J.F., Biersack J.P., Littmark U. Stopping Powers and Ranges of Ions in Matter., vol. 1. Pergamon, New York, 1985.
3. Абрамова М.В., Кустов В.Л. Аналитическое приближение для угла рассеяния ионов на атомах.— *Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника*, 1990, № 5, с. 176.
4. Локальная химическая модификация резистов — перспективный метод субмикронной литографии/Ю.С.Боков, М.Л.Вьюков, В.В.Денискин, В.Л.Кустов.— *Электронная промышленность*, 1992, № 6, с. 5.
5. Богачев И.Ю., Боков Ю.С., Кустов В.Л. Оптическая литография в производстве СБИС.— *Электронная промышленность*, 1991, № 2, с. 11.
6. Построение математических моделей базовых технологических процессов и средств контроля изготовления СБИС-64М и разработка комплексов их моделирования.— Научно-техн. отчет по п. 7.1 ТЗ НИР «Энтропия-91 ГКНТ»/Научный рук. разработки В.Л.Кустов, 1991, НИИФП им. Ф.В.Лукина, Москва.
7. Оценка литографического разрешения при экспонировании низковольтным пучком электронов/Ю.С.Боков, И.А.Голубев, С.Н.Ермошин и др.— *Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника*, 1990, вып. 5, с. 18.
8. Боков Ю.С., Вьюков М.Л., Кустов В.Л. Оптимальное значение начального трансмитанса фоторезиста.— *Электронная промышленность*, 1992, № 6, с. 27.
9. Боков Ю.С., Фролов В.М. Субмикронная литография с применением локального модифицирования поверхности пленок резистов.— *Электронная промышленность*, 1990, вып. 3, с. 23.
10. Roland B. Surface imaging techniques.— *Microelectronic Engineering*, 1991, vol. 13, p. 11.
11. Arnold W.H., Levins J.H. Focus: the critical psrsmeter for submicron optical lithography: part 2.— *SPIE*, vol. 772, Optical Microlithography VI, 1989, p. 21.
12. In Polymers for High Technology/E.Reichmanis, Novembre A.E. at al.— *ACS Symp. Ser. No 346, American Chem. Soc., Washington, D.C., 1987.*

13. Кустов В.Л., Пекарчук С.Б. Численное моделирование модификации поверхности функционального слоя при радиационно-стимулированном травлении.— *Электронная промышленность*, 1984, № 8, с. 32.

14. Кустов В.Л. Математическое моделирование субмикронной и нанотехнологий, раздел 2/Научно-технический отчет по НИР «Энергия-93», 1993, ГосНИИФП им. Ф.В.Лукина, Москва.

15. Kohler K., Hoepfner D.E., Soburg J.W., *J. Appl. Phys.*, 1985, vol. 58, N 9, p. 3350.

16. Gorbatkin S.M., Berry L.A., Roberto J.B. Behaviour of Ar plasmas formed in a mirror field ECR microwave ion source.— *J. Vac. Sci. Techn. A*, 1990, vol. 8, N 3, p. 2893—2899.

17. Pelletier J., *J. Phys. D.— Appl. Phys.*, vol. 20, 1987, p. 858.

18. Кустов В.Л., Пекарчук С.Б. Увеличение скорости плазмохимического травления радиационным стимулированием десорбции продуктов реакции.— *Письма в ЖТФ*, 1981, т. 7, № 4, с. 200.

19. Белый В.К., Гущин М.Б., Колсанов В.В., Кустов В.Л., Покровский В.В. Формирование высокоанизотропного профиля травления кремния в процессе РИТ.— Тезисы доклада «Труды конференции «Микроэлектроника-90», Минск, 1990, т. 3, с. 76.

20. Кустов В.Л., Покровский В.В., Цилибин Б.И. Процессы формирования трехмерных структур методами плазмохимического травления.— *Электронная промышленность*, 1985, вып. 6, с. 17.

21. Кустов В.Л., Максимов К.С. Приближенная аналитическая методика расчета концентрации окислителя в слое SiO<sub>2</sub> на рельефной поверхности.— *Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника*, 1990, вып. 1, с. 86.

22. Богомолов Н.И., Иванов Р.Д., Кустов В.Л., Редькин С.В. Формирование пленок двуокиси кремния в кислородсодержащей плазме СВЧ-разряда с использованием электронно-циклотронного резонанса.— *Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника*, 1992, вып. 4, с. 16.

23. Боков Ю.С., Борисов Б.С., Ракитин В.В., Самсонов Н.С. Тенденции развития технологии СБИС с субмикронными размерами элементов.— *Электронная промышленность*, 1990, № 11, с. 37.

24. Кустов В.Л., Пекарчук С.Б. Методы молекулярной динамики в технологических процессах микроэлектроники.— *Электронная промышленность*, 1984, № 9, с. 22.

25. Боков Ю.С., Вьюков М.Л., Кустов В.Л. Механизмы и предельные возможности фото- и плазмо-стимулированных процессов газофазной очистки п/п пластин.— *Электронная промышленность*, 1994, № 2.

26. Кустов В.Л., Пекарчук С.Б. Кинетика и механизмы анизотропии радиационно-стимулированного плазмохимического травления.— *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*, 1983, вып. 9, с. 52.

27. Кустов В.Л., Пекарчук С.Б. Кинетика реакций химического распыления твердых тел в активных газовых средах.— *Журнал физической химии*, 1983, № 12.

28. Kubo R. The Fluctuation — Dissipation Theorem.— *Report on Progress in Theoretical Physics*, 1966, vol. 29, p. 255.

29. Adelman S.A., Garris B.J. Generalized Langevin equation theory for gas/solid processes.— *J. Chem. Phys.*, 1976, vol. 65, N 9, p. 3751—3761.

30. Гладун А.Д., Жданова И.Н., Кустов В.Л. Стохастическая динамика полимерных молекул в вязкоупругой среде. Математические методы для исследования полимеров.— *ИЦ Биологических исследований, АН СССР, г. Пушкино*, 1983, с. 31.

31. Кустов В.Л. Численные и аналитические модели интенсивных электронных потоков/Канд. дис. МФТИ, Москва, 1977.

# Программное обеспечение для моделирования приборно- технологического базиса СБИС

В.В.РАКИТИН, Е.И.ФИЛИППОВ

Разработанный программный комплекс обеспечивает моделирование технологических процессов и электрических характеристик кремниевых ИС с минимальным топологическим размером до 0,1 мкм.

Современный уровень развития кремниевой микроэлектроники неразрывно связан с автоматизацией и оптимизацией процесса проектирования СБИС. Развитие современных комплексных САПР кремниевой технологии невозможно без соответствующего развития математического обеспечения приборно-технологического моделирования. Это развитие должно идти в направлении уточнения используемых физических моделей, разработки моделей новых и перспективных технологических процессов, создания более эффективных алгоритмов, значительно увеличивающих производительность, расширения сервисных возможностей (единое представление исходной информации, единая библиотека техпроцессов и приборных структур, интерактивная многооконная поддержка средств визуализации и т.д.).

В НИИФП создан программный комплекс для численного моделирования приборно-технологического базиса субмикронной кремниевой технологии. Результаты его верификации представлены на приборных структурах с минимальными топологическими размерами от 0,5 до 0,1 мкм. Данный комплекс включает в себя целый ряд программ приборно-технологического моделирования и обеспечивает следующие возможности:

- сквозное моделирование произвольных технологических маршрутов в одномерном приближении [1];
- сквозное моделирование основных технологических операций в двумерном приближении [2];
- статистическое моделирование технологии;
- сквозное численное моделирование стандартных приборных структур в двумерном приближении [3, 4];
- сквозное моделирование сложных планарных приборных структур с произвольным количеством контактов [5];
- сквозное моделирование непланарных приборных структур произвольной конфигурации [5];
- расчет тепловых полей в процессах быстрого термического отжига;
- расчет распределения внедренных ионов, радиационных дефектов и отраженных ионов при имплантации в монокристаллы;
- моделирование процесса формирования силицида [6];
- моделирование процессов формирования функциональных слоев методами химии высоких энергий [7].

Комплекс программ базируется на современных моделях технологических процессов, учитывающих тонкие эффекты. При моделировании ионной имплантации принимается во внимание влияние возникающего на поверхности аморфного слоя, а также явление каналирования, приводящее к возникновению экспоненциальных хвостов на концентрационных профилях. Программы моделирования процесса перераспределения примеси учитывают такие нелинейные эффекты, как зависимость коэффициента диффузии от концентрации примеси, кластерообразование, взаимовлияние примесей, изменение коэффициента диффузии и скорости окисления при быстрой фотонной обработке. Именно учет эффектов второго порядка позволяет уверенно моделировать базовые технологические маршруты субмикронной технологии.

В программах приборного моделирования также учитываются эффекты второго порядка, особенно важные при анализе приборов с субмикронными размерами. В частности, физические модели включают учет сужения запрещенной зоны полупроводника из-за сильного легирования, зависимость подвижности от концентрации легирующих примесей, температурные зависимости электрофизических параметров, деградационные эффекты, влияние паразитных сопротивлений областей стока и истока и ряд других. Все это позволяет не просто рассчитывать характеристики того или иного прибора, но и проводить физический анализ работы и исследовать, например, такие явления, как эффекты высокого уровня инжекции и эффект Ирли в биполярных транзисторах, температурные режимы, деградацию характеристик МОП-транзисторов, влияние его асимметричности и т.п.

Одной из наиболее важных проблем при создании программ моделирования приборно-технологического базиса оказывается проверка их адекватности и определение границ применимости как для отдельных процессов в широком диапазоне изменения технологических параметров, так и всей цепочки технологический маршрут — характеристики приборов. Проверка адекватности программного обеспечения представляет чрезвычайно трудоемкую задачу, включающую в себя, в частности, сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными и результатами других авторов.

В процессе разработки верификация описываемого программного комплекса проводилась на целом ряде приборных структур: *n*-МОП-транзистор с длиной канала по затвору 0,25 мкм, КМОП-транзисторы с топологической длиной затворов 0,1 мкм, КБиКМОП-структура с полумикронными размерами и, наконец, чувствительный к давлению *n*-МОП транзистор (баротранзистор).

Комплекс программ использовался при создании экспериментальных образцов четвертьмикронных *n*-ка-

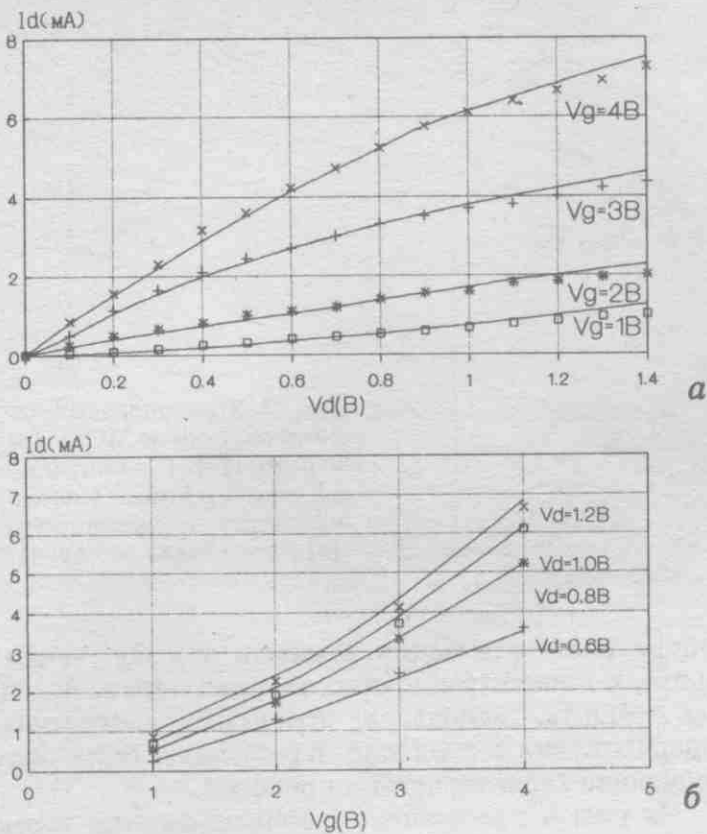


Рис. 1. Выходные характеристики  $I_d(V_d)$  (а) и передаточные характеристики  $I_d(V_g)$  (б)  $n$ -канального МОП-транзистора с длиной затвора 0,25 мкм. Сплошная линия — расчет, точки — эксперимент

нальных транзисторов. В процессе моделирования решались фактически две задачи: оптимизация технологического маршрута изготовления транзисторов и расчет их электрических характеристик для последующего сравнения с результатами измерений. Оптимизация маршрута осуществлялась на основе расчета профилей распределения примесей в активной области транзистора после проведения легирования и последующих термообработок. В качестве варьируемых параметров использовались доза и энергия имплантации, температурные режимы процессов термообработки. Критерием, по которому проводилась оптимизация, являлось получение минимального бокового ухода областей стока и истока под затвор при полной активации примеси и величине сопротивления легированного слоя 30–50 Ом/квдрат, а также воспроизведение порогового напряжения.

Об адекватности результатов моделирования электрофизических характеристик транзистора можно судить по сравнению экспериментальных и расчетных данных, представленных на рис. 1. Из него следует, что расхождение результатов моделирования и эксперимента не превышает 10–15% во всем диапазоне изменений рабочих напряжений. Принимая во внимание естественный разброс технологических параметров, следует признать, что электрические характеристики приборов с высокой степенью точности близки к расчетным. Это позволяет использовать данное программное обеспечение для моделирования схем с субмикронными МОП-транзисторами.

В описанном выше субмикронном МОП-транзисторе явно проявляются короткоканальные эффекты. Для их устранения требуется применять более прецизионную технологию так называемых слабелегированных каналов, которая к настоящему времени продемонстрирована уже на КМОП-транзисторах с длиной канала

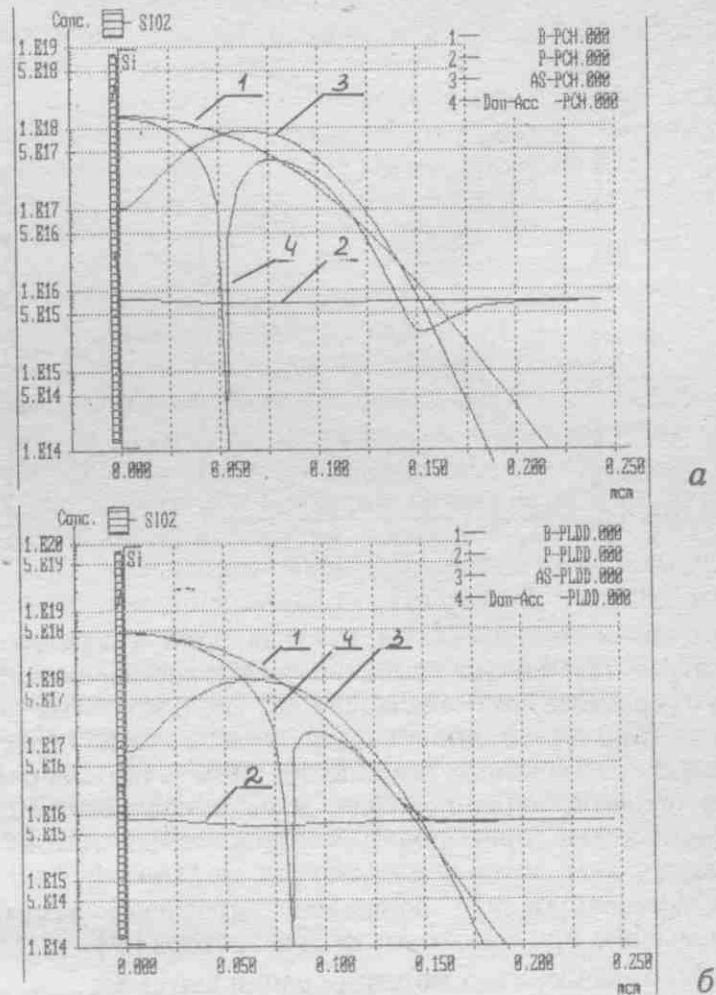


Рис. 2. Распределение примесей в  $p$ -МОП-транзисторе с  $L_d=0,1$  мкм: а — в области канала, б — в LDD-области

0,1 мкм [8]. Поскольку процесс переноса заряда в таких приборах имеет свои особенности, необходима тщательная проверка применимости имеющегося программного обеспечения к анализу подобных структур. Наличие в работе [8] описания технологического маршрута и характеристик приборов позволяет провести верификацию программ.

На основе приведенных данных был сделан расчет диффузионных профилей для ряда сечений сформированных структур (области каналов, стока/истока  $n$ - и  $p$ -канальных транзисторов) (рис. 2), с тем, чтобы получить совпадение глубин областей и максимальных концентраций примесей. Это позволило уточнить детали моделируемого технологического маршрута:

- исходная подложка —  $n$ -типа с концентрацией примеси  $7 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ;
- формирование карманов —  $\text{BF}_2^+$  с энергией 90 кэВ и дозой  $1,8 \text{ мкКл/см}^2$  для  $n$ -канального и  $\text{As}^+$  с энергией 120 кэВ и дозой  $1 \text{ мкКл/см}^2$  для  $p$ -канального приборов;
- подгонка порогов —  $\text{As}$  ( $E = 15 \text{ кэВ}$ ,  $D = 0,15 \text{ мкКл/см}^2$ )  $n$ -МОП;  $\text{BF}_2^+$  ( $E = 15 \text{ кэВ}$ ,  $D = 1,6 \text{ мкКл/см}^2$ )  $p$ -МОП;
- LDD-области —  $\text{As}^+$  ( $E = 25 \text{ кэВ}$ ,  $D = 5,5 \text{ мкКл/см}^2$ )  $n$ -МОП;  $\text{BF}_2^+$  ( $E = 8 \text{ кэВ}$ ,  $D = 3,5 \text{ мкКл/см}^2$ )  $p$ -МОП.

Аналогично [8], были заданы: топологическая длина затвора 100 нм, толщина подзатворного диэлектрика 4 нм; размер пристенка с учетом латеральной диффузии примесей 0,1 мкм.

Были промоделированы вольт-амперные характеристики транзисторов, из которых следует отсутствие короткоканальных эффектов, высокое значение крутизны ( $200 \text{ мкА/В}^2$ ), хорошее совпадение расчетного (0,5 В) и экспериментального (0,4 В) значений порогового на-

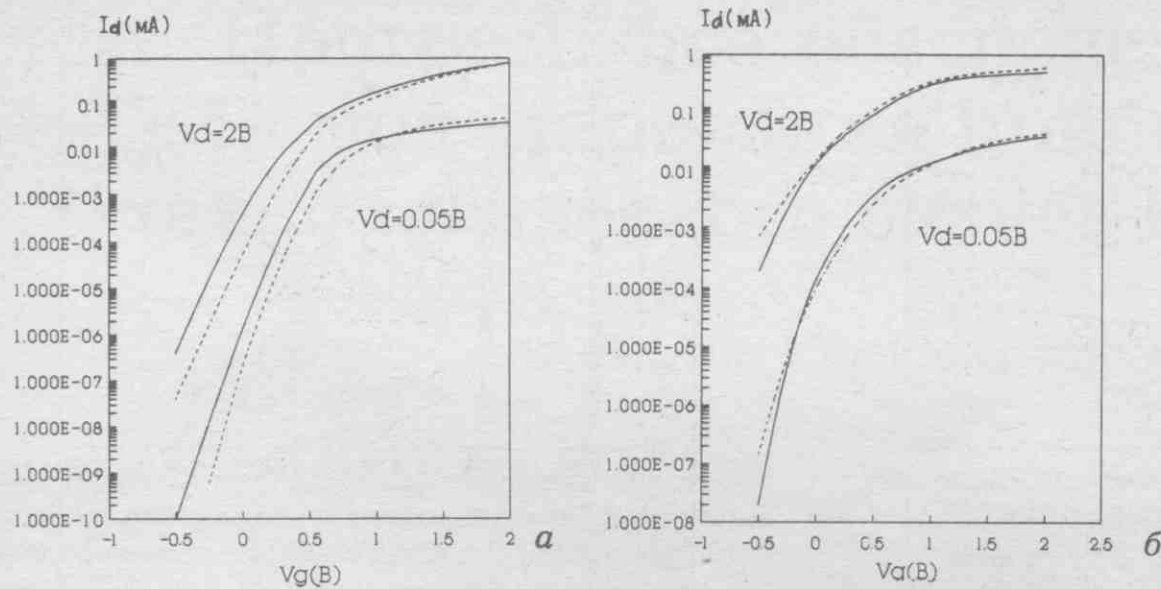


Рис. 3. Подпороговые характеристики  $n$ -МОП (а) и  $p$ -МОП (б) -транзистора с  $L_d = 0,1$  мкм. Сплошная линия — эксперимент [8], штриховая — расчет

пряжения как  $n$ -, так и  $p$ -канального транзисторов. Вместе с тем не все особенности поведения подобных структур адекватно описываются используемыми моделями. Так, для подпороговых характеристик (рис. 3) наблюдается хорошее совпадение расчета и эксперимента в области больших токов и заметное расхождение у  $n$ -канальных приборов для очень малых токов. Это связано с тем, что в применяемых моделях не учитывается туннелирование зона-зона, играющее заметную роль именно при малых токах транзистора [9].

Из проведенного моделирования вытекает:

- при тщательном выполнении некоторых критических операций, прежде всего при соответствующем подборе профилей легирования в канале и в LDD-области, можно реализовать  $n$ - и  $p$ -канальные МОП-транзисторы с высокими параметрами даже при длине затвора 100 нм;
- использованный программный комплекс позволяет вполне адекватно и достаточно быстро моделировать структуры с размерами 100 нм, хотя и требует внесения определенных уточнений для учета ряда тонких эффектов.

В настоящее время значительное внимание уделяется новому классу приборов, объединяющему комплементарные биполярные и МОП-транзисторы — КБиМОП-приборам. Обладая оптимальным сочетанием эксплуатационных характеристик, они налагают высокие требования как на технологию изготовления, так и на точность их моделирования. Проверка эффективности программного комплекса была проведена при расчете технологического маршрута и электрофизических характеристик полумикронных КБиМОП-элементов, описанных в работе [10].

Для изготовления приборов используется эпитаксиальная структура с толщиной эпи-слоя 1,6 мкм. В ней формируются  $n$ - и  $p$ -карманы, в которых создаются  $n$ - и  $p$ -канальные МОП-транзисторы, а также  $n-p-n$  и  $p-n-p$  вертикальные биполярные транзисторы. Для разделения элементов применяется щелевая изоляция, рабочий окисел толщиной 10 нм создается импульсной фотонной термообработкой в сухом кислороде.

Наиболее трудная задача при моделировании подобных структур — добиться одновременной оптимизации характеристик всех четырех типов приборов по таким параметрам, как пороговое напряжение, крутизна и последовательное сопротивление областей стока и истока для МОП-транзисторов, и коэффициент усиления по току, предельная частота  $F_t$  и сопротивление базы для биполярных транзисторов. Это требует тщательного

выбора технологических режимов для получения необходимых концентрационных распределений. Задачу удалось решить, используя программу статистического моделирования технологии. В результате были получены следующие характеристики приборов.

На рис. 4 представлены вольт-амперные характеристики вертикального  $n-p-n$  транзистора (площадь эмиттера  $0,5 \times 1,35$  мкм). Максимальная величина коэффициента усиления по току достигает 250 для  $n-p-n$  и 110 для  $p-n-p$ -транзисторов. Как видно из рис. 5, плато для него охватывает шесть порядков изменения тока коллектора. Максимальное значение предельной частоты  $F_t$  (рис. 6) составляет 14 ГГц у  $n-p-n$  и 3,3 ГГц у  $p-n-p$ -транзисторов.

У МОП-приборов эффективная длина канала равна 0,38 и 0,36 мкм для  $n$  и  $p$ -канальных транзисторов, а пороговое напряжение соответственно +0,6 и -0,6 В. Подпороговая крутизна равна 110 мВ/декада. Дальнейшая оптимизация технологических режимов позволит

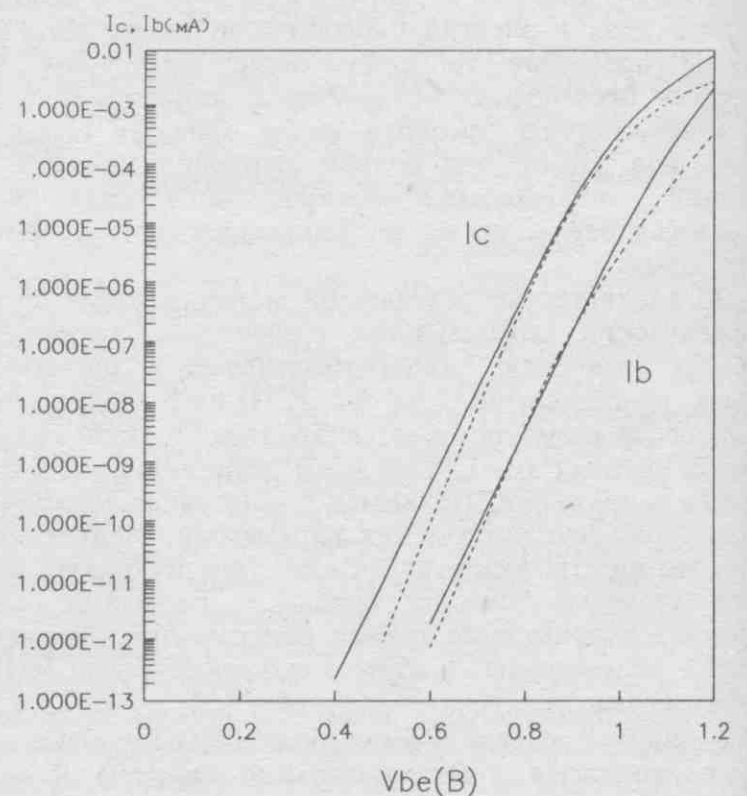


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики  $n-p-n$  транзистора. Сплошные линии — расчет, штриховые — эксперимент [8]

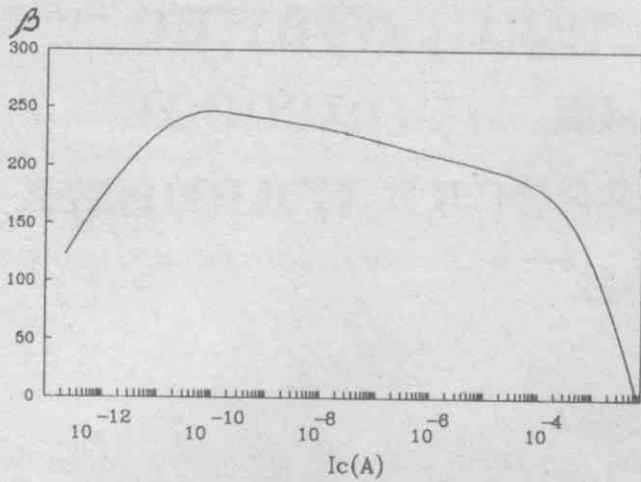


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления по току  $\beta$  от тока коллектора  $n-p-n$ -транзистора

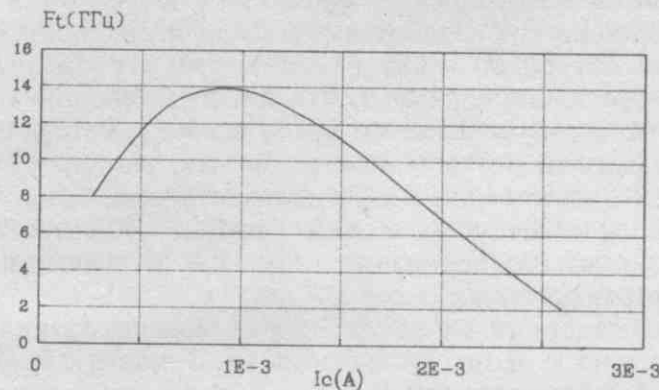


Рис. 6. Зависимость граничной частоты  $n-p-n$ -транзистора от тока коллектора

товления и конструкции элементов полумикронных КБиКМОП-структур.

Разработанное программное обеспечение может использоваться для решения широкого круга задач. В качестве примера взят расчет характеристик чувствительного элемента для микросенсоров давления и ускорения — так называемого баротранзистора. Он представляет собой чувствительный к давлению или ускорению МДП-транзистор, основной особенностью которого является наличие поднятой над областью канала мембраны, на которой расположен затвор. Изменение давления или ускорения вызывает деформацию мембраны и приводит к изменению порогового напряжения и, следовательно, тока через транзистор. На рис. 7 представлены схематическое изображение баротранзистора и его выходные характеристики.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что описанный программный комплекс позволяет эффективно и с приемлемыми временными затратами моделировать как технологию изготовления, так и электрофизические характеристики широкого класса кремниевых приборов с минимальными размерами до 0,1 мкм. Комплекс дает возможность проводить анализ и оптимизацию технологических маршрутов и конструкции современных приборных структур, решать нестандартные задачи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Василевская М.И., Големшток Г.М., Мороз В.А. и др. Диффузия элементов III и IV групп в кремнии—иерархия моделей, комплекс программ.— В сб.: Математическое моделирование физических процессов в полупроводниковых приборах.— Ярославль, 1990.
2. Големшток Г.М., Корчагина О.А., Парийская А.Е. и др. Инструментальная система поддержки решения задач микроэлектроники методом конечных элементов на IBM PC.— В сб.: Математическое моделирование физических процессов в полупроводниковых приборах.— Ярославль, 1990.
3. Макарычев Д.В., Миргородский Ю.Н., Тихомиров П.А. Расчет параметров поперечного сечения МОП-транзисторов.— В сб.: Математическое моделирование физических процессов в полупроводниковых приборах.— Ярославль, 1990.
4. Бубеников А.Н., Садовников А.Д. Физико-технологическое проектирование биполярных элементов кремниевых СБИС.— М.: Радио и связь, 1991.
5. Горбенко Н.И., Пензин О.Ю. ППП «ПЕГАС» для моделирования полупроводниковых приборов. Вычислительный эксперимент в задачах математической физики.— Новосибирск, ВЦ СО РАН, 1991.
6. Кашарин А.В., Махов Е.В., Филиппов Е.И. Моделирование кинетики образования силицида титана.— Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1992, вып. 2(147)—3(148), с. 65—67.
7. Горбадей П.Я., Филиппов Е.И. Моделирование величины связанного заряда на границе раздела Si—SiO<sub>2</sub> в процессах сухого окисления и отжига в технологии СБИС.— Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1992, вып. 4(149), с. 34—36.
8. Iwase M., Mizuno T., Takashi M. et al. High-performance 0.1 μm CMOS devices operating at room temperature.— IEEE Electr. Dev. Lett., 1993, vol. 14, N 2, p. 51
9. Endoh T., Shirota R., Monodomi M. et al. An accurate model of subbreakdown due to band-to-band tunneling and some applications.— IEEE Trans. Electron Devices., 1993, vol. ED-37, N 1, p. 209.
10. Sun S.W., Tsui P.G., Somero B.M. et al. A fully complementary BiCMOS technology for sub-half-micrometer microprocessor applications.— IEEE Trans. Electron Devices., 1992, vol. ED-39, N 12, p. 2733.

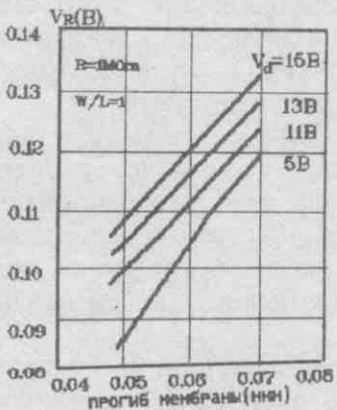
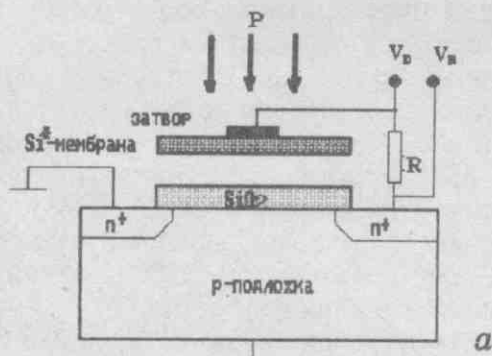


Рис. 7. Схематическое представление баротранзистора (а) и зависимость его выходного сигнала  $V_R$  от величины прогиба мембраны (б)

добиться улучшения электрофизических характеристик приборов, например предельной частоты. Отметим, что результаты моделирования КБиКМОП-структуры близки к экспериментальным данным, приведенным в работе [10]. Это позволяет утверждать, что данный программный комплекс является достаточно эффективным инструментом анализа и оптимизации технологии изго-

# Математическое моделирование фотолитографических процессов при применении фазосдвигающих шаблонов

А.В.НИКИТИН

На основе математического моделирования проекционных изображений исследованы предельные возможности миниатюризации при использовании фазосдвигающих шаблонов с прозрачным маскирующим покрытием. Показано, что в этих условиях могут быть устойчиво воспроизведены полосы шириной 120—140 нм и даже до 70 нм при переэкспозиции.

Методы математического моделирования зарекомендовали себя как эффективное средство исследования разнообразных явлений, в частности, явлений в оптических системах установок контактной и проекционной фотолитографии [1, 2], а также как средство оптимизации различных, в том числе фотолитографических процессов.

Качество фоторезистивной маски зависит от многих параметров, характеризующих источник излучения и конденсор, а также другие узлы установки экспонирования, свойства шаблона, характеристики резистивного слоя, режимы его экспонирования и проявления. К числу таких параметров относятся: интенсивность, спектральный состав и когерентность излучения, его однородность по полю модуля; размеры, форма и взаимное расположение элементов рисунка на шаблоне, его контраст и распределение фаз; масштаб переносимого изображения, числовая апертура объектива, номенклатура и уровень остаточных aberrаций, разрешение; общая и дифференциальная светочувствительность фоторезистивного слоя, его толщина, показатель преломления, коэффициент поглощения, контрастность проявления; отражающие свойства подложки; доза экспонирования, наличие и величина возможной расфокусировки; состав, концентрация, температура проявителя и время воздействия его на фоторезистивный слой.

Очевидно, что при таком числе влияющих параметров возможности традиционной эмпирической, основанной на натуральных экспериментах, оптимизации фотолитографических процессов следует признать весьма проблематичными. Более того, некоторые из указанных параметров при проведении отладочных экспериментов и в условиях промышленного производства не удается стабилизировать жестко; их значения претерпевают возмущения случайного характера, что порождает так называемые "технологические шумы". Поэтому оптимизация литографических процессов окажется действительно эффективной, если учитываются характер и уровень технологических шумов. И, наконец, на начальных этапах экспериментальной отработки новых литографических (и иных) процессов часто возникает ситуация, которую можно определить как "случайный успех". Единичный "случайный успех", который зачастую бывает следствием случайной удачной комбинации флуктуирующих параметров, побуждает искать их опти-

мальное сочетание вдали от истинного оптимума. Сказанное придает актуальность вопросу об устойчивости разрабатываемых процессов к имеющимся технологическим шумам, т.е. фактически об их пригодности для массового изготовления продукции в условиях промышленного производства. Решение этого вопроса на основе натуральных экспериментов требует проведения масштабных экспериментальных исследований, сопряженных со значительными временными и материальными затратами, поэтому можно сказать, что экспериментальная оптимизация новых фотолитографических процессов не имеет перспектив. Решение этой проблемы невозможно без привлечения методов математического моделирования.

Возможности математического моделирования применительно к процессу проекционной печати с применением фазосдвигающих шаблонов продемонстрированы в работе [3]. В этой работе предложен и обоснован количественный критерий устойчивости процесса и на ряде примеров показана продуктивность его использования для анализа практических возможностей метода. Установлена также определяющая роль уровня светового фона (рассеянного в оптическом тракте света), т.е. фактора, которому ранее не придавалось должного значения: эта величина и сегодня не нормируется, а установки проекционной печати как отечественного, так и зарубежного производства, не аттестуются по этому параметру. Наличие рассеянного света резко снижает устойчивость печати с фазосдвигающими шаблонами и, следовательно, саму возможность использования этого метода в промышленном производстве.

Ниже иллюстрируются возможности математического моделирования на примере исследований технологических возможностей проекционной печати с фазосдвигающими шаблонами, маскирующий слой которых частично прозрачен для актиничного излучения.

Среди публикаций, посвященных преимуществам фазосдвигающих или Ф-шаблонов появились работы, в которых затрагиваются вопросы прозрачности их маскирующих покрытий [5, 6]. Однако в известных публикациях эта проблема не рассмотрена столь подробно, чтобы можно было на их основе сделать какие-либо практические выводы.

В данной работе приводятся результаты исследования особенностей печати с Ф-шаблонами, маскирующий слой которых частично прозрачен для актиничного излучения. Анализ проводится на основе результатов имитационного моделирования проекционных изображений, по программам, описанным в работах [3, 4] и адаптированным применительно к прозрачности маскирующих покрытий. В расчетах для удобства сопоставлений с ранее полученными результатами [3, 7] принято, что используемая проекционная система (фотоповторитель) осуществляет перенос рисунка с



уменьшением; масштаб переноса 10:1, числовая апертура объектива  $A_0 = 0,42$ , длина волны света  $\lambda = 248$  нм (излучение KrF-лазера). Это не уменьшает общности выводов, поскольку при использовании иных условий проведения фотолитографического процесса (иных значений  $A_0$  и  $\lambda$ ) приводимые ниже числовые оценки минимальных размеров элементов следует просто домножить на коэффициент  $M$ , равный

$$M = \frac{\lambda^*}{A_0^*} \frac{\lambda_0}{A_0}$$

где  $A_0 = 0,42$  и  $\lambda_0 = 248$  нм — принятые выше «стандартные» значения апертуры и длины волны света;  $A_0^*$  и  $\lambda^*$  — величины, соответствующие интересующим нас условиям. Принято также, что когерентность светового потока полная, а оптическая система свободна от aberrаций и оптимально сфокусирована, но создает фоновую засветку резистивного слоя. Поправки, связанные с последним обстоятельством, подробно проанализированы в работе [3] и нет необходимости их воспроизводить.

В данной работе изучалась возможность воспроизведения изолированных полосок малой ширины с приемлемой устойчивостью процесса. Критерием устойчивости выбран параметр  $US$  (unsteadiness):

$$US = \frac{\Delta D}{D} \frac{\Delta H}{H},$$

где  $\Delta H$  — разброс экспозиционной дозы вокруг ее номинального значения  $H$ ;  $\Delta D$  — обусловленный разбросом экспозиции разброс размеров элементов вокруг номинального размера  $D$ .

Качество литографического оборудования и применяемых материалов, достижимая точность поддержания режимов проведения операций в совокупности характеризуют общий уровень технологии литографических процессов. Количественной характеристикой этого уровня может служить отношение  $\Delta H/H$ . Если принять, что для некоторых предприятий электронной промышленности  $\Delta H/H = 5\%$ , а допуск на размеры установлен в 10%, то условие устойчивости литографического процесса можно записать в виде:

$$US \leq 2,0.$$

В модельных расчетах для прозрачных Ф-шаблонов варьировались:

- ширина маскирующей полоски на шаблоне;
- контраст маскирующего покрытия  $K$ , определяемый как отношение интенсивности света, проходящего вне маскирующего покрытия, к интенсивности потока, ослабленного маскирующим слоем;
- начальный набег фазы  $a$  световой волны [1] на маскирующем покрытии;
- отклонение положения границы фазосдвигающего слоя от середины маскирующей полоски (параметр, несущественный для непрозрачных покрытий, но важный для прозрачных Ф-шаблонов);
- уровень фоновой засветки ( $N$ ) резистивного слоя в процентах от освещенности незатененных участков.

В расчетах принималось, что фазосдвигающий слой обеспечивает скачок фазы, равный  $\pi$ .

В каждом варианте расчета фиксировалась наименьшая ширина полоски  $D$  на фоторезистивном слое, отвечающая условию  $US < 2$ .

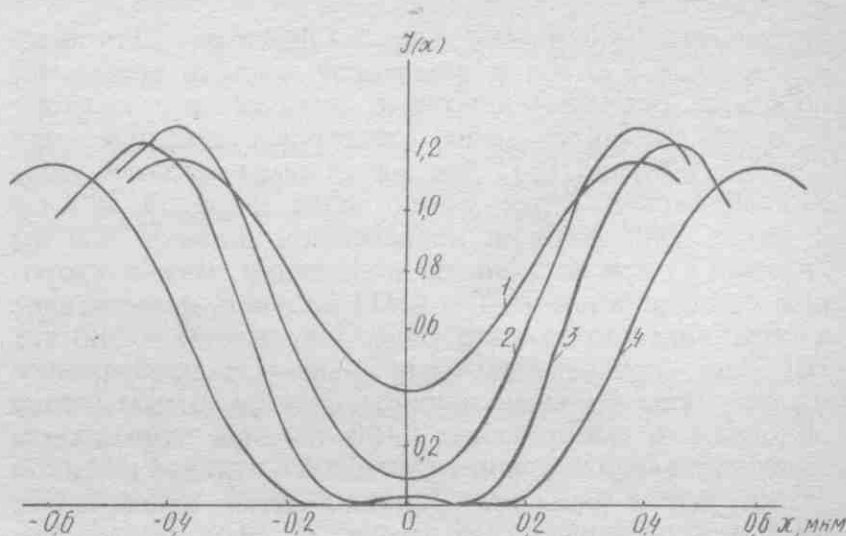


Рис. 1. Распределения интенсивности в изображении темных полосок в «стандартном» фотоповторителе с шаблонами обычного типа. Ширина полосок: 0,1; 0,2; 0,4; 0,6 мкм — кривые 1—4 соответственно

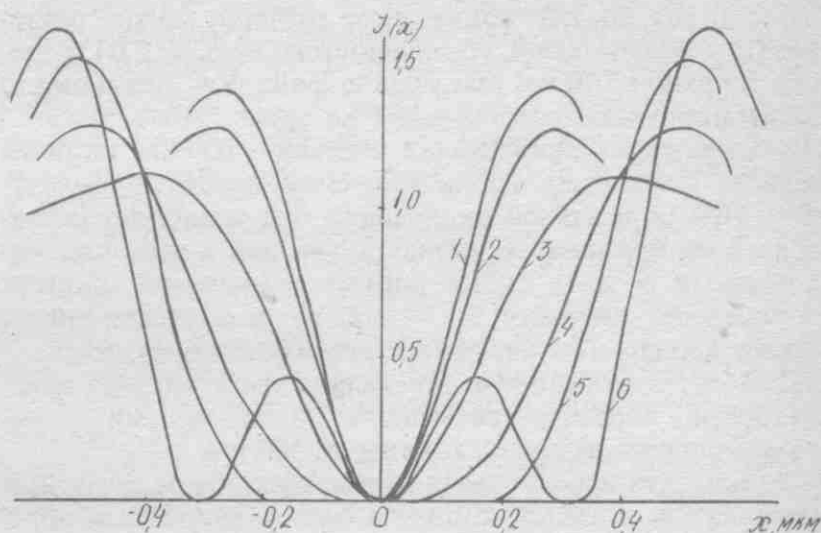


Рис. 2. Структура оптического изображения полосок различной ширины в «стандартном» фотоповторителе с прозрачными Ф-шаблонами. Номинальная ширина полосок: 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,6 мкм — кривые 1—6 соответственно

На рис. 1 представлены распределения интенсивности (РИ) в изображении одиночных темных полосок различной ширины, реализуемые в «стандартном» фотоповторителе с шаблоном обычной конструкции без фазосдвигающего покрытия. Видно, что в таких условиях и при нормальной экспозиции (отсечка РИ по уровню 0,25), могут быть устойчиво воспроизведены полоски шириной 400 нм и более, что примерно соответствует Рэлеевскому пределу разрешения ( $\delta = 350$  нм). Полоски с номинальной шириной 200 нм (кривая 3) также могут быть воспроизведены, но с заметным искажением размера (240 нм) и на пределе допустимой устойчивости ( $US = 2,0$ ). Меньшие размеры в этих условиях не могут быть реализованы.

На рис. 2 представлены аналогичные РИ для прозрачных Ф-шаблонов с прозрачностью маскирующего покрытия 50% и набегом фазы на нем  $a = \pi$ . Сравнение этих рисунков иллюстрирует особенности литографии с применением прозрачных Ф-шаблонов.

Как следует из рис. 1 и 2, главным отличием РИ для Ф-шаблонов оказывается наличие глубокого минимума освещенности в центре ( $x = 0$ ), где освещенность остается равной нулю вне зависимости от размера элемента на шаблоне, контраста маскирующего покрытия, началь-

ного набега фазы на нем и других факторов. Для полосок с  $D > 550$  нм в затененной области возникают побочные интерференционные максимумы, которые приводят к образованию повторных контуров или "двойного края" [1]. Эти максимумы исчезают лишь в изображении более узких полос шириной 400 нм и менее. Для полоски номинальной ширины 400 нм (кривая 4) при нормальной экспозиции можно с хорошей устойчивостью ( $US = 0,41$ ) получить качественное изображение, но заметно более широкое:  $D = 580$  нм. Наиболее привлекательными выглядят изображения полосок еще меньшей ширины, причем самым узким полоскам в изображении (120 нм при нормальном экспонировании) отвечает Ф-шаблон с нулевой шириной маскирующей полоски. Такой шаблон представляет вполне прозрачный транспарант со сформированным на нем фазосдвигающим слоем, границы которого — места фазового скачка — создают в изображении наиболее узкие темные линии.

Если использовать такой чисто фазовый шаблон и дополнительно увеличить экспозиционную дозу в 2,5–5,0 раз, то, как показывают расчеты, можно реализовать с приемлемой устойчивостью ( $US < 2,0$ ) полоски шириной 100 нм при уровне фона  $N = 10\%$  и около 70 нм при  $N = 5\%$ .

Структура изображения полоски 100 нм ширины вполне аналогична рассмотренному предельному случаю. При нормальной экспозиции она позволяет реализовать изображения с шириной 140 нм, а переэкспонирование и в этом случае допускает снижение ширины полоски до значений 70–100 нм в зависимости от уровня фона —  $N$  — без потери устойчивости процесса.

В свете сказанного для дальнейшего анализа целесообразно ограничиться малыми номинальными размерами полосок, не превосходящими 200 нм.

При пяти варьируемых параметрах объем расчетных материалов оказался слишком большим, чтобы отобразить все результаты на графиках или в таблицах. Поэтому ниже приводятся лишь краткие выводы из анализа полученных расчетных результатов.

1. Отклонение места фазового скачка от середины прозрачной маскирующей полоски приводит к асимметрии интерференционного минимума освещенности, смещению его центра, уменьшению глубины этого минимума и незначительному его расширению. Ни одно из этих обстоятельств не является желательным для реализации малых элементов, а поэтому граница фазосдвигающего слоя должна быть расположена как можно ближе к середине маскирующей полоски. По этим же причинам следует стремиться к тому, чтобы эта граница была бы прямолинейной (с минимально возможной неровностью края) и ориентированной параллельно краям маскирующей полоски.
2. Набег фазы на маскирующем покрытии незначительно влияет на предельные возможности миниатюризации; небольшие преимущества обеспечивают набег фазы  $\alpha = 0$ : при переэкспонировании  $D_{\min} = 63$  нм для  $\alpha = 0$  и  $D_{\min} = 68$  нм для  $\alpha = \pi$ .
3. Зависимость размера минимального, надежно воспроизводимого элемента  $D_{\min}$  от контраста маскирующего слоя при воспроизведении полоски шириной 100 нм столь же незначительна.

Естественно ожидать, что сформулированные выше выводы и числовые оценки останутся справедливыми,

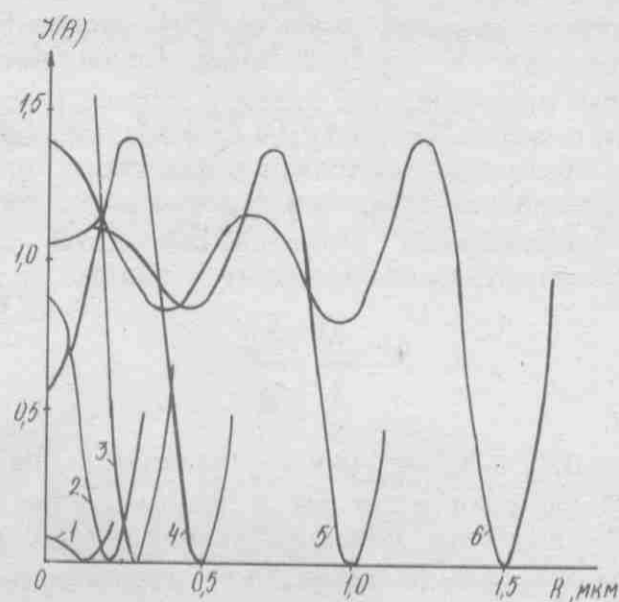


Рис. 3. Радиальное сечение осесимметричного распределения интенсивности в проекционном изображении круглого фазосдвигающего диска. Значения радиуса диска: 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1,0; 1,5 мкм — кривые 1–6 соответственно

если край фазосдвигающего слоя на шаблоне будет не прямой, но изогнутой линией, с не слишком малым радиусом скругления. Представляет интерес определить минимальное значение радиуса скругления  $R$ , обеспечивающего воспроизведение столь же узких, но криволинейных полосок без потери устойчивости.

Для определения допустимого значения  $R$  дополнительно проведены модельные расчеты распределений интенсивности или оптических профилей, реализующихся в изображении края круглого фазосдвигающего диска на прозрачной подложке — варианта, отвечающего шаблону с контрастом  $K = 1$  и  $\alpha = \pi$ . Результаты расчетов представлены на рис. 3. Видно, что пока радиус скругления не слишком мал, оптический профиль криволинейного края фазосдвигающего слоя остается неизменным, не зависящим от  $R$ , и идентичным профилю прямолинейного края. Изменения, связанные с кривизной, проявляются лишь при значениях  $R$ , меньших

Сравнение теоретических и экспериментальных значений предельного разрешения, реализуемого с металлизированными Ф-шаблонами в различных условиях

Числовая апертура объектива	Длина волны света, нм	Параметр когерентности, $\sigma$	Доза экспозиции	Теор. предел разреш., нм	Экспер. предел разреш., нм	Источник информации
0,42	365	0,5	n	235	220	[8]
0,42	365	0,5	2n	141	148	[8]
0,42	248	0	n	160	170	[7]
0,45	365	0,5	n	220	230	[6]
0,65	365	0,5	n	152	200	[6]
0,65	365	0,3	n	152	180	[6]

n — нормальная доза экспонирования.

200 нм (в масштабе рисунка на резистивном слое). Эти изменения выражаются в смещении интерференционного минимума освещенности и возрастании его ширины.

Таким образом, прозрачность Ф-шаблонов не препятствует реализации полосок малой ширины; более того, при правильной организации процесса могут быть устойчиво воспроизведены полоски шириной около 120 нм. Если же использовать приемы переэкспонирования, то граница малых, но устойчиво воспроизводимых полосок может быть сдвинута до значений, близких к 70 нм. Таким путем могут быть получены как прямые, так и изогнутые линии, если радиус их изгиба превышает 200 нанометров.

Приведенные в статье числовые оценки играют роль физических пределов. Практически достижимые результаты, конечно же, могут оказаться несколько скромнее — из-за влияния неполной когерентности света, погрешностей фокусировки, наличия вибраций установки и других причин. Впрочем, результаты экспериментов, проведенных зарубежными авторами, согласуются с теоретическими оценками, выполненными нами на основе имитационного моделирования, как это следует из таблицы.

Имеющиеся в таблице незначительные расхождения, измеряемые десятками нанометров, — строки 1, 5, 6 — очевидно, обусловлены тем, что в экспериментальных работах не использован критерий устойчивости  $US$  и потому получение полосок шириной меньше и больше теоретического предела, является в значительной мере делом случая. Кроме того, при больших числовых апертурах объектива (строки 5 и 6 таблицы) сказывается недостаточная когерентность светового потока, приводящая к расхождениям с теоретическими оценками. Эти расхождения, естественно, возрастают по мере увеличения значений параметра когерентности  $\sigma$ : 28 нм

для  $\sigma = 0,3$  и 48 нм для  $\sigma = 0,5$ . В целом соответствие расчетных и экспериментальных результатов следует признать удовлетворительным, что придает достоверность и тем числовым оценкам предельного разрешения, которые получены в настоящей работе для Ф-шаблонов с прозрачным маскирующим покрытием.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Березин Г.Н., Никитин А.В., Сурис Р.А. Оптические основы контактной фотолитографии. — М., Радио и связь, 1982, 104 с.
2. Никитин А.В., Никитина М.А., Сурис Р.А. Формирование изображения оптической системой в проекционной фотолитографии. — Электронная промышленность, 1980, вып. 5, с. 27—32.
3. Фотолитография на пути к разрешению в 100 нанометров/С.Н.Залуцкий, А.В.Никитин, В.В.Мартынов, Е.В.Уманцева. — Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1992, вып. 1, с. 15—20.
4. Никитин А.В., Уманцева Е.В. Особенности формирования рисунка с использованием амплитудно-фазовых шаблонов в проекционной фотолитографии. — Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1989, вып. 1, с. 44—48.
5. Simulation Study on Phase-Shifting Mask for Isolated Patterns./S.Inoue, Y.Tanaka, T.Sato, S.Tamamushi and M.Nakase. — Jap. Journ. of Appl. Phys., V 30, N 11B, 1991, p. 3010—3015.
6. Pattern Transfer Characteristics of Transparent Phase Shifting Mask./H.Watanabe, E.Sugiura, Y.Todokoro and M.Inoue. — Jap. Journ. of Appl. Phys., V 30, N 11B, 1991, p. 3004—3009.
7. New Approach to Limit and Advanced Image Formation Techniques in Optical Lithography/H.Fukuda, A.Imai, T.Terasawa and S.Osazaki. — IEEE Trans. on Electron Devices, V 38, N 1, 1991, p. 67—75.
8. Jinbo H., Yamashita Y. Improvement of Phase-Shifter Edge Line Mask Method. — Jap. Journ. of Appl. Phys., V 30, N 11B, 1991, p. 2998—3003.

## Подход к моделированию процесса рентгенолитографии в пучках синхротронного излучения

С.Н.МАЗУРЕНКО, В.В.МАНУЙЛОВ, В.М.МАТВЕЕВ

Учет комплекса факторов, характеризующих особенности рентгеновского излучения, позволяет осуществить количественный расчет процесса рентгенолитографии.

Рентгенолитография (РЛ) является естественным логическим продолжением контактной оптической литографии: скрытое изображение в резисте получается путем теневого проецирования рисунка с шаблона на

рабочую пластину в масштабе 1:1. Формально различие между РЛ и фотолитографией состоит только в длине волны экспонирующего излучения: в РЛ она на два порядка меньше. Однако это количественное различие приводит к существенным качественным отличиям.

Реализация РЛ сложнее, чем фотолитографии. Во-первых, в рентгеновской области спектра различие в прозрачности материалов не так велико, как в оптическом диапазоне. Поэтому до сих пор не существует

материалов, которые при достаточной (для требуемой механической прочности) толщине были бы прозрачны для рентгеновского излучения, и в то же время нет и таких материалов, которые полностью поглощали бы излучение в очень тонких слоях. Во-вторых, в настоящее время для рентгеновского излучения отсутствуют эффективные оптические системы. Отсюда следует, что для промышленного внедрения РЛ нужно полностью изменить технологию изготовления шаблонов. Мембраны рентгеношаблонов должны быть достаточно тонкими, с высокой рентгеновской прозрачностью, в то же время маскирующие слои должны иметь достаточную толщину для обеспечения приемлемого контраста. Нужны также механически прочные, но тонкие вакуумные окна. Необходимо разработать и соответствующие рентгенорезисты. Кроме того, спектральное распределение и геометрические характеристики экспонирующего излучения, используемого в РЛ, практически полностью определяются параметрами используемых источников и систем (каналов) вывода излучения. В частности, большую роль играет степень коллимации излучения источника.

Интервал рабочих длин волн в РЛ определяется главным образом рентгеновской прозрачностью материалов рентгеношаблонов, вакуумных окон и рентгенорезистов в различных участках рентгеновского диапазона. Адекватную характеристику максимального рабочего интервала длин волн дает функция спектральной эффективности рентгенорезиста [1], характеризующая эффективность поглощения экспонирующего излучения с длиной волны  $\lambda$  в резисте на границе резист-подложка:

$$F(\lambda) = K(\lambda)\mu_p(\lambda), \quad (1)$$

где  $K(\lambda)$  — коэффициент пропускания излучения всеми элементами канала;  $\mu(\lambda)$  — коэффициент поглощения излучения материалом используемого рентгенорезиста. Спектральная эффективность типичного рентгенорезиста резко падает при  $\lambda < 0,2$  нм (излучение практически не поглощается в резисте) и  $\lambda > 1,5$  нм (все излучение практически полностью поглощается в элементах канала). Максимум функции  $F(\lambda)$  соответствует оптимальным длинам волн экспонирующего излучения. Таким образом, в РЛ необходимо использовать мягкое рентгеновское излучение 0,2–1,5 нм.

Благодаря уникальным свойствам СИ источники этого излучения — накопители электронов или накопительные кольца — наиболее полно удовлетворяют требованиям, предъявляемым к источникам рентгеновского излучения для РЛ, что делает их наиболее перспективным инструментом для проведения рентгенолитографического процесса. Все параметры СИ связаны с параметрами источника, моделируются и достаточно точно рассчитываются. Возможность простого и точного управления характеристиками СИ позволяет формализовать процесс РЛ и полностью его автоматизировать. СИ обладает широким сплошным спектром, легко перестраиваемым на тот спектральный интервал, где наиболее высока эффективность литографического экспонирования. Мощность СИ намного превосходит среднюю мощность излучения всех других рентгеновских источников, что позволяет реализовать на СИ высокопроизводительный рентгенолитографический процесс. Размеры излучающего сгустка электронов в накопителе и угловая расходимость пучка СИ исключительно малы. В со-

четании с большим расстоянием от источника до рабочей пластины это обеспечивает практически полное отсутствие геометрических искажений рисунка рентгеношаблона и полутеневых эффектов. Временная однородность СИ в реальном времени процесса экспонирования обуславливает равновесность тепловых нагрузок на рентгеношаблон и малость температурных уходов размеров элементов рентгеношаблона.

#### Физические процессы, определяющие потенциальные возможности рентгенолитографии в пучках СИ

Рентгенолитография с применением СИ — это многофакторный технологический процесс, в котором важную роль играют параметры многих компонентов литографической системы: источника СИ, канала вывода СИ, рентгеношаблона, рентгенорезиста. Для целенаправленного быстрого выбора рабочих параметров литографической системы, обеспечивающих реализацию требуемых характеристик резистивной маски, необходимо иметь физическую модель процесса рентгенолитографии, адекватно описывающую весь процесс, начиная с экспонирования рентгенорезиста и кончая формированием резистивной маски в проявителе, и соответствующую математическую реализацию этой модели. Возможность построения адекватной формализации процесса базируется на рассчитанных с высокой точностью характеристиках СИ. Такая модель (реализованная в виде комплекта прикладных программ) позволяет оценить потенциальные возможности рассматриваемого литографического метода.

В РЛ разрешение определяется, с одной стороны, волновой природой рентгеновского излучения (дифракционные искажения), с другой стороны, нелокальным характером формирования реального скрытого изображения (генерация фото- и оже-электронов рентгеновскими фотонами и вторичное экспонирование резиста этими электронами). Кроме того, реальное технологическое разрешение очень сильно зависит от процесса проявления полученного скрытого изображения.

Дифракционные искажения в РЛ ( $\lambda \approx 1$  нм) должны быть, по крайней мере, на порядок меньше, чем в контактной фотолитографии ( $\lambda \approx 10^2$  нм), так как эти искажения пропорциональны  $\lambda^{1/2}$ . Но поскольку РЛ рассматривается как метод формирования микроструктур с размерами элементов до 0,1 мкм, необходима достаточно строгая оценка этих эффектов. Одно из важных преимуществ РЛ в пучках СИ по сравнению с использованием излучения точечных источников — относительно широкий спектр экспонирующего излучения, обуславливающий значительное уменьшение дифракционных искажений. Конкретный механизм формирования скрытого изображения в резисте в процессе рентгенолитографического экспонирования характеризуется неизбирательностью воздействия высокоэнергетических рентгеновских фотонов на химические связи в материале резиста. Экспонирующие рентгеновские фотоны обладают энергиями 0,5–5 кэВ, значительно превосходящими энергии химических связей ( $\approx 5$  эВ), и резист фактически экспонируется вторичными фото- и оже-электронами, возникающими при поглощении этих фотонов атомами материала резиста. В этом отношении РЛ близка к электронно-лучевой литографии и нужно принимать во внимание "уход" электронов от точки поглощения фотонов (эффект близости).

Дифракционные эффекты сильнее проявляются на верхней границе спектра экспонирующего излучения (т.е. излучения, непосредственно падающего на рентгенорезист), а эффекты пробега электронов — на нижней.

Дифракционные распределения интенсивности излучения после прохождения рентгеношаблона в РЛ можно рассчитывать, используя стандартную теорию френелевской дифракции [2]. В отличие от фотолитографии, в некоторых случаях (для тонких маскирующих покрытий) заметную роль могут играть фазовые эффекты (набег фазы волны на толщине маскирующего покрытия), приводящие к неприемлемым распределениям интенсивности при репродуцировании элементов с субмикронными размерами [3, 4]. Естественно, что в РЛ с применением СИ необходимо учитывать конкретный спектр излучения, падающего на рентгеношаблон.

### Экспонирование резиста вторичными электронами в рентгенолитографии

Процесс рентгеновского экспонирования резиста можно разбить на три относительно независимых подпроцесса: поглощение рентгеновских квантов в материале резиста; генерация фото- и оже-электронов атомами резиста в каждом конкретном акте поглощения рентгеновского кванта; движение возникающих электронов в материале резиста с передачей их энергии атомам и деструкцией полимерных связей (т.е. реальным экспонированием).

Все три подпроцесса являются вероятностными процессами и в качестве математической основы для их формализации и моделирования лучше всего использовать метод Монте-Карло.

Движение каждого отдельного электрона, испущенного атомом при поглощении рентгеновского кванта, моделируется (как отображение реального процесса) следующим образом. Траектория электрона представляется в виде ломаной, состоящей из отрезков случайной длины  $\Delta l_i$  и случайного направления  $\Theta_i, \Phi_i$ . Закон распределения случайных величин  $\Theta_i, \Phi_i$  определяется законом упругого взаимодействия электронов с атомами; точки сопряжения отрезков — это точки, где электрон испытывает упругое рассеяние.

Между двумя последовательными упругими столкновениями с атомами электрон движется по прямой и теряет энергию квазинепрерывным образом за счет неупругих взаимодействий. Каждый отрезок ломаной разбивается, как правило, на малые отрезки случайной длины  $\Delta l_j$  с распределением, определяемым законом неупругого взаимодействия электронов; в конечной точке каждого такого отрезка электрон теряет некоторую энергию  $\Delta E_j$ .

Такая "геометрия" движения электрона соответствует хорошо известным фактам, что углы рассеяния электронов при неупругих взаимодействиях ничтожно малы по сравнению с углами упругого рассеяния и что в широком диапазоне энергий  $\Delta L_{cp} \gg \Delta l_{cp}$  [5].

Закон упругих взаимодействий электронов с атомами резиста описывается формулой Резерфорда, определяющей дифференциальное сечение рассеяния электрона на кулоновском потенциале с учетом экранировки. Случайная длина отрезка траектории электрона между двумя последовательными актами упругого рассеяния определяется через среднюю длину свободного пробега.

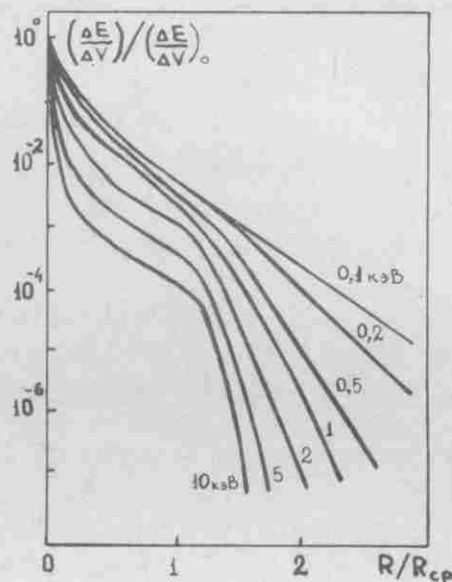


Рис. 1. Профили энергетических потерь электронов в области вторичного экспонирования для точечного источника электронов при  $E_0=10; 5; 2; 1; 0,5; 0,2; 0,1$  кэВ (кривые 1—7)

В отличие от обычно используемой при описании энергетических потерь электронов известной формулы Бете [6], неупругие взаимодействия в рентгенолитографии нужно рассматривать в обобщенной модели электронного газа [7—9]. Это связано с тем, что формула Бете была получена при построении теории ионизационных потерь и хорошо работает при энергиях электронов  $\geq 10$  кэВ (например, в случае электронно-лучевой литографии). В РЛ используются кванты с энергиями  $\leq 5$  кэВ, а генерируемые электроны обладают еще меньшими энергиями (вычитается энергия связи). Как показано в работах [7—9], при таких энергиях основную роль играют неупругие взаимодействия фото- и оже-электронов с валентными электронами материала, а потери на ионизацию в 10—100 раз меньше.

На такой основе можно разработать программу расчета движения и энергетических потерь электронов в ПММА, моделирующую реальный процесс. Результаты расчетов по данной программе представлены на рис. 1, где показаны плотности отложенной энергии  $(dE/dV)_0$  в самой ближайшей окрестности точки генерации (формально при  $r=0$ ) как функция  $E_0$ .

Величина пробега электронов в материале резиста  $R_{cp}$  не является адекватной характеристикой рентгенолитографического разрешения, связанного с генерацией вторичных фото- и оже-электронов (т.е. "размытия" точки поглощения рентгеновского фотона). Поскольку важен уровень энергетического воздействия электронов на резист, за величину разрешения  $\delta$  следует принять расстояние от точки генерации электронов до точки, в котором плотность отложенной энергии составляет некоторую малую долю, например 1/100 от ее значения  $(\Delta E/\Delta V)_0$  в самой точке генерации (на последнюю величину нормируются кривые на рис. 2). При таком определении значение параметра  $\delta$  может быть значительно меньше  $R_{cp}$ , особенно для электронов с достаточно большой начальной энергией. Так, при  $E_0 = 10$  кэВ получаем  $R_{cp} = 1,67$  мкм, тогда как  $\delta = 0,16$  мкм.

Теперь можно перейти к численному моделированию процесса рентгенолитографии, принимая во внимание, что распределение энергии в скрытом изображении конкретного топологического элемента репродуцируе-

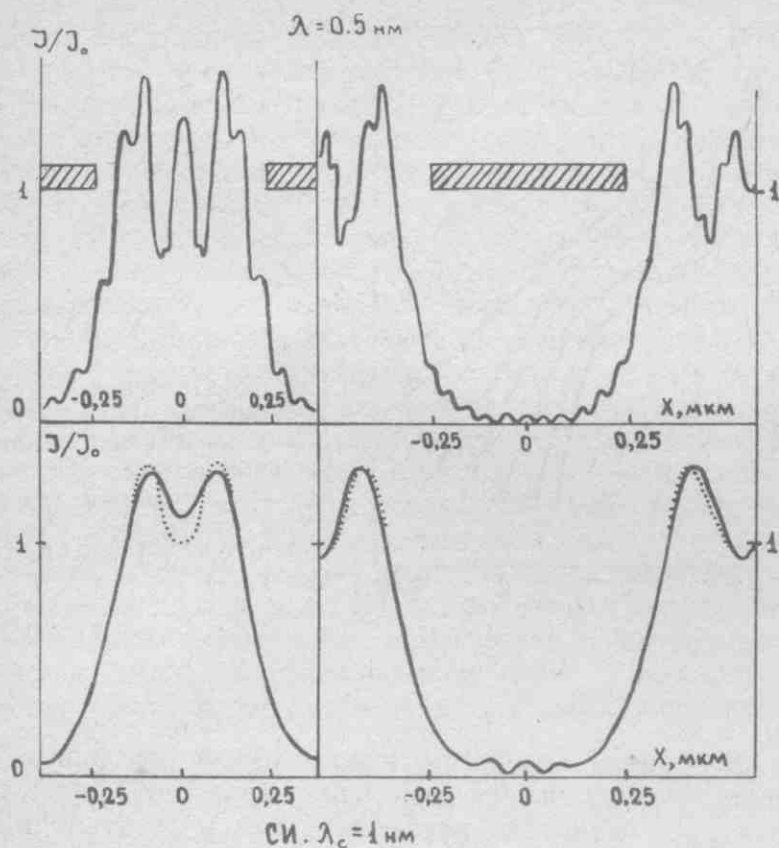


Рис. 2. Распределение плотности поглощенной энергии в пленке ПММА толщиной 1 мкм при экспонировании темной и светлой полосок шириной 0,5 мкм монохроматическим рентгеновским излучением с  $\lambda=0,5$  мкм (а) и синхротронным излучением с  $\lambda_{кр}=1$  нм с использованием стандартного литографического канала. Зазор — 50 мкм, толщина маскирующего покрытия (Au) — 0,8 мкм

мой структуры рентгеношаблона представляет собой свертку полученной функции близости для фотонного пучка с дифракционным распределением интенсивности. Эффект сглаживания осцилляций важен для РЛ с применением СИ, поскольку в спектре СИ всегда присутствуют коротковолновые компоненты, слабо поглощающиеся в элементах литографического канала.

При разработке модели жидкостного проявления были использованы два опытных факта:

— локальная скорость проявления (растворения) зависит от локально поглощенной дозы экспонирующего излучения, как  $D^a$ , где  $a$  — показатель контраста пары резист-проявитель;

— в тонких слоях резиста ( $\sim 1$  мкм) величина поглощенной дозы практически не зависит от глубины. В этом случае фронт проявления распространяется в резисте подобно световому фронту в оптически неоднородной среде и легко рассчитывается [10].

Уникальные свойства синхротронного излучения релятивистских электронов позволяют обеспечить качественный скачок в технологии микролитографии. СИ существенно упрощает технологию формирования резистивных масок и улучшает качество последних. Рентгенолитография в пучках СИ — наиболее перспективный литографический метод для создания микроэлектронных функциональных структур с размерами элементов менее 0,5 мкм. Программы разработки и промышленного внедрения этого литографического метода являются важнейшими составляющими научно-технического прогресса в области микротехнологии. Внедрение этого

технологического метода имеет важное значение и в экономическом аспекте, поскольку по оценкам специалистов рентгенолитография в пучках СИ с использованием компактных источников по стоимостным характеристикам оказывается дешевле фотолитографии и существенно дешевле по сравнению с другими рентгенолитографическими методами. Большое значение при этом имеют развитые математические модели и программное обеспечение, позволяющие существенно упростить и удешевить процессы отработки и внедрения этого технологии рентгенолитографии в пучках СИ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мазуренко С.Н., Мануйлов В.В., Матвеев В.М. Потенциальные возможности рентгенолитографии в пучках синхротронного излучения. — Электронная промышленность, 1989, № 3, с. 36—39.
2. Каули Дж. Физика дифракции. — М.: Мир, 1979, с. 30, 31.
3. Redaelli R., Tatchin R., Pianetta P. Fresnel phase effects for X-ray microlithography, SPIE, 1986, vol. 623, — p. 638.
4. Мазуренко С.Н., Мануйлов В.В., Матвеев В.М. Влияние параметров шаблона на формирование резистивной маски в рентгенолитографии с применением синхротронного излучения. — Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1990, № 1, с. 84—86.
5. Спектроскопия и дифракция электронов при исследовании поверхности твердых тел./Под ред. Рамбиди Н.Г.— М.: Наука, 1985, с. 112.
6. Murata K. Theoretical studies of the electron scattering effect on developed pattern profiles in X-ray lithography. — J. Appl. Phys., 1985, vol. 57, p. 575—580.
7. Calculation of mean free paths and stopping powers of low energy electrons ( $<10$  keV) in solids using a statistical model/J.C.Ashley, C.J.Tung, R.H.Ritchie, V.E.Anderson.— IEEE Trans. Nucl. Sci., 1976, vol. 23, N 6, p. 1833—1837.
8. Ashley J.C., Tung C.J., Ritchie R.H. Inelastic interactions of electrons with polystyrene calculations of mean free paths, stopping powers and CSDA ranges.— IEEE Trans. Nucl. Sci., 1978, vol. 25, p. 1566—1570.
9. Ashley J.C. Inelastic interactions of low-energy electron with organic solids; simple formula for mean free paths and stopping powers.— IEEE Trans. Nucl. Sci., 1980, vol. 27, N 6, p. 1454—1458.
10. Лаврук В.Н., Мануйлов В.В., Матвеев В.М. Модели проявления рентгенорезистов.— Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1991, № 1, с. 35—38.

**РАЗВИТИЕ ВЫСОКОТОЧНЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ, СОЗДАНИЕ ДЛЯ ЭТИХ ЦЕЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ И ПРИЕМОМ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ — НЕОБХОДИМЫЕ КОМПОНЕНТЫ В ПРОВЕДЕНИИ ДОСТОВЕРНОГО ПРЕЦИЗИОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.**

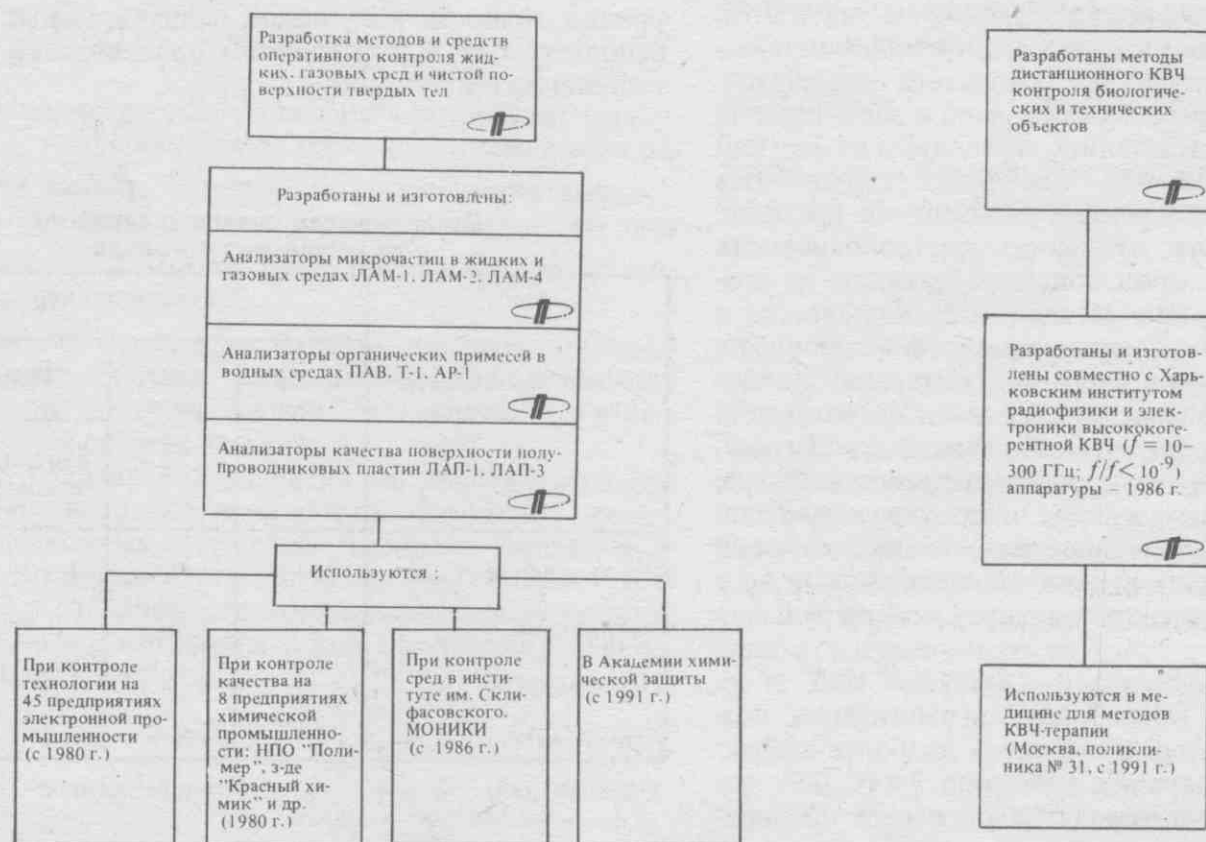
**ФОРМИРОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ПРИКЛАДНОЙ МЕТРОЛОГИИ И КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ, АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ДОСТИЖЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНО ВЫСОКИХ УРОВНЕЙ ТОЧНОСТИ ЯВЛЯЮТСЯ ОДНИМ ИЗ ГЛАВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ В ЭТОЙ РАБОТЕ.**

**ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ ТОПОЛОГИИ В СУБМИКРОННОЙ ОБЛАСТИ ПРОВЕДЕНЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТАНЫ ОРИГИНАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ.**

**ИССЛЕДОВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ МИКРООБЪЕКТОВ НА АТОМАРНО-МОЛЕКУЛЯРНОМ УРОВНЕ ПРОВОДЯТСЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКАНИРУЮЩИХ ТУННЕЛЬНЫХ И АТОМНО-СИЛОВЫХ МИКРОСКОПОВ НОВЫХ, РАЗРАБОТАННЫХ В ИНСТИТУТЕ, КОНСТРУКЦИЙ. СОВМЕСТНО С ИОФАНом СКОНСТРУИРОВАН ОПТИЧЕСКИЙ ГЕТЕРОДИННЫЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МИКРОСКОП, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ РЕЛЬЕФА СТРУКТУР С ТОЧНОСТЬЮ ДО 1 НМ ПРИ ЛАТЕРАЛЬНОМ РАЗРЕШЕНИИ ОКОЛО 0,3 МКМ.**

**МНОГОЛЕТНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД ПРИВЕЛИ К РАЗРАБОТКЕ И ВЫПУСКУ ЛАЗЕРНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ МИКРОЧАСТИЦ, ОРГАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ, КОНТРОЛЯ МИКРООРГАНИЗМОВ, ДЕФЕКТНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН. РАЗРАБОТАННЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ ОБЛАДАЮТ МНОГИМИ БОЛЕЕ ВЫСОКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ПО СРАВНЕНИЮ С ИЗВЕСТНЫМИ ЗАРУБЕЖНЫМИ ПРИБОРАМИ АНАЛОГИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ.**

**ОРИГИНАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛУЧЕНЫ В ХОДЕ РАЗРАБОТКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ И АНАЛИТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ НА ИХ ОСНОВЕ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА. СОЗДАНЫ ПРИБОРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВОДОРОДА В ВОЗДУХЕ, СЕНСОРЫ, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ К РАЗЛИЧНЫМ ГАЗАМ, ТИПА «ИСКУССТВЕННЫЙ НОС» И Т.П. РАЗРАБОТАННЫЕ В ИНСТИТУТЕ МЕТОДИКИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСА УНИКАЛЬНЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ, ОБЛАДАЮЩИХ СВЕРХВЫСОКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ И РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ, ПОЗВОЛЯЮТ ПРОВОДИТЬ ВЫСОКОТОЧНЫЕ АНАЛИЗЫ СОСТАВА ВЕЩЕСТВ, ПРИМЕСЕЙ И ХОДА РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ, ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ.**



# Систематизация и направления развития прикладной метрологии в электронике

В.Н.СРЕТЕНСКИЙ

Метрология как область науки и техники оказывает решающее влияние на достоверность результатов научных исследований, развитие высоких технологий и экономику производства.

**Недостаточность основных понятий метрологии.** Характерным для развития физической и технической ветвей электроники является экспоненциальный рост объема разнообразной информации. Эта закономерность возникла в результате все возрастающего многообразия используемых физических явлений в различных средах, большого количества физико-химических операций в технологических процессах, усложняющихся функций и возрастающих масштабов производства изделий электронной техники (ИЭТ). При этом потребовалось получение достоверной информации в ограниченные промежутки времени и при приемлемых экономических затратах.

Методами и средствами обеспечения единства, достоверности и точности количественной информации занимается прикладная метрология, которая в электронной индустрии развивается синхронно, а в ряде случаев и с упреждением непрерывно обновляемой технической электроникой.

Систематизация понятий прикладной метрологии основывается на двух категориях познавательных операций: восприятия (идентификации) и воспроизведения. При этом под познавательными операциями понимаются логические, экспериментальные и вычислительные действия, направленные на определение свойств материальных объектов и процессов.

Традиционное сведение метрологии к науке об измерениях [1], как показывает анализ информационных технологий в электронике, оказалось недостаточным. Действительно, средства измерений в электронном производстве резко усложнились, процедуры измерений стали весьма трудоемкими, особенно затруднилось получение информации в реальном масштабе времени. В результате возросла стоимость метрологических операций измерений в производстве. Выходом из создавшегося положения, как детально обосновывается в работах [2, 3], может служить рациональное использование всех познавательных операций: измерений (количественное значение физической величины), контроля (качественное значение физической величины, событие), воспроизведения (значение меры) и испытаний. Операции испытаний сочетают в себе операции измерений и/или контроля и воспроизведения. Методологически такой подход был развит в ходе обобщения практики разработки и промышленного выпуска интегральных микросхем (ИМС).

Рост объема промышленного выпуска ИМС и их сложности неизбежно потребовал автоматизации познавательных операций, среди которых наиболее эффективными оказались операции контроля [4]. Все это привело к перераспределению удельного веса познавательных операций:

от измерений и измерительных испытаний к контролю и контрольным испытаниям, с одной стороны, и от измерений и контроля к измерительным и контрольным испытаниям, с другой стороны. Оценка значимости познавательных операций в микроэлектронике, используемых за последнее 10-летие, приведена в табл. 1.

Необходимо отметить, что, несмотря на применение совокупности различных познавательных операций и их благоприятного влияния на экономику производства ИМС, стоимость контроля и контрольных испытаний достигает 30–40% из общей стоимости и трудоемкости.

Важность и перспективность контроля и испытаний в автоматизированном производстве, в отличие от традиционных измерений, недостаточно оценена и не охватывается основополагающими стандартами метрологии [1], практически они выпадают из системы законодательной метрологии. В основе операций измерения и контроля лежит мера — техническое средство, воспроизводящее физическую величину заданного размера (в случае измерения) и событие (в случае контроля).

Эталоны как меры наивысшей точности, находясь в ведении метрологических институтов страны и частично отраслевых метрологических служб, также созданы для метрологического обеспечения операций измерения. Операции контроля со стороны государственной метрологической службы курируются для отдельных стандартных образцов веществ и некоторых материалов.

Все это свидетельствует о возрастании роли прикладной метрологии в электронной индустрии и поиске новых путей обеспечения единства и необходимого уровня точности всех видов познавательных операций, используемых в электронном производстве и при сертификации продукции.

Таблица 1

Относительная оценка значимости познавательных операций

Стадии жизненного цикла продукции	Значимость операций			
	Измерения	Контроль	Испытания	
			измерительные	контрольные
Исследование	+++	+	+++	+
Разработка	++	+	++	+
Производство	+	+++	+	+++
Применение	+	++	+	++

Обозначения: +++ — преимущественное применение; ++ — частое; + — редкое.



**Метрологические принципы.** Развитие прикладной метрологии, объединяющей методы и средства метрологического обеспечения, обусловлено как развитием самих объектов техники и технологий, включая используемые средства измерения и контроля, так и изменениями, происходящими в теоретической и законодательной метрологии [5].

Можно считать, что имеются традиционная и новая часть метрологии, которые определенным образом дополняют друг друга и не вызывают противоречий, если система стандартизации не опаздывает к происходящим изменениям прежде всего в высоких технологиях.

Традиционный принцип метрологии, базирующийся на установившейся веками системе передаточных размеров единицы от эталона (Э) к высокоточным средствам измерения (ВСИ), называемых в последнее время вторичными эталонами различных разрядов, и рабочими средствами измерения (РСИ). Этот основной принцип современной метрологии можно назвать *иерархическим* или *принципом централизации*.

Применимость принципа иерархии можно оценить введением агрегатного критерия вида

$$\eta = \gamma \cdot n \cdot C,$$

где  $\gamma = 1/|\delta|$  — величина, обратная модулю погрешности измерения,  $n$  и  $C$  — количество и стоимость средств измерений рассматриваемого вида;  $\gamma$ ,  $n$  и  $C$  — величины, выраженные в относительных значениях.

Применение принципа иерархии оправдано, если выполняются условия

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{\text{э}} > \gamma_{\text{вси}} > \gamma_{\text{рси}} \\ \eta_{\text{э}} + \eta_{\text{вси}} < \eta_{\text{рси}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Оценку эффективности иерархического принципа можно произвести применительно к системе поверки в виде очередей методами теории массового обслуживания, используя экономические показатели, например в виде суммарных затрат

$$E(k) = \sum_{i=1}^N c_i \Theta_i(k) + \sum_{j=1}^k S_j,$$

где  $k$  — количество обслуживающих устройств (эталон),  $\Theta_i(k)$  — среднее время ожидания в очереди на обслуживание заявки  $i$ -го типа,  $N$  — количество заявок,  $c_i$  — затраты, связанные с ожиданием заявки  $i$ -го типа в очереди,  $S_j$  — стоимость обслуживающего устройства  $j$ -типа.

Данная зависимость имеет минимум, резко смещаемый в сторону больших значений  $E(k)$  при увеличении количества используемых для поверки эталонов и расширении парка средств измерений.

Новые направления развития метрологии вызваны прежде всего потребностями метрологического обеспечения прецизионных измерений. Для этого вида измерений стали встречаться случаи, когда требования к точности РСИ и эталонов достигли соизмеримого уровня, а затраты на их метрологическое обеспечение превосходят стоимость РСИ, т.е.

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{\text{э}} \approx \gamma_{\text{рси}} \\ \eta_{\text{э}} + \eta_{\text{вси}} > \eta_{\text{рси}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В данном случае принцип иерархии становится неприемлемым и необходимо переходить к *принципу автономности или децентрализации*. Для принципа автономности характерно применение в средствах измерения самокалибровки, основанной на использовании естественных мер. Последние создаются на основе макроскопических квантовых эффектов, обеспечивающих высокую фиксирующую способность и стабильность. Самокалибровка средств измерений в лучшем виде достигается сочетанием квантовых мер с микропроцессорной техникой. Погрешность таких средств измерений в основном определяется известными точностными значениями фундаментальных констант. Важно, что для таких средств измерения поддержания точности обеспечивается наличием функционирующей меры.

Необходимо отметить, что переход к принципу автономности не уменьшает роль национальных эталонов, которые, наряду с традиционными функциями хранения единиц измерения и их сличения с международными эталонами, необходимы для проведения высокоточных измерений при определении значений фундаментальных констант и испытания квантовых мер.

В практике обслуживания технических систем с обратными связями в виде технологических звеньев восстановления, например, производственных линий, комплексов управления и т.п., всегда есть необходимость судить о качестве и управляемости объекта. Оказывается, что решить эту задачу можно путем введения критерия информационного взаимодействия "объект — измерительное звено" вида

$$P(x, t) = P\{f(x, t) \in D_0\},$$

где  $f(x, t)$  — плотность распределения выходных параметров объекта,  $D_0$  — область допустимых значений информативных параметров.

Для консервативного случая  $P(x) = P\{-D \leq x \leq D\}$ .

Будем считать, что погрешность измерения  $\Delta$  имеет плотность распределения  $\phi(x)$ , а технологическое звено, обеспечивающее введение параметра объекта в поле допуска (путем регулировки, изъятия из потока некачественных изделий и т.п.), имеет плотность  $W(\xi)$ . В этом случае  $P = \int_{-D}^D W(\xi) \phi(x - \xi) d\xi dx$ . Данное выра-

жение при нормальном законе распределения  $f(x)$ ,  $\phi(x)$  и  $W(x)$  определяется соотношением

$$P(h, m) \approx \frac{h + 2 - 0,4/m}{h + 2}, \quad (3)$$

где  $m = D/\Delta$  — метрологический запас, определяемый отношением допуска к погрешности измерения;  $h$  — коэффициент формы кривых распределения ( $h = 4$  при равномерном распределении,  $h = 10$  при распределении, близком к нормальному) [6].

Выражение (3) является математическим описанием метрологического *принципа взаимодействия*, удобного для решения многих инженерных задач.

В процессе эксплуатации технических систем необходимо рассматривать случай

$$P(t, \text{Э}) - P_{\text{доп}} \geq 0, \quad (4)$$

где  $P(t, \text{Э})$  — вероятность состояния обслуживаемого объекта,  $P_{\text{доп}}$  — допустимая вероятность исправного

Таблица 2

## Оценка эффективности принципов прикладной метрологии в СИД

Принципы прикладной метрологии	Характеристики СИД			
	Точность	Быстродействие	Надежность	Стоимость
Иерархии	Достигается для стандартных средств измерения	Низкое	Не всегда обеспечивается	Высокая для уникальных средств измерения
Автономности	Достигается для уникальных средств измерения	Высокое	Ожидается высокая	Не оценена
Взаимодействия	Устанавливается исходя из свойств ИЭТ (допусков)			Определяется из соотношения погрешность — допуск
Соответствия		Устанавливается исходя из свойств ИЭТ, методов и средств измерений и контроля		Определяется показателями точности, быстродействия и надежности

состояния объекта,  $\mathcal{E} = \mathcal{E}(\tau, T_n, a_i, \beta_j)$  — функциональная зависимость эффективности системы от показателей контрольно-измерительных средств и параметров процесса обслуживания ( $\tau$  и  $T_n$  — продолжительность и интервал обслуживания,  $a_i$  и  $\beta_j$  — параметры процесса обслуживания и метрологического звена). Значения  $a$  и  $\beta$  устанавливаются в документации или находятся опытным путем.

Интегральное уравнение (4) характеризует метрологический принцип соответствия. Это уравнение имеет решение только для частных случаев, например при определении значений интервалов технического обслуживания и значений периода проверки средств измерения.

Выражения (1–4) позволяют осуществлять количественную интерпретацию принципов прикладной метрологии как для операций измерения, так и контроля.

В табл. 2 приведены результаты анализа применимости принципов прикладной метрологии при решении задач метрологического обеспечения систем интегральной диагностики (СИД) ИЭТ [7]. При этом анализе учитывались особенности объектов диагностирования, используемых методов и средств измерений и контроля.

**Высокоточные измерения.** К высокоточным измерениям целесообразно относить такие, которые позволяют решать следующие задачи:

— получение принципиально новых результатов в научных исследованиях (установление закономерностей, новых физических эффектов и т.п.);

— разработку новых материалов, механизмов, приборов и технологических процессов;

— эффективное управление производством, повышение качества и надежности выпускаемой продукции;

— проведение метрологических работ.

Более высокий уровень точности и производительности труда при измерениях обеспечивается достижениями прежде всего в области физики, вычислительной техники и метрологии.

В 90-х годах электронная техника сталкивается с измерениями физических величин во многих новых диапазонах: линейных размеров — в нанометровом, частоты когерентных колебаний — в терагерцовом и выше, интервалов времени — в пикосекундном, энергии — в фемтоджоульном, примесей — на уровне одиночных атомов. При этом быстро растут требования к точности измерений, возникают потребности измерения быстропротекающих процессов в реальном масштабе времени, существенно возрастает необходимость в алгоритмических измерениях в связи с усложнением изделий и процедур их контроля и испытаний. "Перенос" точности с основной единицы на кратные и дольные, как показывает анализ, сталкивается со многими трудностями и развивается весьма медленно, уступая темпам развития технологии изделий электронной техники. Более прогрессивный путь, который обсуждался выше, — создание самокалибрующихся информационно-измерительных систем, работающих в компьютерных сетях и использующих в качестве реперов природные константы.

Для измерения сверхмалых геометрических размеров топологии ИМС используются растровые электронные (РЭМ) и туннельно-зондовые (СТМ) микроскопы. Разработанные модели процессов взаимодействия РЭМ-изображений с объектами позволяют в субмикронном диапазоне линейных размеров достичь систематической составляющей погрешности измерения до 0,03 мкм. Особых трудностей при использовании РЭМ-измерителей не возникает, в то время как для диэлектрических объектов погрешности измерения размеров возрастают и требуется применение сложных моделей [8].

Для исследования на атомно-молекулярном уровне поверхностей объектов — полупроводников, молекулярных пленок, межфазных границ и т.п. — непревзойденным инструментом является СТМ, который для объектов с электрической проводимостью обеспечивает разрешение по вертикали к образцу до 0,01 нм и в плоскости образца — 0,2 нм.

При исследовании локальных микроскопических характеристик поверхности объектов с любой электрической проводимостью (атомов отдельных примесей, нейтральных дефектов и т.п.) незаменимыми являются атомные силовые микроскопы, реагирующие на силы Ван-дер-Ваальса. Они обладают разрешением по вертикали и горизонтали до 0,02 нм. В принципе атомный силовой микроскоп обладает чувствительностью, достаточной для детектирования единичных электронов [9].

Методы метрологической калибровки микроскопов с нанометровым разрешением находятся в стадии исследования. Чаще для этих целей прибегают к пользованию свойств регулярной кристаллической решетки в качестве эталонного изображения, т.е. используются природные константы.

Развитие литографии и микроскопии позволили непрерывно повышать точность формирования ("обра-

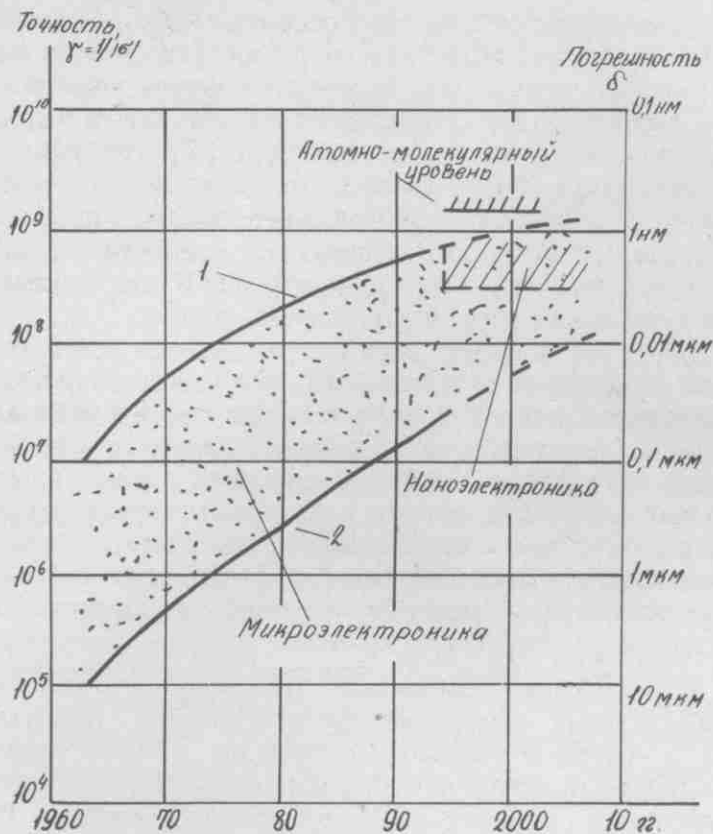


Рис. 1. Достигнутые и прогнозируемые значения точности формирования структур микро- и нанoeлектроники: 1 — рекордные значения; 2 — значения, характерные для производства

ботки”) микроэлектронных структур, обеспечивая в настоящее время потребности субмикронной и нанометровой технологии [10], Динамика роста точности измерения линейных размеров в микроэлектронике в пределах текущего столетия приведена на рис.1.

Решение многих научно-технических проблем определяется достижениями в области точности измерения частоты и времени. В 1950–80-х годах требуемые значения точности частоты и времени достигались на основе использования методов кварцевой стабилизации, СВЧ- и квантовой электроники, микропроцессорной техники, использования в измерительных средствах физических эффектов с высокой фиксирующей способностью (узких спектральных линий, переходов в сверхпроводниках и т.п.). Однако в 90-х годах возникли проблемы, для решения которых необходимы значения точности измерения частоты и времени, еще более высокие по сравнению с достигнутыми. Это относится к проблемам космонавтики, исследованию релятивистских явлений, исследованию экспериментальной проверкой гравитационных полей, изучению потенциальных свойств приборов и устройств электроники. Достижение более высоких уровней точности измерения частоты и интервалов времени возможно на основе многомодовых лазеров с весьма узкими спектральными линиями и широкого использования реперных сигналов, точностные характеристики которых определяются фундаментальными природными константами (ФПК). Последние обеспечивают практическую независимость от внешних условий, неизменность в течение времени (например, неизменность значения постоянной тонкой структуры атома оценивается менее  $5 \cdot 10^{-11}$  в год) и возможность достижения уровней точности, в 2000–5000 раз более высоких при использовании комбинаций источников реперных сигналов с различными ФПК.

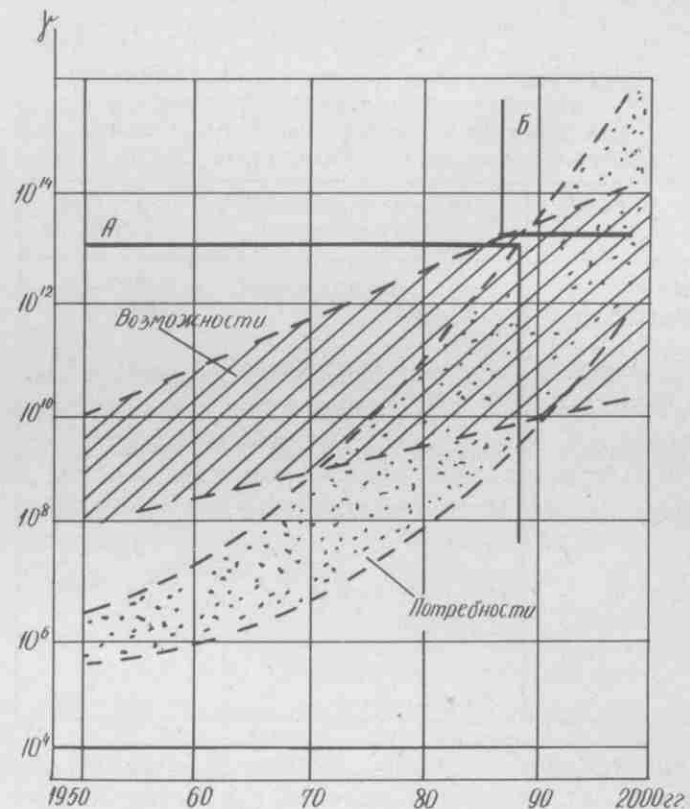


Рис. 2. Динамика роста точности измерений частоты и времени: А — область решенных проблем; Б — область поиска

Комбинация реперов частоты (ряда водородных и цезиевых) с измерительным комплексом радиооптического частотного моста позволили ВНИИФТРИ создать национальный эталон частоты и времени с погрешностью  $10^{-13} - 10^{-14}$ . В эталоне измерения на частотах до  $1 \cdot 10^{14}$  Гц выполняются путем синтеза измеряемой частоты и частот лазеров и СВЧ генераторов. Данный эталон может выполнять функции единого эталона “время — частота — длина”. Рост точности эталонов частоты и времени и точности рабочих средств измерений, достигнутый до 90-х годов, позволил сопоставить возможности высокоточных измерений частоты и времени с имеющимися потребностями (рис.2).

Для современного периода развития микроэлектроники весьма актуальным является высокоточное определение состава и свойств материалов и веществ (табл.3). Использование различных видов спектроскопов, основанных на регистрации энергетических и волновых спектров испускания, поглощения и рассеяния, позволяет добиться высокого пространственного разрешения (по поверхности от 0,5 мкм до 0,1 нм) и регистрации элементного состава до  $10^{-9} \div 10^{-1}$  ат.%. В большинстве случаев, чем выше чувствительность спектроскопа к определению химического состава, тем хуже его пространственное разрешение. Такая закономерность наблюдается в диапазоне изменения чувствительности от  $10^{20}$  атомов/см<sup>3</sup> при пространственном разрешении около 5 нм до  $10^{10}$  атомов/см<sup>3</sup> при пространственном разрешении порядка 1 см. Большими возможностями обладает лазерная фотоионизационная спектроскопия: чувствительность до одного атома, спектральное разрешение  $10^6 - 10^{13}$  Гц, временное разрешение  $10^{-6} - 10^{-13}$  с. Этот вид спектроскопии обладает высокой универсальностью, обеспечи-

Таблица 3

Рост требований к точности и разрешающей способности аналитических средств при переходе от технологии ИМС с малой степенью интеграции к технологии СБИС (Si)

Объект измерения	Контролируемая величина	Рост требований, раз
Исходный материал	Предел обнаружения примесей	30—50
Монокристаллы	Предел обнаружения примесей	100—150
Подложки	Химический состав	4—10
	Предел обнаружения примесей	150—200
Эпитаксиальные структуры	Неоднородность по толщине	100—200
	Локальность	$10^3—10^5$

вая идентификацию любых атомов и молекул. Количественная интерпретация результатов исследований при использовании спектроскопического оборудования вызывает большие трудности, преодолеваемые методами математического моделирования с использованием современных микроЭВМ.

Высокая прецизионность измерений при анализе свойств и качества материалов, структур и технологических процессов при субмикронных и нанометровых размерах элементов ИЭТ достигается на основе использования синхротронного излучения. В синхротронах, обеспечивающих непрерывность излучаемого спектра от инфракрасных до рентгеновских колебаний, достигается высокая спектральная яркость и линейная поляризация. Это позволяет обнаруживать дефекты весьма малых размеров, увеличивать расстояние от исследуемого образца до детектора, изучать стадии эпитаксиального роста на атомно-молекулярном уровне. Уникальная возможность применения эффекта Мессбауэра определяется чрезвычайно узкими линиями спектра, которые характеризуются значением отношения ширины линии к энергии  $\gamma$ -кванта порядка  $10^{-13}—10^{-16}$ . Это свойство ядерной спектроскопии используется для обнаружения сверхмалых примесей в веществах, а также для изучения структуры электрических и магнитных полей в атомных масштабах.

В последние годы обсуждаются трудности измерений в микроскопических системах, для которых действует соотношение неопределенности Гейзенберга-Бора [11, 12]. Действительно, для таких систем неопределенность изменения энергии  $\Delta(E - E_0)$  при измерении связана с продолжительностью эксперимента  $\tau$  соотношением

$$\Delta(E' - E_0) \cdot \tau \geq h,$$

где  $E_0$  и  $E'$  — энергия системы до и после измерения,  $h$  — постоянная Планка. Отсюда следует, что погрешность измерения энергии системы без изменения ее величины  $\geq h/\tau$ . Благодаря этой принципиальной трудности начались поиски "невозможных" измерений, которые пошли по двум направлениям. Одно направление — поиск таких взаимодействий "объект — измерительный прибор", в результате которых объект

возвращается к начальному состоянию. Это достигается в том случае, когда время измерения существенно меньше времени релаксации входного контура измерительного прибора. Такая продолжительность почти недостижима для технического эксперимента. Другое направление, которое успешно развивается, связано с переходом к макроскопическим квантовым системам. В последних измерительный прибор не нарушает состояние (длины) макроскопической когерентности, чем и обеспечивается ничтожно малое влияние прибора на объект.

Наиболее широко распространенными измерительными приборами с использованием макроскопических квантовых систем твердого тела являются приборы на основе эффектов Джозефсона и квантового эффекта Холла. Потенциальные возможности подобных измерительных устройств велики и их практическое значение для высокоточных измерений быстро растет, открывая перспективы измерения многих физических величин с погрешностями измерения среднего квадратического отклонения до  $10^{-7}—10^{-10}$ .

В заключение необходимо отметить, что реализация высокоточных измерений достигается при продуманном в метрологическом отношении используемых в эксперименте приборов общего назначения и автоматизированных контрольно-измерительных систем. Подробно это освещено в книге [13].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Основополагающие стандарты в области метрологического обеспечения. — М.: Изд. стандартов, 1981. — 272 с.
2. С р е т е н с к и й В.Н. Метрологическое обеспечение производства приборов микроэлектроники. — М.: Радио и связь, 1988. — 144 с.
3. Б о н д а р е в с к и й А.С., С р е т е н с к и й В.Н. Измерение, контроль, испытания — эволюция понятий. — Итоги науки и техники. — М.: ВИНТИ, 1990, т. 7, с. 149—182.
4. Д о л г о в В.А., К а с а т к и н А.С., С р е т е н с к и й В.Н. Радиозлектронные автоматические системы контроля/Под ред. В.Н.Сретенского. — М.: Сов. радио, 1978. — 348 с.
5. Современные проблемы теоретической метрологии/Ю.В.Тарбеев, В.С.Александров, Л.В.Довбета, Т.Н.Сирая. — Итоги науки и техники. — М.: ВИНТИ, 1991, т. 8. — 132 с.
6. К р и к с у н о в В.М., С р е т е н с к и й В.Н. Расчет метрологического запаса при оценке качества изделий электронной техники. — Электронная техника. Сер. 12, 1971, вып. 2, с. 22—27.
7. Д у б и ц к и й Л.Г., П р о л е й к о В.М., С р е т е н с к и й В.Н. Направления развития метрологического обеспечения интегральной диагностики. — Электронная техника. Сер. 8, 1980, вып. 7, с. 93—104.
8. Ж е л е з н о в В.В., Н и к и т и н А.В., С р е т е н с к и й В.Н. Проблемы измерения размеров субмикронных микроэлектронных структур. — Электронная промышленность, 1990, вып. 4, с. 47—54.
9. Ш е р м е р г о р Т.Д. Метрологические аспекты растровой зондовой микроскопии нанометрового диапазона. — Измерительная техника, 1992, вып. 7, с. 24—28.
10. С р е т е н с к и й В.Н. Точность как фактор развития электронного производства. — Электронная промышленность, 1993, вып. 11—12, с. 69.
11. В о р о н ц о в Ю.И. Теория и методы макроскопических измерений/Под ред. В.Б.Брагинского. — М.: Наука, 1989. — 280 с.
12. П у с т о в о й т В.И. Метрология и макроскопические квантовые системы. — Измерительная техника, 1990, вып. 5, с. 3—5.
13. Приборно-модульные универсальные автоматизированные измерительные системы: Справочник/В.А.Кузнецов, В.Н.Строителев, Е.Ю.Тимофеев и др./Под ред. В.А.Кузнецова. — М.: Радио и связь, 1993. — 304 с.

# Метод прецизионных измерений субмикронных и нанометровых объектов в РЭМ

Р.М.АММОСОВ, А.И.КОЗЛИТИН, А.В.НИКИТИН

Анализ источников погрешностей и предложенный метод контроля по инвариантным точкам позволили снизить погрешность измерения линейных размеров в диапазоне 100—500 нм до единиц нанометров.

Освоение области субмикронных размеров в микроэлектронной технологии стало настоящей практической потребностью. Решение этой задачи сопряжено с качественными изменениями в технологическом маршруте, необходимостью разработки новых материалов, технологических процессов и оборудования. Качественные изменения затрагивают и процедуры операционного контроля. В частности, широко распространенные традиционные методы контроля, базирующиеся на оптической микроскопии, оказываются все менее эффективными. Это относится прежде всего к методам измерения и контроля размеров элементов СБИС.

Фотоэлектрическая и телевизионная оптическая микроскопия как методы измерений линейных размеров характеризуются следующими цифрами:

диапазон измеряемых размеров, мкм	0,8—100
воспроизводимость результатов, мкм	$\pm (0,01—0,02)$
неисключенная систематическая погрешность, мкм,	не менее 0,05
отношение разрешающей способности микроскопа к погрешности измерений, которое можно рассматривать как количественную характеристику разработанности метода или меру его совершенства	5—10

Можно утверждать, что столь высокое значение указанного отношения свидетельствует о том, что методы оптических измерений доведены до высокой степени совершенства, и это является прямым следствием развитости теории оптических изображений—теории, насчитывающей несколько сот лет.

К сожалению, при переходе в субмикронную область размеров оптические методы теряют свои достоинства по фундаментальным физическим причинам — из-за соизмеримости длины волны света (точнее, разрешения микроскопа) с размерами контролируемых элементов. Выбор альтернативных методов измерений для субмикронного диапазона не слишком обширен. Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия не решает проблемы в целом, но лишь несколько сдвигает нижнюю границу диапазона; сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопия пока не вышли за пределы лабораторных экспериментов; просвечивающая электронная микроскопия непригодна для производственного контроля из-за жестких ограничений на толщину объектов контроля и чрезмерно малой производительности. Наиболее приемлемой для этих целей по общему признанию следует считать растровую электронную микроскопию (РЭМ).

Проблема РЭМ-измерений линейных размеров распадается на две самостоятельные задачи. Прежде всего необходимо зафиксировать (желательно в цифровой

форме) видеосигнал от контролируемого элемента без внесения в него существенных искажений. Такой видеосигнал должен быть к тому же хорошо воспроизводимым, слабо зависящим (в идеале независимым) от условий измерения, не должен содержать шумов значительной величины. Комплекс этих требований обеспечивается главным образом совершенствованием узлов и блоков электронного микроскопа, т.е. аппаратными возможностями РЭМ-измерителя. Многолетний опыт создания растровых электронных микроскопов общего применения, накопленный ведущими фирмами Японии (JEOL, Hitachi), Англии (Cambridge Instr.), США (AMRAY, Nanometrics), Германии (Carl Zeiss) и другими, позволяет создавать модели микроскопов, в той или иной мере удовлетворяющие требованиям к РЭМ-измерителям. Поэтому на мировом рынке появилось немало моделей растровых электронных микроскопов, отнесенных формально к категории измерительных: JEPAS-1000 и JEPAS-1200, S-6000, S-806, SWICKSCAN IID, ZRM-20 и др. Однако указанные модели нельзя безоговорочно считать измерительными приборами по ряду причин.

Отметим прежде всего, что требования к измерительному растровому электронному микроскопу оказываются заметно более жесткими, чем к обычному РЭМ. В измерительном РЭМ необходимо обеспечить повышенную стабильность всех вторичных источников питания и особенно высоковольтного источника питания электронной пушки, блока питания ФЭУ; по соображениям стабильности тока зонда следует отказаться от использования автоэмиссионных катодов, характеризующихся значительными флуктуациями тока эмиссии; в видеотракте недопустимо использовать широкополосное усиление видеосигнала и быстрые развертки; неравномерность усиления сигнала в рабочей полосе частот не должна превышать  $\pm 3$  дБ [1]; желательно использование цифровых разверток. Если речь идет о точных измерениях, то во избежание значительных субъективных ошибок оператора он должен быть исключен из процедуры измерений. Из-за значительных нелинейных искажений на мониторе с большим углом отклонения луча недопустимо использовать экран или снимок для фиксации видеосигнала. Его значения должны быть зафиксированы в цифровой форме в памяти приданной ЭВМ и использованы затем для вычисления размеров по определенным алгоритмам, исключая вмешательство оператора. На основе нашего опыта, проведенных экспериментов и в соответствии с многочисленными публикациями отечественных и зарубежных авторов мы считаем, что вне перечисленных условий не может идти речи о высокоточных РЭМ-измерениях. Понятно, что реализация указанных условий возможна лишь в системах, включающих специализированный РЭМ и ЭВМ и работающих в автоматизированном режиме. Таким образом, автоматизация измерительных процедур оказывается непременным условием проведения высокоточных РЭМ-измерений.

Вторая часть проблемы РЭМ-измерений связана с необходимостью тем или иным способом обработать зафиксированный видеосигнал, чтобы извлечь из него значение размера элемента и оценить вероятную погрешность. Очевидно, что размер элемента есть расстояние между его краями; измерить размер по видеосигналу — значит найти на нем те точки, которые соответствуют краям элемента, и затем измерить расстояние между ними. Задача измерения расстояний (перемещений) между зафиксированными точками решается не слишком сложно и достаточно точно — например, методами лазерной интерферометрии, так что главной проблемой на этом этапе (и в метрологии линейных измерений в целом) остается точная локализация края в изображении контролируемого элемента [2]. Над решением этой проблемы и разработкой практических методов прецизионных измерений в рамках национальных программ работают ученые Национального института стандартов и технологии (NIST, США), Ньютоновской национальной физической лаборатории (NPL, Англия), группы ученых в Японии, Германии, России, в том числе в НИИФП. Проблема оказалась достаточно сложной, наукоемкой и пока далекой от завершения. Достаточно сказать, что достигнутое к рубежу 90-х годов значение "критерия совершенства" методов РЭМ-измерений составило 0,25–0,30, т.е. в десятки раз меньше, чем для оптических методов. Это свидетельствует о недостаточной разработанности РЭМ-методов и наличии значительных неиспользованных возможностей.

В научной периодике имеются сообщения о методах РЭМ-измерений, базирующихся на соображениях эвристического характера. Такие методы не обеспечивают высокой достоверности результатов, поскольку в их основе лежит обычно не научный анализ, но более или менее удачная догадка. Иллюстрацией к сказанному может служить опыт эксплуатации измерительных программ Line Width Measurement (LWM) из программного пакета AN 10000 английской фирмы LINK. Этот пакет нашел широкое распространение; он поставляется вместе с большинством современных электронных микроскопов производства Англии, Японии, Голландии и потому хорошо известен специалистам. Программы LWM содержат 7 различных алгоритмов измерений, выбор из которых предоставлен оператору. Среди них имеются такие, которые предусматривают "отсечку" видеосигнала по заранее установленному уровню, проведение измерений по максимумам видеосигнала, его минимумам, точкам перегиба и т.п. Результаты измерения одного и того же объекта по различным алгоритмам различаются на 0,15–0,20 мкм и не существует никаких соображений, по которым можно было бы предпочесть один алгоритм другому. Более того, результаты измерений по любому выбранному алгоритму оказываются зависящими еще и от условий измерительного эксперимента: от ускоряющего напряжения, тока зонда, рабочего отрезка, типа детектора, характеристик усилительного тракта, угла наклона образца, а также уровней яркости, контраста и качества фокусировки — т.е. параметров, устанавливаемых оператором по его визуальному восприятию.

Ясно, что при этих условиях речь может идти о проведении лишь оценочных, но не высокоточных измерений. Дополнительным источником погрешностей оказывается процедура калибровки увеличения микроскопа. Используемые для этой цели эталоны (стандарты, меры) обычно недостаточно точны. Лучшие зарубежные стандарты ширины линий аттестованы с погрешностью

(25–50) нм [3]. Сумма указанных обстоятельств и приводит к низкому значению "критерия совершенства" методов РЭМ-измерений. Понятно, что для создания действительно прецизионных методов измерений необходимо разработать алгоритмы, базирующиеся не на интуитивных или эвристических соображениях, но вытекающие из физически обоснованной теории РЭМ-изображений. Желательно, чтобы эти алгоритмы были бы устойчивы к вариациям контраста, яркости и других плохо контролируемых условий измерения [4].

Общей особенностью исследований в области субмикронной РЭМ-метрологии, проводимых в разных странах, оказалось то, что основным методом повсеместно избран метод математического моделирования процессов, лежащих в основе формирования видеосигнала в растровом электронном микроскопе. Для моделирования обычно используются расчеты дискретных траекторий электронов в толще образца по методу Монте-Карло. Такой подход имеет ряд очевидных преимуществ: простота физических представлений и обусловленная этим простота алгоритмов и машинных программ; кажущееся очевидным соответствие реальных условий эксперимента и параметров модели и пр. Эти обстоятельства сделали метод Монте-Карло популярным, практически стандартным. Готовые программы для расчетов по Монте-Карло можно найти, например, в статье [5], монографии [6].

Однако этот подход имеет ряд негативных особенностей, зачастую остающихся без оценки и потому нуждающихся в рассмотрении. Прежде всего, модель Монте-Карло — не более чем модель. Ее адекватность эксперименту не безусловна и требует подтверждения. Так, например, в механизмах рассеяния электронов не учитывается влияние локальных электрических полей, а потому метод просто не применим к расчетам видеосигнала от диэлектрических образцов из-за неизбежного возникновения в них локальных электрических полей. Кроме того, в расчетах обычно используется представление об энергетических потерях электрона по Бете, что является грубым приближением, особенно для электронов низких энергий. И, наконец, для получения статистически достоверных значений видеосигналов в каждой точке необходимо проанализировать траектории значительного числа электронов. По данным [7] достаточным может считаться  $10^4$ – $10^5$  отдельных траекторий, на каждой из которых происходит  $10^3$ – $10^4$  актов взаимодействия, управляемых законами случайных событий. Поэтому для проведения подобных расчетов требуются значительные вычислительные ресурсы, реализуемые только на супер-ЭВМ. Опыт практических вычислений видеосигнала [8] на супер-ЭВМ NEC-SX2 с быстродействием  $1,3 \times 10^9$  плавающих сложений в секунду показал, что в этих условиях на расчеты одного модельного сигнала (50 точек) с погрешностью 2% требуется около 3 минут процессорного времени. Естественно, что достоверные расчеты по Монте-Карло до настоящего времени остаются единичными, уникальными; возможности широкого варьирования параметров оказываются ограниченными, что не позволяет таким путем исследовать общие закономерности формирования видеосигнала в РЭМ. По этим же причинам затруднено выявление тонкой структуры видеосигнала, для чего необходимо провести его расчеты с детальным разбиением (1000 и более точек вместо 50). В зарубежной и отечественной периодике нередко фигурируют результаты моделирования видеосигнала по Монте-

Карло на основе недостаточного количества рассчитанных траекторий: 1000 и даже 100. Статистическая достоверность таких расчетов явно недостаточна и, как правило, не оценивается, что не позволяет считать подобные расчеты достоверными.

В НИИФП предложен и разработан альтернативный подход [9–11] к моделированию видеосигнала, не требующий столь громоздких расчетов. Он основан на вычислениях вероятностей генерации вторичных электронов разных энергий в толще образца и их выхода через его (возможно, содержащую рельефные детали) поверхность. Этот подход значительно сложнее, поскольку требует вывода множества громоздких формул и их программирования, однако расчеты по созданным программам не требуют больших вычислительных ресурсов и легко реализуются на микроЭВМ типа IBM PC или ДВК. Время на расчет одного видеосигнала (200 точек) редко превышает 10 мин (для ДВК-2). Сопоставление результатов таких "вероятностных" расчетов с достоверными результатами моделирования по Монте-Карло для идентичных условий не обнаруживает значимых расхождений.

К сожалению, ни тот, ни другой метод моделирования не позволяет создать одну универсальную модель формирования видеосигнала в РЭМ. Поэтому были разработаны около двух десятков "частных" моделей, отвечающих различным условиям (различная природа и геометрия образца, разные режимы работы микроскопа, разные детекторы вторичных электронов).

На основе проведения массовых расчетов видеосигнала, реализующегося в различных условиях, исследуются закономерности формирования видеосигнала в РЭМ и изыскиваются возможности разработки практических методов точных измерений, пригодных для образцов разной природы и устойчивых к вариациям режимов работы РЭМ-измерителя. Ниже обсуждаются возможности одного из предложенных методов.

Идея метода явилась прямым результатом сопоставительного анализа многочисленных видеосигналов для различных условий измерительного эксперимента. Метод пригоден для измерений объектов, функция образца [12] которых имеет П-образную или близкую к ней форму. Такую форму функции образца обнаруживают безрельефные гетерогенные объекты, а также рельефные структуры, резко различающиеся по составу контролируемого элемента и окружающего его "поля". Наименее удобны для измерений этим методом гомогенные рельефные образцы. Однако, как следует из расчетов по моделям, если использовать режим работы микроскопа с регистрацией быстрых "отраженных" электронов, то наблюдается замечательная особенность: форма функции образца оказывается тем ближе к П-образной, чем меньше размер элемента. Таким образом, рассматриваемый метод оказывается пригодным для измерений и гомогенных рельефных структур при условии, что размеры их элементов лежат в субмикронном диапазоне. Сущность метода можно пояснить на простом примере.

Если функция образца имеет необходимую форму, то согласно модельным расчетам дозированная фокусировка изображения приведет к изменению его формы таким образом, что новый видеосигнал пересечет исходный в двух точках:  $A$  и  $A'$  (рис.1). Из рисунка следует, что при этом меняется значение сигнала во всех точках, кроме  $A$  и  $A'$ . В силу этой их особенности такие точки названы инвариантными к расфокусировке или просто инвариантными точками (ИТ) [13]. Определяя размер

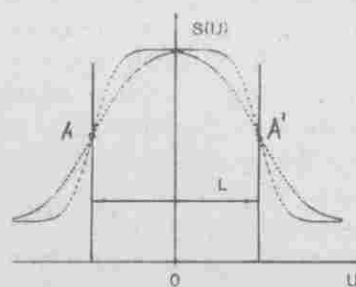


Рис. 1. Схема образования инвариантных точек на видеосигнале

элемента как расстояние между инвариантными точками, мы решаем проблему локализации края без необходимости жестко стабилизировать условия измерения. Действительно, если, например, яркость и контраст изображения установлены произвольно, но не меняются при считывании "нормального" и "расфокусированного" видеосигналов, то и в этом случае положение ИТ остается неизменным. То же относится и к изменениям тока зонда. Нетрудно видеть, что нелинейность усиления сигнала в видеотракте РЭМ, рассмотренная в [14] и порождающая погрешность измерений в несколько десятков нанометров при использовании алгоритмов отсечки по уровню, в данном случае не влияет на результаты измерений. Использование алгоритма ИТ позволяет избегать всегда проблематичной процедуры определения правильного уровня отсечки видеосигнала.

Таким образом, положение ИТ оказывается устойчивым к расфокусировке, вариациям тока зонда, уровня яркости и контраста изображения, наличию нелинейных искажений в видеотракте, а также в известных пределах к изменениям ускоряющего напряжения. Естественно положить концепцию ИТ в основу методов измерений размеров, даже если положение этих точек и не вполне соответствует краям измеряемого элемента. Проведенный анализ показал, что в ряде случаев ИТ точно определяют края элемента; в иных ситуациях они смещены от краев в ту или иную сторону на некоторое расстояние. Однако эти смещения однозначно и надежно предсказываются в рамках имеющихся моделей и могут быть без труда введены в результаты как поправки. Имеются условия, когда, строго говоря, инвариантных точек не существует: в сериях видеосигналов для разных условий фокусировки кривые, описывающие их форму, пересекаются друг с другом в различных точках, образующих область пересечений, центр которой в известном смысле играет роль инвариантной (точнее, квазиинвариантной) точки — КИТ.

Условия образования ИТ и КИТ, допустимые пределы изменений параметров измерительного эксперимента, направления и величины смещений ИТ и КИТ от краев элемента послужили предметом тщательного анализа. Установлены классы объектов, для контроля которых применим данный метод, а также диапазоны допустимых изменений условий измерения, обеспечивающие высокую точность.

Метод формализован в виде самостоятельного программного файла, легко встраиваемого в стандартное программное обеспечение AN 10000. Допускается проведение измерений и на автономном IBM-совместимом компьютере, если изображение измеряемого элемента предварительно записано на магнитный носитель. Программа работает в диалоговом режиме; участие оператора сводится к выбору объекта измерений, его позиционирования, выбору увеличения, уровней яркости и контраста изображения (во избежание "срезания" видеосигнала сверху или снизу), записи кадра в память ЭВМ или на внешний носитель.

Результаты измерений ширины зазора  
в магнитных головках

Номер линий сканиро- вания	Ширина зазора, мкм	Средние значения и разбросы
1 2 3	0,374 0,382 0,378	Среднее значение ширины на участке длиной 0,180 мкм—0,375 мкм
4 5	0,374 0,370	СКО единичного измерения — 3,6 нм
6 7	0,372 0,376	СКО среднего по 10 измерениям — около 1 нм
8 9 10	0,374 0,374 0,379	Доверительная вероятность с поправ- кой по Стьюденту — 66%

шего собственно метод, вариаций физической ширины зазора вдоль его длины на участке протяженностью 0,18 мкм и вклада случайных помех: вибраций, электрических и магнитных наводок и др. Поэтому можно утверждать, что СКО, характеризующее собственно метод измерений, фактически меньше значений, фигурирующих в табл.1, и близко к теоретическим оценкам.

Повторные измерения этих же образцов в идентичных условиях через неделю и через два месяца показывают совпадающие значения СКО, а различия измеренных средних значений не превосходят  $\pm 0,5$  нм, что свидетельствует о высокой долговременной воспроизводимости метода.

Для оценки неустраненной систематической погрешности необходимы эталоны ширины линий, аттестованные независимым методом с высокой точностью. Таких эталонов нет ни в России ни за рубежом. Напомним, что лучшие стандарты производства NIST США непригодны для этой цели ни по диапазону (1,0–10,0 мкм), ни по точности аттестации ( $\pm 50$  нм). Условно пригодными для этих целей могут считаться меры, созданные проф.А.В.Раковым с сотрудниками [15]. Условная пригодность этих мер связана с тем, что они перекрывают диапазон от 100 до 500 нм, а точность их аттестации, указанная в [15], составляет 0,3–0,8 нм. Технологический маршрут их изготовления и аттестации предусматривает выращивание пленки SiO<sub>2</sub> на поверхности Si-пластины, тщательные и многократные эллипсометрические измерения толщины окисного слоя, фотолитографию по нему, нанесение "толстого" слоя аморфного кремния и последующее вытравливание "запакованных" окисных дорожек селективным травителем. Считается, что ширина образовавшихся щелей точно соответствует данным эллипсометрических измерений. Этот постулат не является очевидным по следующим соображениям.

В соответствии с имеющимися представлениями при окислении поверхности Si-пластины из-за диффузионного механизма проникновения кислорода в решетку кремния не возникает резкой границы между подложкой и окисным слоем; образуется переходный слой с нестехиометрическим составом, причем толщина такого слоя оценивается в несколько нанометров. До сих пор остается дискуссионным вопрос о том, где в пределах переходной области пролегает условная гра-

Поскольку идея метода возникла в результате систематического теоретического анализа модельных видеосигналов, метод нуждается в тщательной экспериментальной проверке. На рис.2 представлены серии экспериментальных видеосигналов от одного и того же объекта при различных условиях фокусировки на фоне обычного РЭМ-изображения этого объекта. Видно, что пересечения этих кривых действительно образуют ИТ и эти точки расположены вблизи краев элемента. Отметим также, что шумы экспериментального видеосигнала осложняют фиксацию ИТ и при оценках воспроизводимости метода следует учитывать их влияние.

Как известно, точность любого метода измерения характеризуется совокупностью случайной и неустраненной систематической погрешности. Для оценки случайной, неустраненной систематической и полной погрешности метода проведены многократные и тщательные измерения разнообразных образцов с элементами субмикронных размеров. Условия проведения измерений: растровый электронный микроскоп "Stereoscan-360", позволяющий получить оцифрованный видеосигнал с погрешностью не более 0,1% (10-разрядный АЦП). Номинальное увеличение микроскопа 50000. Точная калибровка увеличения проводилась с помощью дифракционной решетки с периодом 0,479 мкм по специально разработанным для этой цели алгоритмам, устойчивым к шумам и обеспечивающим погрешность аттестации увеличения менее 0,2%. Ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 120 пА. Использовался режим сбора отраженных электронов с полупроводниковым детектором. Количество точек разложения изображения 512x512. Длительность разверток выбрана исходя из следующих соображений: время сканирования строки должно быть максимально возможным, чтобы обеспечить наилучшее значение отношения сигнал/шум (S/N); однако оно должно быть все же столь малым, чтобы можно было пренебречь низкочастотными шумами (фликер-шум, дрейф характеристик узлов и блоков микроскопа). Предварительно проведенные эксперименты показали, что этим требованиям отвечает время сканирования кадра, не превышающее 2 мин. Поэтому во всех дальнейших экспериментах использовалась скорость разверток TU/1024, что соответствует времени записи кадра около 50 с, а время сбора видеосигнала в одной точке составляет 100 мкс. При этом отношение S/N оказалось равным 15. В соответствии с теоретическими оценками [4], такому значению S/N отвечает СКО единичного измерения около 2 нм. Объектом измерений на первом этапе служили заготовки магнитных головок записи — считывания, имеющие немагнитный зазор шириной 300–400 нм. В этих экспериментах фиксировалась ширина зазора на каждой второй строке раstra, а область контроля занимала участок на образце длиной 180 нм. Фрагмент протокола измерений приведен в табл.1.

Заметим, что приведенные в табл.1 значения разброса результатов слагаются из разброса, характеризую-

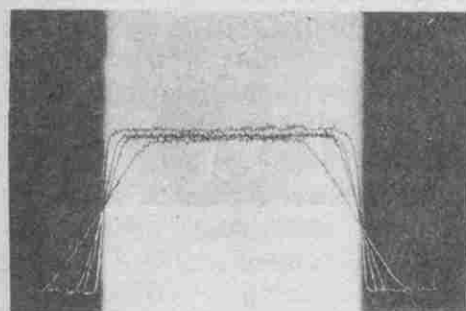


Рис. 2. Экспериментальная реализация инвариантных точек



нища слоя  $\text{SiO}_2$ , которая фиксируется столь точно в эллипсометрическом эксперименте.

Нет достаточных оснований считать, что вытравливание "запакованных" окисных дорожек происходит точно по тем же условным границам, которые фиксируются эллипсометрически. И, наконец, нет гарантий того, что в процессе нанесения слоев аморфного кремния (при температурах 600–750°C в водородной среде), не происходит частичного восстановления окисного слоя и смещения его границ, а значит, и изменения толщины окисных дорожек после их эллипсометрической аттестации.

Суммируя, можно заключить, что приводимые аттестовочные значения не являются вполне достоверными, поскольку аттестуется не сама ширина образующейся щели, но лишь толщина окисного слоя на промежуточной стадии изготовления меры. Было также установлено (и это согласуется с наблюдениями разработчиков мер), что при длительном воздействии электронного пучка (более 5 мин.) и, особенно, при увеличенных токах зонда номинальные значения ширины щелей не остаются постоянными.

Поэтому результаты проведенных испытаний с использованием указанных мер мы склонны рассматривать как предварительные и, возможно, требующие уточнений.

В процессе испытаний были проведены серии измерений нескольких экземпляров мер с соблюдением условий, описанных выше. Для получения статистически достоверных результатов один экземпляр меры был проконтролирован по всем строкам кадра (более 500 измерений каждого номинала). Результаты измерений представлены в табл.2.

Отметим, что значения СКО, фигурирующие в табл.2, больше, чем в табл.1, и причина этого очевидна: область контроля ширины зазора (табл.1) не превышает 0,18 мкм, в то время как для табл.2 эта область расширена до 2,0 мкм; неодинаковость физической ширины щели на ее участке длиной 2 мкм, очевидно, и приводит к возрастанию формального значения СКО, хотя нет оснований считать разброс, характеризующий собственно метод, различным в этих случаях.

Из приведенных данных следует, что при единичных измерениях неустранимая систематическая погрешность (расхождение) оказывается заметно меньшей, чем случайная; и именно последняя определяет значение полной погрешности метода. Естественно, что проведение серий повторных измерений позволяет уменьшить СКО среднего до значений, сопоставимых с вкладом систематической погрешности. Так, если ограничиться 25-ю измерениями каждого номинала, то случайная составляющая уменьшится до значений, меньших 1,6 нм, а полная погрешность результата может быть снижена до значений менее 6 нм. СКО среднего по сериям, содержащим более 500 независимых измерений, т.е. средних значений, фигурирующих в табл.2, не превышает 0,36 нм для всех строк этой таблицы, поэтому здесь полная погрешность определяется практически лишь вкладом систематической компоненты. Заметим, что использование столь обширного статистического материала вполне оправдано и практически реализуемо, поскольку принятая стратегия измерений предусматривает две разнесенные во времени процедуры: запись полного кадра изображения и последующую построчную его обработку, вследствие чего чистое "аппаратное" время не превышает 50 с и, в соответствии со сказанным выше,

Результаты многократных измерений меры

Номинальное (паспортное) значение, нм	Количество независимых измерений	Среднее измеренное значение, нм	Расхождение, нм	СКО единичного измерения, нм	СКО среднего, нм
98,9	512	99,6	0,7	5,7	0,25
150,7	512	148,0	2,7	6,4	0,28
369,7	512	374,9	5,2	8,0	0,36
434,7	512	439,3	4,6	7,3	0,32

вкладом низкочастотных шумов в этих условиях можно пренебречь.

Из сказанного следует, что проведение измерений объектов, размеры которых лежат в субмикронном и нанометровом диапазонах, с погрешностью в единицы нанометров — является разрешимой, но не простой задачей. Ее решение возможно при соблюдении ряда условий, к числу которых относится соответствующее аппаратное оформление, тщательная калибровка увеличения микроскопа, использование физически обоснованных алгоритмов измерений, целенаправленный выбор режимов работы микроскопа: ускоряющего напряжения и тока зонда, типа детектора, скорости развертки — применительно к особенностям измеряемой структуры, а также аккуратность при проведении операций позиционирования объекта и записи видеосигнала в память ЭВМ.

Дальнейшее совершенствование этого и других методов прецизионных РЭМ-измерений позволит довести погрешность измерений до долей разрешающей способности растрового электронного микроскопа (по крайней мере для структур определенных типов), и таким образом, окажется возможным увеличить значение "критерия совершенства" до величин, характерных для оптических методов измерений.

Авторы выражают признательность академику РМА В.Н.Сретенскому за постоянный интерес к работе, плодотворное участие в дискуссиях и ценные замечания, а также О.И.Репину за помощь при проведении многочисленных измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Железнов В.В., Кочетков В.Ю., Никитин А.В. Влияние видеотракта растрового электронного микроскопа на точность определения размера контролируемого элемента. — Измерительная техника, 1990, № 2, с. 30–31
- Никитин А.В. Растровая электронная микроскопия в субмикронной области. — Электронная промышленность, 1985, вып. 3, с. 41–44.
- L a g g a b e e R.D. Submicrometer Optical Linewidth Metrology. — Proc. of SPIE, 1987, vol. 775, p. 46–50.
- Козлитин А.И., Никитин А.В. Точность измерений линейных размеров в растровом электронном микроскопе. — Известия РАН. Серия физическая, 1993, т. 57, № 9, с. 17–24.
- Monte-Carlo Modeling of Electron Signals from Heterogeneous Specimens with Nonplanar Surfaces/J.C.Russ, Z.J.Radzinski, A.Buczowski, L.Maynard. — J. Comput. Assist. Microscopy, 1990, vol. 2, N 2, p. 59–89.
- Advanced Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis/D.E.Newbury, D.C.Joy, P.Echlin et al. — Plenum Press, New York, 1986, p. 454.

7. Супер-ЭВМ и проектирование интегральных схем/ В.Фитчнер, Л.У.Нагел, Б.Р.Пенуалли, Дж.Л.Петерсон.— ТИИЭР, 1984, т. 72, № 1, с. 116—134.

8. H a s e g a w a S., I i d a Y. Three-Dimensional Monte-Carlo Calculation by Supercomputer.— J. Vac. Sci., Technol. «B», 1987, vol. 5, N 1, p. 142—145.

9. А м м о с о в Р.М., К у з н е ц о в а В.В., Н и к и т и н А.В. Модель формирования РЭМ-изображения образцов с топографическим контрастом.— Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1982, вып. 5—6, с. 129—137.

10. Ж е л е з н о в В.В., К о з л и т и н А.И., Н и к и т и н А.В. Модель формирования РЭМ-изображения объектов с произвольной глубиной рельефа.— Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1988, вып. 4, с. 67.

11. К о з л и т и н А.И., Ж е л е з н о в В.В., Н и к и т и н А.В. Моделирование РЭМ-изображения на основе приближений уравнения Больцмана — альтернатива методу Монте-Карло.— Тезисы докл. VII Межд. конф. по микро-

электронике. Т. 3, Минск, 1990, с. 60—62.

12. А м м о с о в Р.М., К у з н е ц о в а В.В., Н и к и т и н А.В. Характеристики потока вторичных электронов, формирующих видеосигнал в РЭМ.— Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1982, вып. 5—6, с. 43—49.

13. К о з л и т и н А.И., Н и к и т и н А.В., Ж е л е з н о в В.В. Измерение линейных размеров элементов ИС в субмикронном диапазоне по квазиинвариантным точкам.— Тезисы докл. VII Всес. симпозиума по растровой электронной микроскопии (РЭМ-91), Звенигород, 1991, с. 81.

14. N u p p J.W., T u r n e r N.P. The Use of a Novel Image-Shearing Technique on a Scanning Electron Microscope for Comparative Measurement of Linewidth on Photomasks.— Scanning, 1989, vol. 11, p. 213—217.

15. РЭМ-изображение щелевидных субмикронных структур в кремнии/Ю.А.Новиков, А.В.Раков, А.Н.Симонов и др.— Препринт № 26 ИОФАН, М., 1991, 26 с.

## Новый сканирующий туннельный микроскоп и его применение при исследовании молекулярных пленок

В.А.БЫКОВ, А.В.БЕЛЯЕВ, М.Д.ЕРЕМЧЕНКО, В.В.ЖИЖИМОНТОВ,  
А.В.ИКОННИКОВ, С.Ф.КАЦУР, В.В.РЕДЧЕНКО, С.А.САУНИН

Сканирующая зондовая микроскопия открывает возможности исследования поверхностей с атомарным разрешением и позволяет моделировать и исследовать характеристики элементов субмикронных и нанометровых размеров.

Описана конструкция серийно производимого в настоящее время в России сканирующего зондового микроскопа и продемонстрированы его возможности на примере исследования структуры Ленгмюровских пленок органических поверхностно-активных соединений. Прибор имеет функции сканирующего туннельного микроскопа и спектрометра, профилометра, литографа, позволяет исследовать семейства вольт-амперных характеристик системы подложка—кластер—игла.

Управляется от рабочей станции на базе обычного IBM-совместимого персонального компьютера, что значительно снижает его себестоимость по сравнению с аналогичными приборами других компаний.

Программное обеспечение прибора включает в себя как программу управления прибором с функциями быстрой обработки и построения изображений в т.ч. высокоразрешающих модах, так и программный пакет по моделированию СТМ/АСМ — образов отдельных молекул и периодических структур на стандартных поверхностях, что дает возможность интерпретации результатов исследований. Программный пакет по моделированию изображений выполнен в единой оболочке, ориентирован на экспериментатора и не требует специальных знаний в области квантовой химии. Программный пакет включает в себя известные программы моделирования молекул и оригинальные программы расчета волновых функций системы подложка—молекула—игла и построения СТМ/АСМ образов и вольт-амперных характеристик. Данные теоретических расчетов представляются в том же формате, что и данные эксперимента, что дает возможность наглядного сравнения результатов.

В последнее время интенсивно развиваются различные методы исследования поверхности, основанные на применении сканирующего туннельного микроскопа (СТМ). Принцип действия СТМ основан на эффекте туннелирования электронов между зондом и проводящей поверхностью образца. Эти приборы позволяют получать изображения рельефа, исследовать электронную структуру поверхности с высоким разрешением вплоть до атомарного и локально воздействовать на исследуемую поверхность, модифицируя ее. Благодаря уникальным возможностям метода туннельной микроскопии сфера его применения постоянно расширяется, интенсивно разрабатываются новые конструкции СТМ.

В НИИ физических проблем совместно с исследовательской корпорацией МДТ разработан и выпускается новый туннельный микроскоп STM-10-93, который был введен в строй в сентябре 1993 г. До этого времени исследования проводились на микроскопе STM-20-91. Новый прибор отличается существенно большими возможностями и более развитым сервисом. Особенности STM-10-93 являются низкий уровень шумов, малый механический дрейф, возможность воздействия электрическими импульсами на исследуемую поверхность. Измерения могут проводиться как в воздушной, так и в жидкой среде. Все управление прибором осуществляется через компьютер, причем конструкция прибора позволяет разместить измерительный блок в условиях стабильной температуры и малых шумов на значительном удалении (до 20 м) от рабочей станции.

#### Технические характеристики сканирующего туннельного микроскопа STM-10-93

Минимальный шаг сканера	0,13 Å
Поле сканирования (без смещения образца)	3×3×1,5 мкм
Дрейф (при достижении теплового равновесия)	0,5 Å/мин
Максимальные размеры образца	10×10 мм
Диапазон удержания туннельного тока	0,01—10 нА
Диапазон измерения туннельного тока	0,002—50 нА
Минимальный регистрируемый рельеф по нормали к поверхности образца	0,03 Å
Максимальное число точек в одном скане	400×400
Минимальное время регистрации одного байта	125 мкс
Быстродействие АЦП	20 мкс
Возможность дистанционного управления	до 20 м
Литография:	
минимальная длительность импульса	10 мкс
диапазон задаваемых напряжений	—200 — +200 В
дискретность	1 В
точность позиционирования иглы (имеется возможность экспонирования по топологии)	1 Å

В данной конструкции для подвода исследуемой поверхности к игле используется инерциальный пьезодвигатель ("блоха"), на котором закреплен держатель образца (размер образца ~ 10×10 мм). Сканирование осуществляется пьезокерамической трубкой с закрепленной на ней иглой (диапазон сканирования 3×3 мкм). Конструкция измерительной головки позволяет подвести иглу к любому участку образца. Для уменьшения механического дрейфа после смены образца и выбора исследуемого участка все перемещаемые поверх-

ности соприкасаются через три сапфировые опоры. Благодаря этому механический дрейф прибора снизился до 0,5 Å/мин (после достижения теплового равновесия).

Использование дифференциального входа усилителя туннельного тока для компенсации наводок позволило добиться низкого уровня электрических шумов и обеспечить устойчивую работу прибора при малых величинах тока (до 0,01 нА). Применение 18-разрядных цифроаналоговых преобразователей для управления пьезосканером дало возможность снизить минимальный шаг перемещения иглы до 0,13 Å во всем диапазоне сканирования.

Разработанный для управления STM-10-93 и обработки результатов программный пакет MDT-MUI TI-IMAGE v2.0 позволяет выбирать режимы и задавать параметры работы, удобно отображать графическую информацию (изменять масштаб, угол зрения, строить сечения, измерять расстояния и углы и т.д.), обрабатывать результаты измерений различными методами (усреднение, медианная фильтрация, фурье-анализ и др.). Пакет имеет возможность работы в четырехоконном режиме, что дает дополнительные удобства при работе с ним, например, допускает оперативное сравнение изображений.

Прибор позволяет получать информацию о рельефе в режимах постоянного туннельного тока и постоянной высоты иглы с атомным разрешением (рис.1). В режиме спектроскопии можно снимать вольт-амперные характеристики ( $I_t(U)$ ) в выбранных точках, по заданной прямой и по сетке (рис.2). Есть возможность измерения зависимости туннельного тока от расстояния между иглой и поверхностью ( $I_t(Z)$ ). Предусмотрена также возможность подключения внешнего блока для получения двумерных изображений  $\partial I_t / \partial U$  и  $\partial I_t / \partial Z$ , дающих информацию о локальной электронной структуре поверхности и высоте барьера (рис.3). Разработана профилометрическая приставка с СТМ-контролем положения измерительного зонда для получения рельефа поверхности (в том числе и непроводящей) (рис.4).

Для интерпретации экспериментальных результатов создан программный пакет "THEORSTM". Он позволяет теоретически рассчитывать СТМ-изображения различных молекул на подложке, локальную электронную структуру и высоту барьера. Есть возможность интерактивного манипулирования молекулярной моделью внутри экспериментального или теоретического СТМ-изображения. Пакет состоит из:

- программы молекулярного моделирования "MOLECULAR MODELLING" (или обращения к некоторым общеизвестным программам молекулярного моделирования) для выбора или создания молекулярной модели предполагаемого объекта СТМ;

- программы минимизации потенциальной энергии молекулы как целого на подложке — "MINIMIZE MOLECULAR ENERGY ON SURFACE" — для расчета положения молекулы на подложке;

- квантовохимической программы "CALCULATE MOLECULE WAVE FUNCTION" для вычисления волновой функции молекулы методом CNDO/S2;

- программы "BUILD STM IMAGE" для вычисления суммарной волновой функции "молекула + подложка", вычисления теоретического СТМ-изображения модифицированным методом Терцова — Хаммана и построения Ван-дер-Ваальсовского профиля СТМ-системы, а также для построения периодического СТМ-изображения модельной молекулы.

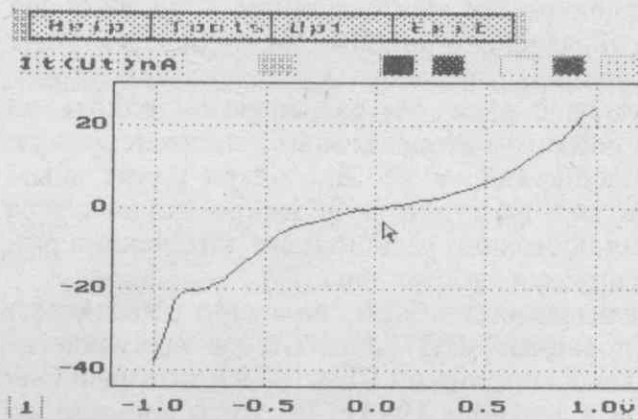
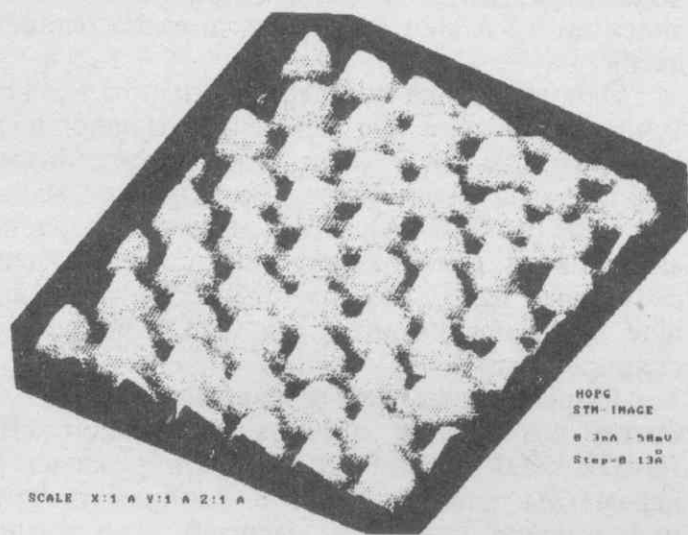


Рис. 1. СТМ-изображение поверхности графита (HOPG) и его вольт-амперная характеристика

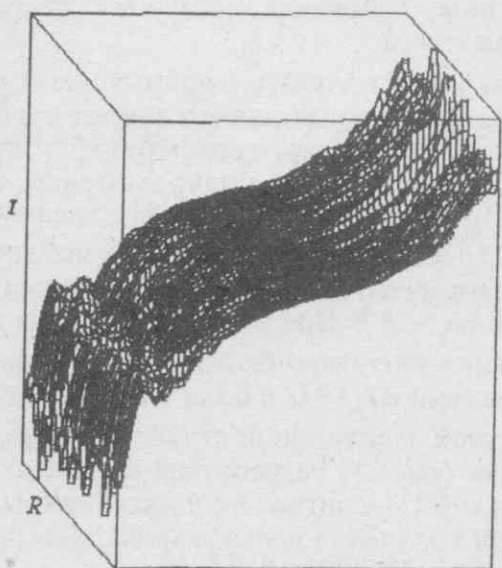
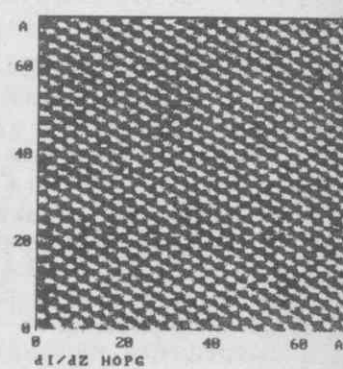
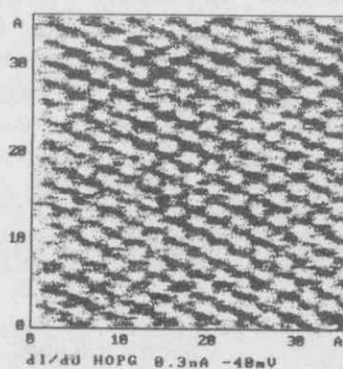


Рис. 2. Семейство вольт-амперных характеристик HOPG, снятых вдоль одной прямой



а

б

Рис. 3. СТМ-изображения поверхности HOPG: а) локальной плотности состояний ( $dI/dU$ ); б) локальной высоты барьера ( $dI/dZ$ )

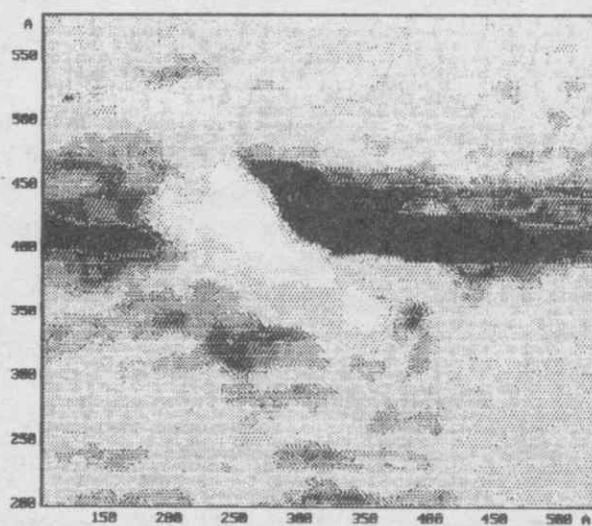
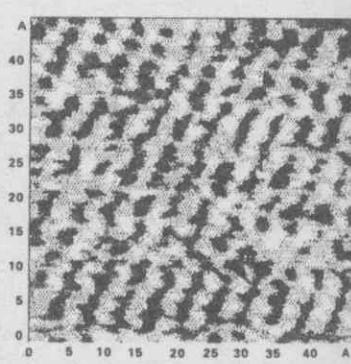
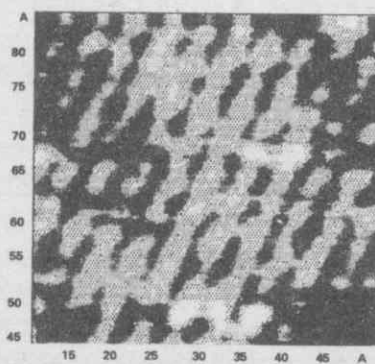


Рис. 7. Результат воздействия литографических импульсов на непolyмеризованную ЛБ-пленку вещества ТГ-5



а

б

Рис. 8. СТМ-изображение проводящей пленки из 20 монослоев соединения  $C_{18}H_{37}$  BEDTTTF на сапфировой подложке (а) и на HOPG (б)

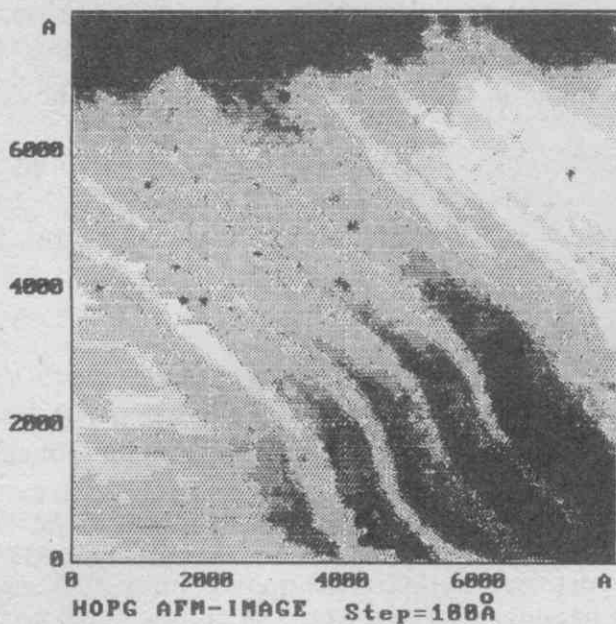


Рис. 4. Рельеф поверхности HOPG, снятый с помощью профилометрической приставки с СТМ-контролем положения зонда

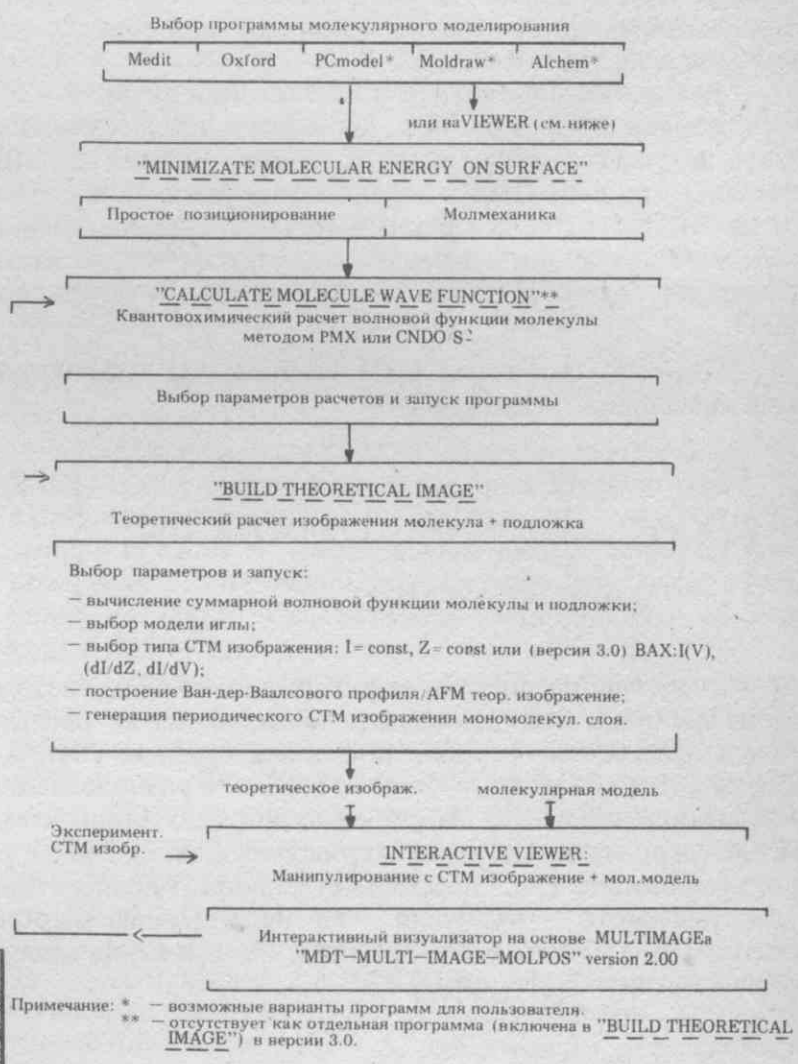


Рис. 5. Схема пакета интерпретации СТМ данных «THEORSTM»

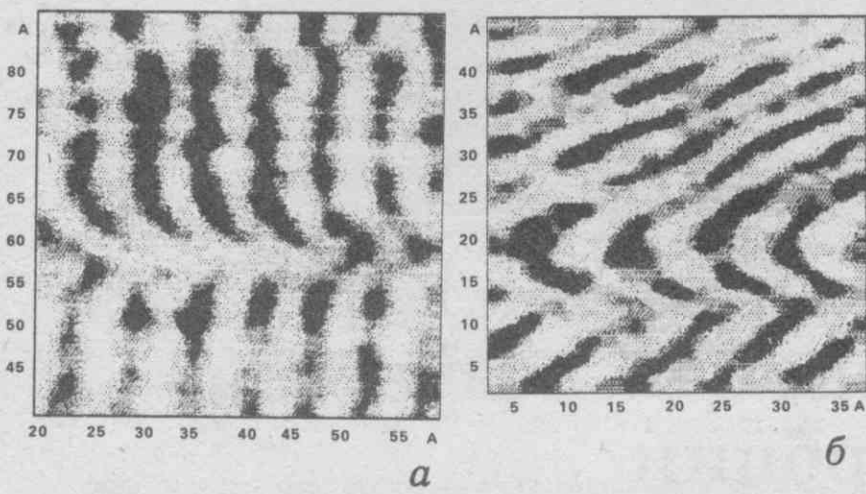


Рис. 6. СТМ-изображение ЛБ-пленки из трех слоев сополимера ТГ-5 до (а) и после (б) облучения ультрафиолетовым светом

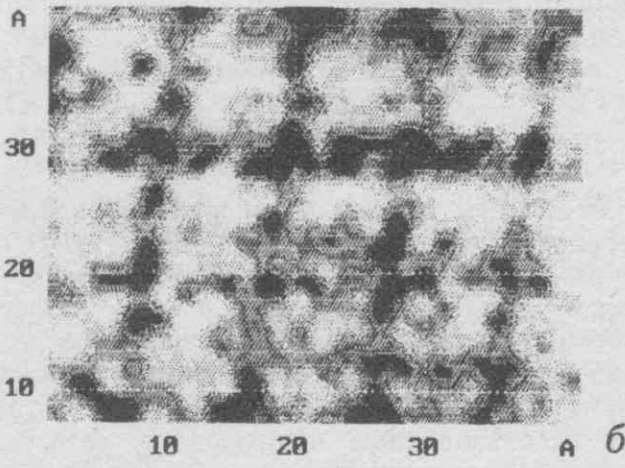
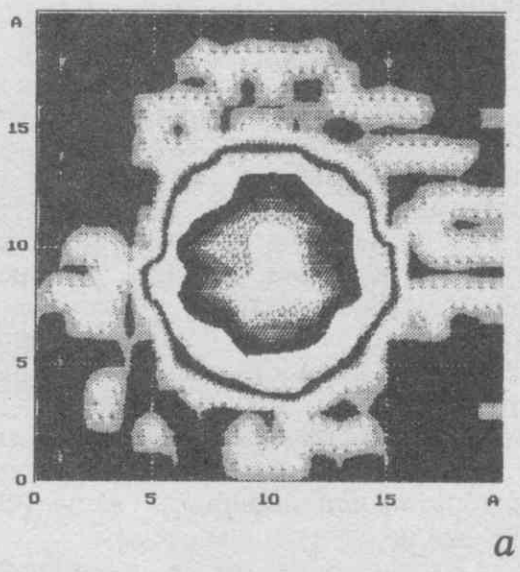


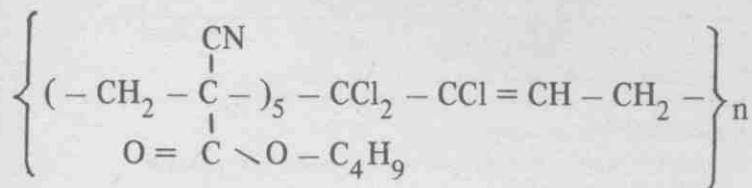
Рис. 9. Теоретическое изображение молекулы C<sub>60</sub> (а) на HOPG и экспериментальное (б) СТМ-изображение ЛБ-пленки на основе C<sub>60</sub>, нанесенной на HOPG

— программы "INTERACTIVE VIEWER" для графического представления и манипуляций с теоретическим или экспериментальным изображениями и молекулярной моделью внутри них.

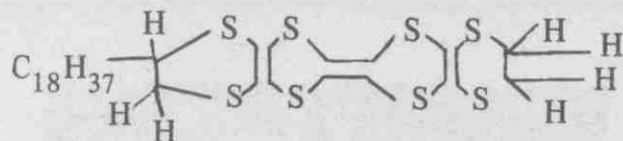
Схема пакета приведена в приложении на рис.5.

Возможности прибора иллюстрируются результатами исследований пленок Лэнгмюра-Блоджетт (ЛБ-пленок), проведенных в отделе молекулярной электроники НИИФП. Пленки были получены с помощью специальной установки нанесения методом Лэнгмюра-Блоджетт LB-4004 MDT, выпускаемой корпорацией МДТ.

На рис.6 показаны СТМ-изображения непроводящей ЛБ-пленки вещества ТГ-5

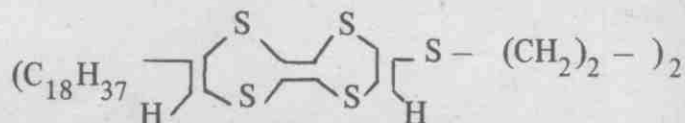


до и после полимеризации ее ультрафиолетовым светом. Молекулярные слои наносились на подложку из высокоориентированного пиролитического графита (HOPG—Highly Oriented Pyrolytic Graphite) с углом разориентации плоскостей менее  $1^\circ$ . На рисунках хорошо видно изменение структуры пленки, являющееся следствием ее полимеризации. Рис.7 показывает результат воздействия электрического импульса на неполимеризованную пленку ТГ-5 (режим литографии). Изображение проводящей пленки  $\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{VEDTTTF}$



на сапфировой (а) и HOPG (б) подложках показано на рис.8.

Были проведены исследования молекул фуллерена  $\text{C}_{60}$ , нанесенных на графитовую подложку ЛБ-методом с помощью поверхностно-активного вещества ПАВ-31



На рис.9 приведены экспериментальное и теоретическое (пакет "THEORSTM") СТМ-изображения молекул  $\text{C}_{60}$  на HOPG.

Результаты исследований показали, что прибор может успешно применяться для изучения атомарной структуры разнообразных проводящих поверхностей, тонких непроводящих пленок на проводящей подложке, для исследований локальных электронных свойств. Кроме того, возможность воздействия электрическими импульсами на выбранные участки поверхности позволяет модифицировать их, например, создавать дефекты проводимости, осаждают атомы иглы на поверхность.

Авторы выражают благодарность ст.науч.сотр. Н.К.Матвеевой за предоставление материалов по ЛБ-резистам и нанесение ЛБ-пленок, ст.инж. Г.А.Тетерник, ст.науч.сотр. В.Р.Новаку и нач. лаб. И.В.Мягкову за помощь в нанесении ЛБ-пленок и обсуждение результатов.

## Исследование методами ВИМС и оже-спектроскопии эффектов десорбции

Б.С.БОРИСОВ, М.К.ЗАЛЯЛЮТДИНОВ, Е.П.КИРИЛЕНКО,  
А.Ю.ТРИФОНОВ

Развитие микроэлектроники в направлении возрастающей интеграции (для ДОЗУ 4М-16М-64М-256М-1Г) и уменьшения размеров элементов (для ДОЗУ 0,8 мкм—0,5 мкм—0,3 мкм—0,2 мкм—0,13 мкм), и тем более переход к нанозлектронике с размерами элементов менее 100 нм выдвигает новые физико-технологические проблемы. Многие из них связаны с проведением фотолитографии с использованием полимерного резиста. Практически на каждом этапе формирования топологического изображения физико-химические явления, происходящие в слое резиста или на границе функциональный слой — резист, приводят к уходу размеров изображения и возникновению различного рода дефектов. Кроме того, многоэтапность процесса обуславливает его высокую трудоемкость.

Поэтому в течение длительного периода проводятся многочисленные исследования по поиску новых методов формирования рисунка или по так называемой безрезистной микролитографии. Основой безрезистной микролитографии является воздействие высокоэнергетичными пучками фотонов, электронов и ионов, которое вызывает сильное локальное изменение физико-химических свойств функционального слоя (например, изменение скорости травления облученного участка по отношению к необлученному). Достаточно полный анализ исследований в этой области дан в монографии [1]. Наиболее значительные результаты получены при использовании лазерного излучения для микролитографии по следующим схемам.

Излучение → газ → твердое тело. Таким мето-

дом проводят осаждение металлической разводки диссоциацией алкилов или карбониллов соответствующих металлов, а также травление путем активации процесса, например, травление кремния хлором за счет диссоциации под лазерным лучом  $\text{SiCl}_2 \rightarrow 2\text{Cl}$ .

Из-за трудностей фокусировки мощного лазерного луча и его рассеяния в газовой фазе, получаемая минимальная ширина металлической шины составляет 2–10 мкм. Процесс реализован в промышленности в так называемых пантографах для производства заказных БИС. Вопрос о его использовании в субмикронной технологии остается открытым.

**Излучение** → **твердое тело**. В этой схеме используется сублимация вещества, прямое испарение материалов, сжигание резиста с наполнением и локальный нагрев, приводящий к изменению структуры материала.

Процессы эти энергоемки (несколько Дж/см<sup>2</sup>), поэтому малопродуктивны и, по-видимому, промышленного значения не имеют за исключением локального нагрева для импульсного отжига пластин.

Использование острогофокусированного пучка электронов высоких энергий позволяет реализовать безрезистную микролитографию. Однако, учитывая, что для создания острогофокусированного электронного луча требуется высокий вакуум и горячий катод, процессы с использованием газовой или жидкой фазы исключаются. Наиболее широко исследован процесс под названием BEER (bombardment enhanced etching rate). Суть процесса заключается в том, что под воздействием высокоэнергетичного электронного луча в облученной локальной области возникают радиационные дефекты и эти области травятся в плазме или жидкостном травителе значительно быстрее, чем необлученные. Обычно соотношение скоростей травления лежит в области 3–5. Однако, большие требуемые дозы облучения (порядка 1 Кл/см<sup>2</sup>), и большая глубина обогащенного дефектами слоя ограничивают применение метода.

В последние годы активно развивается направление исследований [2], которое может придать новый импульс в развитии радиационно-стимулированной микролитографии: это десорбция с поверхности твердых тел, стимулированная электронными возбуждениями (далее – ДСЭВ).

Многочисленные эксперименты проведены по прямой сублимации ионных соединений, например: NaCl, MgF<sub>2</sub>, AlF<sub>3</sub>, LiF и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [3,4,5] острогофокусированным электронным лучом. При ускоряющем напряжении 50 кВ были сформированы детали изображения с минимальным размером на уровне 5–10 нм при дозе 0,1 Кл/см<sup>2</sup>. Такая доза высока и для промышленного использования не перспективна, однако, высокая разрешающая способность метода делает актуальным поиск новых соединений, в которых был бы реализован компромисс между дозой и разрешением. Необходимо отметить, что полная сублимация под электронным лучом может быть частным случаем ДСЭВ. В многокомпонентных веществах может идти преимущественная десорбция одного из элементов и обогащение поверхности остаточными фрагментами. Очевидно, что с точки зрения практического применения ДСЭВ в микроэлектронной технологии наилучшей является ситуация, когда остаточная пленка, образующаяся в результате ДСЭВ, может быть использована для формирования функциональных элементов полупроводниковых приборов. Данный критерий исключает щелочно-галогенидные соединения, так как даже небольшое при-

сутствие щелочных металлов приводит к значительному ухудшению параметров п/п приборов. По-видимому, наиболее перспективные материалы для микролитографии с использованием ДСЭВ следует искать среди соединений благородных или переходных металлов. Возможность прямого "рисования" электронным лучом узора из благородного металла при субмикронном разрешении может компенсировать такие недостатки как относительно высокая доза облучения.

В настоящей работе представлены результаты, полученные при исследовании воздействия электронной бомбардировки на дихлорид палладия.

**Методы исследования**. В работе [6] предлагается условное разделение методов исследования ДСЭВ на две категории:

1. Прямая регистрация десорбирующихся частиц. В настоящей работе в качестве прямого метода исследования использовалась вторично-ионная масс-спектрометрия (ВИМС), позволяющая регистрировать ионы, покидающие поверхность образца при электронной бомбардировке. Исследования проводились на установке IMS-4f фирмы Samco.

2. Детектирование каких-либо изменений свойств поверхности в процессе ее облучения: работа выхода, величины оже-пиков, интенсивности рефлексов картин ДМЭ и т.д. Для изучения изменений состояния поверхности образца под действием электронной бомбардировки использовался растровый оже-спектрометр РНИ-660 фирмы Perkin-Elmer.

ВИМС IMS-4f имеет магнитный секторный масс-сепаратор, обеспечивающий разрешение по массам до 40000, систему регистрации вторичных ионов электронным умножителем, обеспечивающим измерение токов ионов до 10<sup>-19</sup> А, секторный энергетический фильтр, который позволяет получить распределение вторичных ионов по энергии и, наконец, помимо источника первичных ионов, спектрометр IMS-4f снабжен электронной пушкой нормального падения, предназначенной для нейтрализации поверхности образца при ионной бомбардировке. Пушка обеспечивает диаметр пучка 500 мкм при токе электронов 1–2 мкА и дает возможность исследовать выход вторичных ионов при бомбардировке поверхности образца электронами. Однако возможности IMS-4f в плане исследований ДСЭВ ограничены тем, что энергия первичных электронов либо фиксирована и составляет 9 кэВ при регистрации положительных вторичных ионов, либо варьируется в пределах 0–150 эВ в том случае, когда регистрирующая система настроена на отрицательные ионы.

Для практического применения ДСЭВ, очень важно, как изменяется состояние самого образца при бомбардировке электронами. Поэтому основным методом исследования ДСЭВ в настоящей работе является метод оже-спектроскопии, в котором первичный пучок электронов модифицирует поверхность и одновременно позволяет получать информацию о ее состоянии. Оже-спектрометр РНИ-660 фирмы Perkin-Elmer позволяет варьировать энергию первичных электронов от 100 эВ до 25 кэВ, энергоанализатор вторичных электронов типа цилиндрическое зеркало обеспечивает разрешение по энергии до 0,3% и позволяет регистрировать изменения формы оже-пиков. Максимальный ток луча имеет величину порядка микроампера. Луч можно сфокусировать до субмикронных размеров, что обеспечивает большие плотности тока. Острогофокусированный электронный луч постоянно сканирует по исследуемой области, что позволяет записывать оже-спектр поверхности образца и одновременно следить за изображением

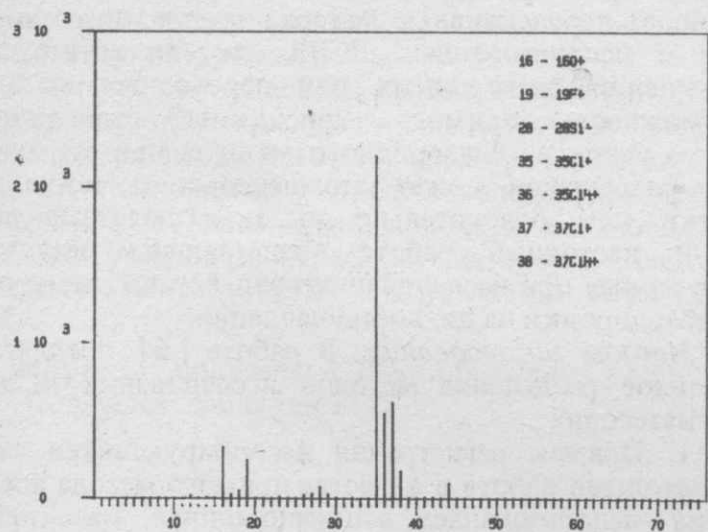


Рис. 1. Масс-спектр ионов, эмиттируемых поверхностью  $\text{PdCl}_2$  при бомбардировке электронами с энергией  $E_p = 9$  кэВ

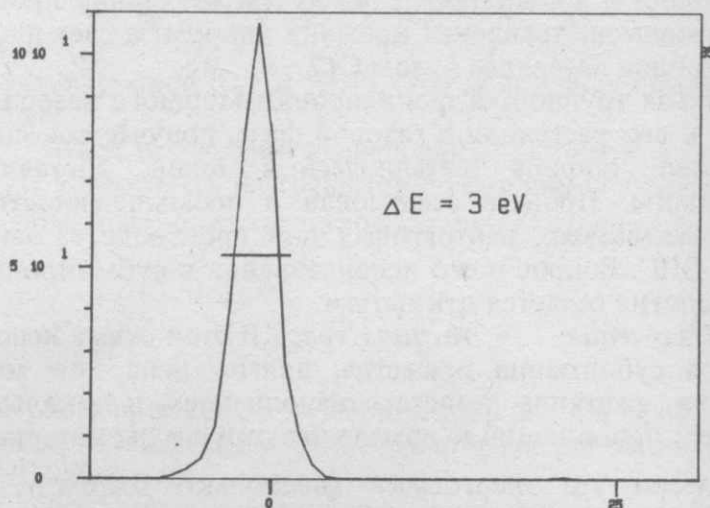


Рис. 2. Энергетическое распределение ионов  $^{35}\text{Cl}^+$ , десорбируемых из  $\text{PdCl}_2$  под электронным лучом с энергией  $E_p = 9$  кэВ

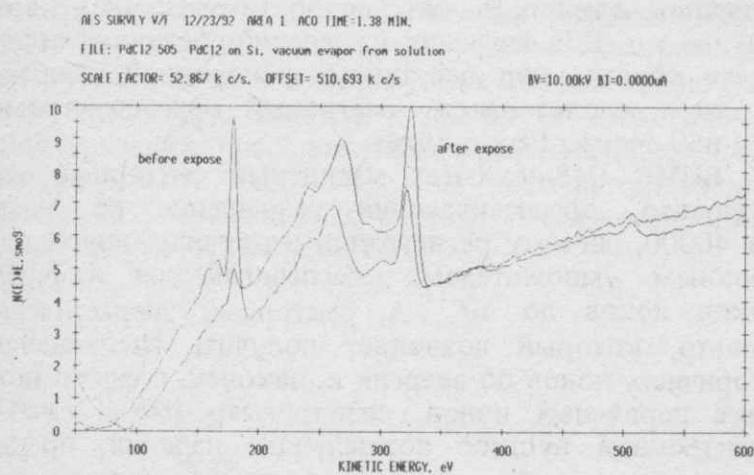


Рис. 3. Интегральные оже-спектры пленки  $\text{PdCl}_2$  в исходном состоянии (кривая 1) и после бомбардировки пучком электронов с энергией  $E_p = 10$  кэВ и плотностью тока  $j = 160$   $\text{mA}/\text{cm}^2$  в течение 10 минут (кривая 2)

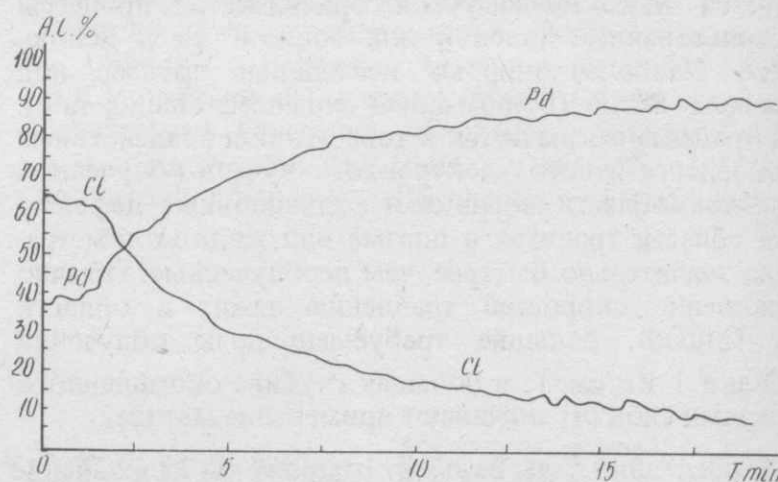


Рис. 4. Зависимость атомной концентрации Pd и Cl от времени экспонирования электронным лучом ( $E_p = 3$  кэВ,  $j = 100$   $\text{mA}/\text{cm}^2$ )

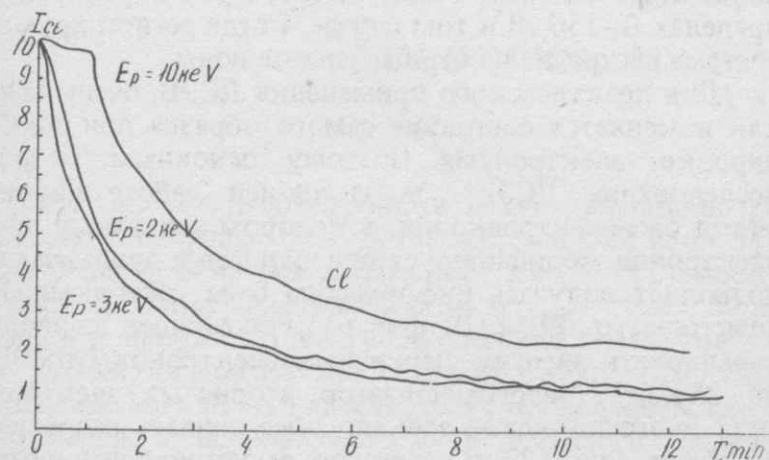


Рис. 5. Зависимость амплитуды дифференцированного оже-пика Cl от времени экспонирования электронным лучом с плотностью тока  $j = 300$   $\text{mA}/\text{cm}^2$  при энергии электронов 10 кэВ, 3 кэВ, 2 кэВ

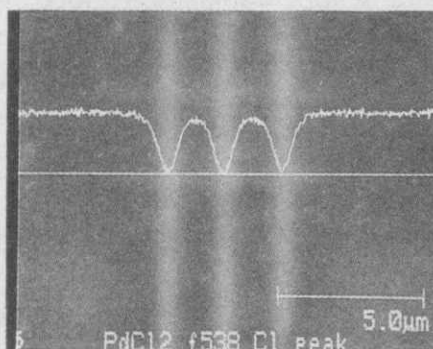


Рис. 6. Фотография во вторичных электронах пленки  $\text{PdCl}_2$  с экспонированными областями. Показана зависимость амплитуды оже-пика Cl от координаты  $x$  при сканировании вдоль горизонтальной линии



исследуемого участка во вторичных электронах на экране монитора. Таким образом можно сопоставлять изменение топографии поверхности с изменением ее химического состава.

В настоящей работе исследовался дихлорид палладия  $\text{PdCl}_2$ , осажденный в виде пленки толщиной порядка 200 ангстрем из водного раствора на поверхность монокристаллического кремния.

Результатами, которые напрямую свидетельствуют о десорбции хлора с поверхности  $\text{PdCl}_2$  под действием электронного луча, являются данные, полученные с помощью ВИМС. На рис.1 представлен масс-спектр положительных ионов, покидающих поверхность образца при бомбардировке электронами с энергией 9 кэВ. Из спектра видно, что наиболее интенсивными являются пики  $35\text{Cl}^+$  и  $37\text{Cl}^+$ . Сигнал от ионов, характерных для поверхностных загрязнений ( $\text{C}^+$ ,  $\text{CH}^+$ ,  $\text{CH}_2^+$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{F}^+$  и т.д.) значительно меньше, это позволяет сделать вывод, что наличие ионов хлора в спектре обусловлено десорбцией из  $\text{PdCl}_2$  под действием электронного луча. Экспериментально установленный линейный характер зависимости тока ионов хлора от тока электронного луча свидетельствует о том, что десорбция Cl имеет электронный, а не тепловой характер. На рис.2 показано энергетическое распределение ионов  $35\text{Cl}^+$ . Распределение имеет вид узкого пика (ширина 3,5 эВ) вблизи нуля, что характерно для ДСЭВ [6]. Для сравнения отметим, что ионы, покидающие поверхность в результате ионной бомбардировки, имеют энергетическое распределение шириной в десятки электрон-вольт.

Исследования  $\text{PdCl}_2$  с помощью растрового оже-спектрометра позволили выяснить, что происходит с поверхностью образца при воздействии на нее электронного пучка. На рис.3 (кривая 1) показан интегральный оже-спектр исходной пленки  $\text{PdCl}_2$ , нанесенной на Si пластину. На спектре присутствуют оже-пики Pd (320 эВ), Cl (181 эВ) и небольшой пик кислорода O (508 эВ). Пик углерода (272 эВ) сливается с одним из пиков палладия и трудноразрешим. Анализ амплитуд пиков Pd и Cl в исходном образце дает значения концентраций 35 и 65 атомных процентов соответственно, что свидетельствует о стехиометрии  $\text{PdCl}_2$ .

Кривая 2 на рис.3 представляет собой оже-спектр той же области образца после бомбардировки электронами с энергией 10 кэВ и плотностью тока  $160 \text{ mA/cm}^2$  в течение 10 минут. Из рисунка видно, что воздействие электронного луча вызывает кардинальное изменение соотношений амплитуд оже-пигов палладия и хлора: пик палладия возрастает по амплитуде в 2 раза, а пик хлора уменьшается более чем на порядок, что свидетельствует о практически полном удалении хлора из экспонированной области. Из сравнения кривых 1 и 2 также видно, что электронная бомбардировка приводит к сдвигу оже-пика Pd в сторону больших энергий на величину порядка 3 эВ и при этом происходит изменение формы оже-пика Pd, что свидетельствует об изменении химического состояния атомов палладия.

Исследуя изменение амплитуд оже-пигов Pd и Cl при постоянном воздействии электронного луча, можно построить временную зависимость концентраций этих элементов на поверхности образца. На рис.4 приведены зависимости атомных концентраций палладия и хлора от времени бомбардировки пучком электронов с энер-

гией 3 кэВ и плотностью тока  $100 \text{ mA/cm}^2$ . Из рисунка видно, что в течение 1–2 минуты изменения состава пленки  $\text{PdCl}_2$  не происходит. Затем кривые имеют резкий излом, и начинается обеднение поверхности хлором. Через 20 минут бомбардировки концентрация хлора не превышает 10 атомных процентов.

Для того, чтобы выяснить, как влияет энергия первичных электронов на характер ДСЭВ  $\text{PdCl}_2$  было исследовано изменение состава  $\text{PdCl}_2$  под действием электронного луча плотностью  $300 \text{ mA/cm}^2$  с энергией 10 кэВ, 5 кэВ и 3 кэВ и 2 кэВ. На рис.5 приведены временные зависимости амплитуды оже-пика хлора для трех энергий электронного луча: 10, 3, и 2 кэВ (кривая, соответствующая ускоряющему напряжению 5 кэВ практически совпадает с кривой 2 кэВ и на рисунке не показана). Из сравнения кривых 1–3 очевидно, что наиболее быстро изменение состава (т.е. обеднение Cl) происходит при энергии луча 3 кэВ.

Оже-спектрометр РН1-660 имеет цифровую систему развертки электронного луча. Это позволяет направить электронный луч в заданную точку образца и удерживать его там необходимое время, проводя при этом анализ спектра вторичных электронов. Это дает возможность задать экспонируемую область произвольной конфигурации. Запуская затем сканирование по полному растру можно получить изображение исследуемой области во вторичных электронах и сравнить морфологию экспонированных областей с исходной пленкой  $\text{PdCl}_2$ . На рис.6 приведено изображение участка образца, содержащего три экспонированных области в виде вертикальных полос (время экспонирования каждой полосы – 20 мин. при энергии электронов 10 кэВ и токе 10 нА). На рисунке показан также результат последующего измерения амплитуды оже-пика Cl при сканировании электронного луча вдоль горизонтальной прямой, перпендикулярной к экспонированным линиям. Из фотографии видно, что облученные электронами области сильно обеднены хлором и выглядят на изображении однородными и более светлыми, что свидетельствует о более высокой вторично-электронной эмиссии. Ширина полос составляет 0,5 мкм.

Необходимо особо отметить однородность палладиевой пленки, которая образовывалась в наших экспериментах в результате ДСЭВ в тонких (порядка 200 Å) пленках  $\text{PdCl}_2$  на кремниевой подложке. При увеличении до  $\times 10000$  дендритная или островковая структуры в Pd пленке обнаружены не были.

Основные результаты экспериментального исследования воздействия электронной бомбардировки на дихлорид палладия можно сформулировать следующим образом:

1. Обнаружена десорбция Cl с поверхности  $\text{PdCl}_2$  при воздействии электронного луча (десорбция, стимулированная электронными возбуждениями – ДСЭВ).
2. Установлено, что скорость десорбции Cl из  $\text{PdCl}_2$

зависит от энергии первичных электронов и имеет максимум при энергии вблизи 3 кэВ.

3. Обнаружено, что электронная бомбардировка  $\text{PdCl}_2$  вызывает сдвиг оже-пика Pd в сторону больших энергий на величину несколько электронвольт и изменение формы пиков.

4. Продемонстрировано, что при помощи электронного луча возможно создание в  $\text{PdCl}_2$  областей, обедненных Cl и обогащенных Pd, имеющих субмикронные размеры.

Возможность прямого "рисования" электронным лучом металлических областей открывает широкие перспективы в плане субмикронной технологии, особенно, если учесть, что Pd — высокотехнологичный материал и может быть использован не только в качестве резиста но и для формирования целого ряда деталей полупроводниковых приборов: от металлической разводки до затворов полевых транзисторов.

Необходимо отметить, что в литературе имеются данные о создании проводящих областей микронных размеров в пленках PdCl<sub>2</sub> на полиамидной основе с помощью облучения ионами Kr, Xe с энергиями 250—400 кэВ [7]. Облучение ионами таких энергий вряд ли применимо в микроэлектронной технологии.

В то же время, ДСЭВ, как литографический процесс, обладает очень важным достоинством: процессы ДСЭВ отличаются низкими энергетическими порогами, десорбция, как правило, начинается при энергии возбуждающих электронов от единиц до сотен электронвольт [6]. Это означает отсутствие дефектов, создаваемых электронным лучом в подложке во время литографии. Появившиеся в последнее время электронно-оптические системы [8], которые позволяют сфоку-

сировать до 200 нм электронный луч с энергией 1 кэВ в сочетании с литографическим процессом на основе ДСЭВ могут позволить выйти на принципиально новый уровень в развитии нанотехнологии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мороз У.— Микролитография, ч. 1, М., Мир, 1990.
2. DIET I—IV Springer Series in Surface Sci.
3. Broers A.N., Cuomo J.J., and Krakow W.— IBM Tech. Disclosure Bull., 1981, Vol. 24, p. 1534.
4. Isaakson M. and Muray A.— J. Vac. Sci. Technol., 1981, Vol. 19, p. 1117—1120.
5. Kratschmer E. and Isaakson M.— J. Vac. Sci. Technol., 1986, Vol. B4, p. 361—364.
6. Агеев В.Н., Бурмистрова О.П., Кузнецов Ю.А.— УФН, 1989, т. 158, с. 389—420.
7. Eskildsen S.S. and Sorensen G.— Nucl. Instr. and Meth., 1985, Vol. B7/8, p. 481—486.
8. Ватанабэ Т., Ваатаке Т., Кадога К., Саито С., Ямада М. Электронно-лучевые методы контроля и измерения для оценки полупроводниковых технологий. Фирма Хитахи.

## Оперативный контроль технологических сред и поверхностей полупроводников

(СОСТОЯНИЕ РАБОТ)

С.М.БЕЗРУЧКО, С.В.КУЗЬМИН, С.А.САУНИН,  
Ю.М.АБРАМЕНКО, С.М.КУЗЬМИН

Для освоения технологии микроэлектроники с уровнем 1 мкм необходимы оперативные, прецизионные методы и средства анализа и контроля жидких и газообразных технологических сред, анализа и контроля качества поверхности полупроводниковых пластин.

Разработанные и находящиеся в стадии разработки методы и средства контроля по техническим параметрам и функциональным возможностям не уступают лучшим зарубежным достижениям в этой области, а по ряду позиций превосходят их.

#### МЕТОДЫ И АППАРАТУРА АНАЛИЗА И КОНТРОЛЯ ЖИДКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД — ДЕИОНИЗОВАННОЙ ВОДЫ, ФОТОРЕЗИСТОВ, РАСТВОРИТЕЛЕЙ, ПРОЯВИТЕЛЕЙ, КИСЛОТ, ЩЕЛОЧЕЙ, МОЮЩИХ СРЕДСТВ

По мере повышения степени интеграции ИЭТ и приближения к субмикронным размерам элементов схем, проблема чистоты технологических сред и бездефектности полупроводниковых пластин становится одним из определяющих факторов в технологическом процессе.

Установлено, что, примерно, 70% отказов ИЭТ вызвано загрязнениями, вносимыми на пластины из технологических сред и воздушной среды, 20% — дефектами полупроводникового материала.

Основными вредными примесями в жидких технологических средах являются: микрочастицы, органические и биологические примеси.

До уровня 2-х микронной технологии микрочастицы определялись визуально (что позволяет наблюдать размеры от 1,5 до 2 мкм) и под микроскопом. Органические примеси аналитическим путем — по бихроматной окисляемости и бактерии выращиванием фильтрата на питательной среде (анализ до 72 часов).

Предложенные в разделе методы и аппаратура анализа и контроля технологических сред позволяют сделать резкий качественный скачок в технологии микроэлектроники, широко использовать методы и аппаратуру во многих отраслях народного хозяйства: химическая промышленность, медицина, фармакология, топливно-энергетическая промышленность, пищевая промышленность, экология и др. отрасли.

#### Приборы для измерения концентрации микрочастиц в жидкостях и газах

Принцип действия приборов основан на прокачивании исследуемой жидкости или газа через лазерный луч. Частицы, находящиеся в жидкости или газе, проходят через лазерный луч по одной. Каждая частица при прохождении через луч вызывает импульс рассеянного излучения, который регистрируется фотоприемным устройством. По частоте следования этих импульсов

можно судить о концентрации измеряемых частиц, а по амплитуде импульсов — о размерах этих частиц.

**Прибор ЛАМ-4** (лазерный анализатор микрочастиц) предназначен для определения содержания частиц в воде, растворителях, кислотах (в том числе HF), щелочах и т.д. В приборе жидкость контрактирует только с фторопластом и сапфиром. Прибор измеряет концентрацию частиц одновременно в шести диапазонах размеров: 0,3–0,5 мкм; 0,5–0,75 мкм; 0,75–1 мкм; 1–5 мкм; 5–30 мкм; 0,3–30 мкм. Диапазон измеряемых концентраций частиц:  $1-10^5$  частиц/см<sup>3</sup>. Автоматическая калибровка прибора перед каждым измерением.

Работа может осуществляться в трех режимах: режиме ручного управления; повторяющихся измерений через заданную паузу; работы с управлением от ЭВМ IBM PC. Размеры прибора: 2 блока 470x480x170; масса прибора — 25 кг.

По техническим характеристикам наиболее близким к прибору ЛАМ-4 является прибор IMO LVS фирмы PMS Inc., стоимость которого составляет 40000 долларов.

**Прибор ЛАМ-7** предназначен для измерения содержания частиц в воде и неагрессивных жидкостях. Прибор отличается повышенной чувствительностью и позволяет измерять концентрацию частиц одновременно в следующих шести диапазонах размеров: 0,11–0,2 мкм; 0,2–0,3 мкм; 0,3–0,5 мкм; 0,5–1 мкм; 1–30 мкм; 0,11–30 мкм.

Диапазон измеряемых концентраций  $2-10^5$  частиц/см<sup>3</sup>.

Автоматическая калибровка прибора перед каждым измерением.

Работа прибора может осуществляться в трех режимах:

- режим ручного управления,
- режим повторяющихся измерений,
- режим работы с управлением от ЭВМ IBM PC.

Прибор может работать в режиме отбора проб в отдельную емкость, а также в режиме встраивания в водопроводную магистраль.

Размеры прибора: два блока 370x500x120 мм.

Масса прибора — 25 кг.

**Прибор ЛАМ-8** предназначен для измерения концентрации частиц в воде и агрессивных жидкостях (включая HF) с повышенной чувствительностью.

Технические параметры прибора ЛАМ-8 полностью совпадают с параметрами прибора ЛАМ-7 за исключением того, что в приборе ЛАМ-8 измеряемая жидкость контактирует только с сапфиром и фторопластом. Кроме того, минимальный размер измеряемых частиц для некоторых сильно рассеивающих жидкостей составляет 0,12 мкм, а не 0,1 мкм.

Аналог прибора ЛАМ-8 неизвестен.

#### Анализ и контроль микрочастиц в воздушной среде и технологических газах

**Прибор ЛАМ-9** предназначен для определения содержания частиц аэрозоля в помещениях и газовых магистралях (неагрессивные газы).

Прибор отличается высокой чувствительностью и скоростью измерения. Наибольшая масса прибора (до 10 кг) позволяет легко переносить или переводить прибор внутри помещения. Прибор запоминает 100 последних результатов измерения и хранит их в течение года. После проведения измерений прибор может быть переключен к ПЭВМ IBM PC и данные об измеренных концентрациях и временах измерения могут быть переданы

в ПЭВМ. Программы для ПЭВМ, позволяющие легко создавать и просматривать базу данных, представлять результаты измерений в виде графиков, и т.п. также включаются в комплект поставки.

Технические данные прибора:

концентрация частиц измеряется одновременно в девяти диапазонах размеров 0,1–0,2; 0,2–0,3; 0,3–0,5; 0,5–1; более 1; более 0,1; более 0,2; более 0,3; более 0,5 мкм;

за 1 мин измеряется количество частиц, находящихся в 28 литрах газа;

диапазон измеряемых концентраций частиц  $2 \cdot 10^{-2} - 10^5$  частиц в литре.

Прибор автоматически калибруется перед каждым измерением, работает как в режиме ручного управления, так и под управлением от ПЭВМ.

**Прибор ЛАМ-10** предназначен для определения концентрации частиц в воде и неагрессивных жидкостях.

Прибор отличается высокой чувствительностью, небольшими размерами и весом, что позволяет легко подносить (подвозить на тележке); прибор подключается непосредственно к отводу от магистрали и проводит измерение. Тем самым устраняется погрешность измерения, вносимая пробоотбором в отдельную тару.

После проведения всех измерений в цехе, прибор может быть транспортирован и подключен к ПЭВМ IBM PC и данные о концентрации частиц во всех измеренных точках и временах измерения переданы в ПЭВМ, где осуществляется хранение и удобное представление результатов измерений.

Технические характеристики прибора ЛАМ-10 следующие:

Прибор проводит измерение концентрации частиц одновременно в девяти диапазонах размеров: 0,12–0,2 мкм; 0,2–0,3 мкм; 0,3–0,5 мкм; 0,5–1 мкм; более 1 мкм; более 0,12 мкм; более 0,2 мкм; более 0,3 мкм; более 0,5 мкм.

Диапазон измеряемых концентраций частиц  $1-10^5$  частиц/см<sup>3</sup>.

Перед каждым измерением прибор автоматически калибруется.

При каждом измерении происходит автоматическое измерение объема пробы, вычисляется концентрация частиц во всех диапазонах.

Даже при отключенном питании прибор помнит и впоследствии может передать в ПЭВМ данные о концентрациях и времени ста и последних измерений.

Сведения об аналогах прибора ЛАМ-10 отсутствуют.

**Системы датчиков на базе прибора ЛАМ-9 и ЛАМ-10** устанавливаются в местах, где они производят непрерывные измерения концентрации частиц в жидких и газообразных средах. Приборы ЛАМ-9 и ЛАМ-10 в количестве 32 шт. связаны с устройством коммутации, передающем данные о концентрации, времени измерения и номере прибора в ПЭВМ IBM PC, где данные анализируются и хранятся в виде базы данных.

#### Комплекс приборов и методов для экспресс-определения органических примесей в воде и водных растворах

Предназначен для контроля чистоты любых типов вод (от промышленных и бытовых стоков до особо чистой деионизованной воды), а также различных реактивов, препаратов и материалов, путем анализа водных растворов, смывов и экстрактов из них. Применим для решения научных и научно-производственных задач

в технологии микроэлектроники, экологии, медицине и т.д. и является нестандартизованным средством измерения.

В комплекс входят приборы Тензиометр Т-1, предназначенный для определения поверхностно-активных веществ, электрохимический анализатор растворимой органики АРО-1 и методика дифференцирования органических веществ на фракции.

В приборе Т-1 впервые реализован принцип определения объемной концентрации поверхностно-активных веществ (ПАВ) и дифференцирования их на фракции по изменению поверхностного натяжения ( $\delta$ ) на динамической площади поверхности ( $S$ ) раздела фаз жидкость-воздух.

Анализируемая проба (250 мл), без какой-либо предварительной обработки, вносится в кольцевую фторопластовую ванну прибора и через заданное время ожидания приводится в движение барьер. Барьер концентрирует монослой ПАВ на поверхности раствора в область  $S$ , где расположен датчик  $\delta$  (пластинка Вильгельми). Величины  $\delta$  и  $S$  преобразуются в электрические сигналы электромагнитными весами и специальным резистом, соответственно. Регистрирующим устройством служит цифровой вольтметр. При достижении заданной величины  $S$ , барьер автоматически останавливается и на табло вольтметра фиксируется конечное изменение  $\delta$  ( $\Delta\delta$ ) в мВ. Предусмотрены также режимы измерения  $S$  при заданном изменении  $\Delta\delta$  и измерение  $\delta$  методом отрыва пластинки, позволяющие определять ПАВ от сверхнизких концентраций до ККМ.

Определение проводится по калибровочным кривым или таблицам. Для исследования поверхностно-активных свойств ПАВ и дифференцирования их на фракции предусмотрена запись на самописец кинетик сжатия ( $\Delta\delta-S$  изотермы), растворения ( $\Delta\delta(t)$ ) и растяжения ( $\Delta\delta(S)$ ).

В приборе АРО-1 реализован принцип определения содержания органических веществ и дифференцирование их на легко, средне и трудно окисляемые фракции методом импульсной полярографии в сочетании с электрохимическим окислением на платиновом электроде.

Прибор состоит из электрохимической ячейки и электронного блока. В ячейку (стеклянный бюкс на 15 мл) опущены рабочий платиновый (РЭ), вспомогательный (ВЭ) и стандартный хлор-серебряный (СЭ) электроды. Электронный блок формирует напряжения заданной амплитуды и последовательности во времени на РЭ относительно СЭ, а ВЭ включен в измерительную цепь. Измеряемым параметром является величина  $O$ , равная изменению (в %) суммарного тока полярографической волны ( $I_0$ ) после адсорбции органики на чистую поверхность РЭ.

Анализируемая проба в ячейке подкисляется серной кислотой до рН=0. Измерение протекает в автоматическом режиме. В первые 100с происходит очистка РЭ импульсами 1,6–1,8 В и измеряется  $I_0$  чистого электрода. После заданного времени адсорбции при 0,4В, измеряется  $O_0$ , характеризующее общее содержание органики в растворе. Адсорбированная органика окисляется вначале импульсом  $\sim 0,9$  В (потенциал окисления перманганата), измеряется  $O_1$ , характеризующая сумму средне и трудно окисляемых фракций, а затем импульсом  $\sim 1,3$  В (потенциал бихромата) и измеряется  $O_2$ , характеризующая трудно окисляемую фракцию. Измеренные  $O$  снимаются с табло прибора.

Сравнительные характеристики параметров приборов Т-1 и АРО-1 с приборами зарубежных фирм

Параметр	Тип прибора		
	Т-1	АРО-1	ДС-80; М-700; А-100; С-1000; С-1100;
Чувствительность (нижний предел концентраций), ррб	1	25	1*; 20**
Погрешность измерения, %	10	5	1*; 20**
Диапазон измеряемых концентраций, ррб	1–10000	50–10000	1–10000
Время одного анализа, мин	3	3–10	1,5–3
Метод, положенный в основу работы прибора	Прямой, определяет известный класс веществ (ПАЕ)	Прямой, определяет классы веществ по окисляемости	Косвенный: вещества разлагаются УФ до $CO_2$ , который определяют кондуктометром или ИР-детектором
Требования к образцу	Не требуется никакой предварительной подготовки	В образец добавляется кислота $H_2O_4$ (In)	Добавка персульфата, не допускается наличие пузырьков и микрочастиц меньше 50 мк, продувка пробы чистым нейтральным газом, проводимость образца должна быть больше 0,05 МОм·см
Масса, кг	16	5	$\sim 16$
Режим работы	Стационарный	Стационарный	Стационарный, проточный
Цена (т.долл.)	7	5,7	30–60

\* — по рекламным проспектам;

\*\* — по результатам заводских испытаний. Средняя трудоемкость изготовления приборов Т-1 и АРО-1 — 900 н/ч.

Определение проводится по калибровочным кривым или таблице. Методика дифференцирования содержит банк данных по поверхностно-активным свойствам и окисляемости эталонных веществ и перечень операций при дифференцировании органики на фракции и оценочной их идентификации. С этой целью для компьютера IBM PC разработана программа, которая может поставляться заказчику отдельно.

**Наборы для флуоресцентно-микроскопического определения микроорганизмов в жидкостях, газах и на твердых поверхностях на 3 тысячи анализов**

Разработан общий подход к осуществлению указанных определений. Принцип состоит в визуализации

микроорганизмов на твердой поверхности путем флуорохромирования и наблюдения под люминесцентным микроскопом. При определении на твердой поверхности используется сам объект, при определении в жидкостях и газах мембранные фильтры, на поверхность которых нанесены микроорганизмы путем фильтрования исследуемой жидкости или газа. Последовательность операций: фильтрование пробы через мембранный фильтр (в случае жидкости или газа); флуорохромирование осажденных микроорганизмов; отмывка контрастирующим буфером; микроскопирование и подсчет микроорганизмов; вычисление по формуле.

Технические данные (ориентировочно): время определения — 25 мин.; минимальная определяемая концентрация: в жидкости — 0,02 шт./мл; в газе — 1,0 шт./л; на поверхности — 0,04 шт./мм. Погрешность измерений не более 10%, ограничение применения: не анализируются рассматриваемым методом сильно загрязненные жидкости и газы, забивающие при фильтровании фильтр, если концентрация микроорганизмов значительно меньше концентрации забивающих частиц.

Содержание набора (ориентировочно): инструкция (методика), таблетки красителей, контрастирующий буфер, мембранные фильтры, аппараты для микрофильмирования образцов и рабочих растворов.

Наборы поставляются адаптированными к конкретному объекту анализа. Применяются в электронной промышленности, водоснабжении, санитарном контроле, экологическом мониторинге.

Аналогом служит "Eryu Count" — набор приборов для быстрого подсчета микроорганизмов в жидкостях, фирмы "Миллипор", США на 50 анализов.

Ориентировочная стоимость набора для определения микроорганизмов 300 долл.

## АППАРАТУРА ДЛЯ АНАЛИЗА И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ П/П ПЛАСТИН

Дефектность пластин является одной из основных причин низкого выхода годных микронизированных изделий из-за разрушающего влияния дефектов самих полупроводниковых подложек и микрочастиц на поверхности. В условиях перехода на субмикронную технологию производства схем актуальным становится необходимость контроля за содержанием дефектов размерами порядка 0,1 мкм. Осуществляемый во многих случаях визуальный контроль пластин не соответствует необходимой точности и чувствительности. Оптическая микроскопия также не обеспечивает необходимого разрешения для надежного контроля микродефектов субмикронных размеров, применение для этих целей электронных микроскопов дорого, требует специального приготовления образцов, не позволяет проводить анализ всей поверхности пластины. В этой связи самым подходящим оказывается контроль дефектности поверхности пластин (или других плоских материалов) методом лазерного сканирования исследуемой поверхности и регистрации рассеянного дефектами света. Поскольку свет рассеивается на любых неоднородностях приповерхностного слоя, куда проникает свет лазера, то этим способом можно контролировать не только микродефекты внешней поверхности (микрочастицы, царапины, выколы, пятна, остаточную шероховатость и т.п.), но и скрытые дефекты под поверхностью в слое порядка нескольких микрон (заполированные царапины, микропустоты, структурные неоднородности самого материала, вплоть до локальных несовер-

шенств кристаллической структуры полупроводника). Простота возможности фокусировать лазерный луч в малое световое пятно позволяет с высоким пространственным разрешением исследовать дефектность поверхности. Кроме того — бесконтактность метода и неразрушающее его влияние на поверхность образца, высокая скорость анализа, возможность автоматизации процесса контроля — все это делает указанный метод наиболее перспективным инструментом анализа дефектности поверхности полупроводниковых пластин и других материалов.

*Лазерный анализатор поверхности (ЛАП-3)* — установка для автоматизированного неразрушающего контроля дефектности поверхности полупроводниковых пластин диаметром 100–200 мм с чувствительностью не хуже 0,15 мкм.

Отечественная серийно выпускаемая аппаратура с требуемыми параметрами отсутствует. Известны зарубежные средства контроля, среди которых наибольшее распространение получили модели SUPERCAN фирмы TENCOR INS. США [2]. Указанные приборы обладают чувствительностью 0,2 мкм и высокой степенью автоматизации процесса контроля. Стоимость модели "Сурфскан-4500" США — 350000 долл. Предлагаемая к разработке установка контроля дефектности по своим параметрам не будет уступать данному аналогу.

Внедрение прибора ЛАП на предприятиях электронной промышленности позволит осуществлять оперативный неразрушающий контроль дефектности полупроводниковых пластин кремния или арсенида галлия с чувствительностью 0,15 мкм и возможностью автоматической разбраковки пластин согласно задаваемым уровням дефектности. Указанный прибор позволит, кроме того, оптимизировать технологию химической отмывки пластин, провести аттестацию технологического оборудования на привносимую дефектность, и даже осуществлять прецизионный контроль запыленности локальных участков чистых зон и производственных помещений. Все это, вне сомнения, позволит в конечном счете повысить уровень выхода годных изготавливаемых изделий, повысить эффективность использования различного технологического оборудования, усовершенствовать многие операционные этапы изготовления интегральных схем.

Конструктивно лазерный анализатор будет состоять из единого измерительного блока, предназначенного для работы в чистых производственных помещениях, и управляющей ЭВМ типа IBM PC/AT. Загрузка измеряемых пластин производится путем установки стандартной технологической кассеты с пластинами в измерительный блок ЛАП. Весь дальнейший процесс измерения осуществляется полностью автоматически. Робот-манипулятор извлекает последовательно пластины из кассеты и устанавливает их на измерительном столике. Далее путем вращения и одновременно перемещения пластины производится сканирование ее поверхности лазерным лучом, при этом дефекты рассеивают свет и регистрируются фотоэлектронной системой. Одновременно на дисплее РС строится цветное изображение поверхности, где цвет дефекта отражает его эффективный размер. По окончании измерения в зависимости от уровня дефектности манипулятор осуществляет автоматическую (или по указанию оператора) разбраковку пластин по двум кассетам (включая установленную для измерения кассету).

Два главных режима измерения — режим частиц и режим фона. Режим и его параметры задаются с пульта

ЭВМ перед измерением или устанавливаются автоматически после включения. Предусмотрена возможность масштабирования изображения от полного до квадрата 2x2 мм, сохранение изображений и других данных на магнитном диске, последующее их извлечение на дисплей для просмотра или сравнения различных изображений, построение гистограммы распределения дефектов по размерам и т.п.

Прибор осуществляет автоматическую калибровку усилительного тракта перед измерением каждой пластины. Абсолютная калибровка осуществляется при настройке прибора с помощью тестовой пластины с нанесенным на нее латексом 0,2 мкм. Максимальная чувствительность 0,15 мкм обеспечивается только для пластин с низким значением фонового рассеяния поверхности подложки.

Прибор имеет собственную систему пылезащиты для снижения уровня запыленности внутри прибора.

Время измерения одной 100 мм пластины кремния в зависимости от режима измерения — 1–2 мин.

#### Технические параметры установки ЛАП:

чувствительность	— 0,15 мкм
диаметр пластин	— 100–200 мм
производительность	— 60 шт/час
режим измерения	— частицы—фон
воспроизводимость	— 3%
калибровочный стандарт	— латекс 0,2 мкм
пространственное разрешение	— 50 мкм
габариты	— 1100x830x680 мм
примерная стоимость	— 50–90 тыс.долл.

#### Расширение функциональных возможностей

Возможна переделка прибора для анализа дефектности поверхности жестких магнитных дисков для накопителей типа "Винчестер" или оптических дисков. При этом можно обеспечить одновременный контроль обеих сторон диска, сохранять полученные изображения и другие данные для последующего сравнения. Помимо контроля готовой продукции применение такого прибора позволит отработать технологию полировки металлических или стеклянных заготовок, нанесение последующих магнитных или диэлектрических слоев и т.п.

Конструктивная модификация узла сканирования прибора позволяет применить его для автоматизированного контроля дефектности любых плоских поверхностей высокой чистоты обработки с чувствительностью порядка 0,2 мкм. Размер плоской части объекта в пределах 300x300 мм, толщина до 50 мм. Сканирование плоскости осуществляется лучом лазера с фокусным пятном порядка 100 мкм, однако сам объект в этом случае не вращается, а совершает только равномерное поступательное перемещение. Загрузка ручная, скорость анализа порядка 50 мм/мин. Данные аналогичным образом обрабатываются на ЭВМ типа IBM PC/AT, результатом анализа является цветное изображение поверхности на мониторе РС.

Данная модификация может найти применение для контроля дефектности фотошаблонов, всевозможных диэлектрических или металлических пленок или слоев на стекле, пластинах и т.п., для контроля качества или выявления тонкой текстуры различных полированных материалов.

## Особенности обработки экспериментальных данных при высокоточных измерениях

А.Д.АНТОНЮК, А.Г.ДЬЯЧЕНКО, В.А.СКОРИК

**Учет погрешностей, обусловленных нелинейностью преобразователей и корреляционными связями, позволяет оптимизировать число измерений и планы проведения экспериментов.**

Создание электронных устройств, использующих последние достижения технологии и новые физические принципы их построения, однозначно связано с параллельным решением ряда метрологических задач, которые либо возникают при проведении фундаментальных исследований, либо в большом объеме проявляются на этапе аттестации технологических процессов и контроля качества изделий [1, 2]. Две указанные области метрологических интересов связаны с различными по характеру проявления метрологических параметров объектами. Вместе с различиями мет-

рологического подхода к фундаментальным исследованиям и серийному производству математический аппарат, используемый для статистической обработки результатов измерений и испытаний, один и тот же. В частности, как при определении параметров материалов по измерениям физических зависимостей, так и при оценке оптимальных режимов технологических процессов по их исследованиям в широком диапазоне значений, используется метод наименьших квадратов (МНК). В ходе практики взаимодействия с исследователями и разработчиками было обращено внимание на то, что в ряде случаев прямое использование МНК дает не совсем корректный результат из-за наличия исходных ограничений, лежащих в его основе. Важность решения этой проблемы отмечалась в обзоре [3].

При высокоточных измерениях в нанотехнологии необходимо учитывать меоскопические и квантовые ограничения, приводящие к вероятностному характеру фиксирования одной характеристики системы при снятии зависимости от нее другой величины. С другой стороны, при большой выборке результатов измерений характеристики изделий электронной техники погрешность определения связанного с ними параметра, полученная МНК, может оказаться ниже погрешности измерения фиксируемой переменной и в этом случае корректно изначально учесть эту погрешность при анализе зависимостей. В методе релаксационной спектроскопии глубоких уровней и ряде других аналитических методов МНК применяется для определения по экспоненциальным зависимостям, например, сечений захвата и энергетического положения глубоких уровней в полупроводнике. Детальный анализ использования МНК для нелинейной зависимости экспериментальных величин и при наличии погрешностей измерений обоих связанных величин с учетом корреляции между этими погрешностями показал, что контроль этих факторов приводит к другим конечным выражениям для вычисляемых по результатам измерений параметров и их дисперсий, чем МНК.

В работе [4] авторами на основании корректного обобщения обычного (линейного) МНК предложена оценка параметров нелинейных уравнений, наиболее часто встречающихся при обработке экспериментальных данных в микроэлектронике. Получены выражения для поправок, учитывающие нелинейные преобразования исходной случайной величины и промежуточной переменной к исходной. Сформулированы простые условия применимости обычного подхода к нелинейным задачам. В частном случае, исходной экспоненциальной зависимости при равноточных измерениях, этот критерий сводится к соотношению  $\delta n \ll 1$ , где  $\delta$  — погрешность измерения зависимой величины,  $n$  — число измерений. Полученные соотношения позволяют оценить необходимость учета поправок еще на этапе планирования эксперимента.

Ряд работ [5—7] был посвящен вычислению оценок  $a$  и  $b$  линейной зависимости  $y=ax+b$  в конъюнктной ситуации, т.е. при измерении обеих связанных величин с погрешностями при учете корреляции между ними. С использованием принципа максимального правдоподобия для нормального распределения двумерных величин  $(x_i, y_i)$  найдена форма, которую необходимо минимизировать в рассматриваемом случае для определения оценок  $a$  и  $b$  коэффициентов линейной зависимости  $y=ax+b$ . На основе проведенного анализа получена система уравнений для однозначного вычисления оценок параметров линейной зависимости переменных, обуславливающая единственную связь между  $x$  и  $y$  вне зависимости от того, какую переменную считать «независимой», а какую «зависимой». Предложен алгоритм вычисления оценок и доказана его сходимости. Доказано важное свойство  $a$  и  $b$ , полученных из решений указанной

$\rho$	$\frac{\sigma_x}{\sigma_y}$	Граничные значения числа измерений, определяющие область применимости МНК
0	0	$\infty$
0	1	70
0,5	-0,5	60
0,5	-0,1	105
0,5	0	240

выше системы, — асимптотическая несмещенность. Получены выражения для элементов ковариационной матрицы оценок величин  $a$  и  $b$ . Определены условия применимости метода конъюнктного анализа и традиционного метода наименьших квадратов. В качестве иллюстрации в таблице приведены для случая равноточных измерений значения числа измеряемых точек, определяющие область использования МНК, рассчитанные для значения погрешности измерения «независимой» переменной  $\sigma_x=0,5$ ; интервала измерений  $L=10$  при различных значениях коэффициента корреляции  $\rho$  и соотношения погрешностей измерения величин  $x$  и  $y$ , выраженного в величине  $a \cdot \sigma_x/\sigma_y$ .

В дальнейшем результаты обобщаются на случай нелинейной зависимости между переменными  $x$  и  $y$ .

Приведенные примеры показывают, что метрологическая экспертиза проектов фундаментальных исследований, а не только промышленного производства, позволяет уже на этапе планирования оптимизировать схему их осуществления, избежать чрезмерного увеличения числа измерений и попадания в область недостоверных выводов при использовании традиционного аппарата обработки результатов измерений.

Авторы выражают искреннюю признательность академику Метрологической академии РФ В.Н.Сретенскому за оказание практической научной помощи при выполнении цикла работ, результаты которых изложены в настоящей статье.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сретенский В.Н. Точность как фактор развития электронного производства. — Электронная промышленность, 1993, вып. 11—12, с. 69.
2. Сретенский В.Н. Систематизация и направления развития прикладной метрологии в электронике. — См. наст. номер, с. 158.
3. Современные проблемы теоретической метрологии / Ю.В.Тарбеев, В.С.Александров, Л.В.Довбета, Т.Н.Сирая. — Итриги науки и техники. Сер. Метрология и измерительная техника. — ВИНТИ, 1991, т. 8. — 132 с.
4. Оценка параметров уравнений микроэлектроники при нелинейном преобразовании случайной переменной / А.Д.Антонюк, А.Г.Дьяченко, О.А.Медведев, В.А.Скорик. — Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1988, вып. 1, с. 89—94.

5. Метод наименьших квадратов для измерений с погрешностями по «независимой» и «зависимой» переменным / А.Д.Антонюк, А.Г.Дьяченко, О.А.Медведев, В.А.Скорик.— Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1990, вып. 1, с. 7—13.

6. Антонюк А.Д., Дьяченко А.Г., Скорик В.А. Ограничения автоматизированного определения параметров

экспериментальных зависимостей традиционными способами.— Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1992, вып. 2—3, с. 57—59.

7. Антонюк А.Д., Дьяченко А.Г., Скорик В.А. Определение коэффициентов линейной зависимости в конфликтной ситуации для неравноточных измерений.— Измерительная техника, 1993, № 3, с. 5—8.

## Микроэлектронные газоаналитические приборы широкого применения

В.А.БЕРЕЗКИН, Е.И.БОРЗОВ, Ю.Г.КАЧУРОВСКИЙ, А.Н.ШОКИН,  
И.Г.ШКУРОПАТ

Современное состояние микроэлектронной технологии позволяет создавать конкурентоспособные индивидуальные индикаторы газов и диагностические автоматизированные газоаналитические системы, которые применяются в различных отраслях промышленности и экологическом мониторинге.

В химической, нефтегазовой, электронной промышленности, атомной и тепловой энергетике, в космонавтике важное место занимает вопрос защиты и контроля окружающей среды, особенно газового состава технологических объемов. В состав диагностических систем наряду с разработанными к настоящему времени вычислительными средствами и каналами связи входят первичные преобразователи концентраций газов в электрические сигналы (газовые сенсоры).

Уровень развития полупроводниковых газовых сенсоров на базе микроэлектронной технологии заметно отстает от остальных интегральных элементов, что обусловлено глубоким различием условий эксплуатации стандартных ИС и сенсоров. Если первые работают в строго регламентированных внешних условиях и защищены от воздействия внешней среды, то вторые работают в исследуемой среде, которая часто несовместима с возможностями функционирования обычных ИС. Поэтому разработки сенсоров на основе материалов и технологии ИС требуют дополнительных исследований. НИИ физических проблем в сотрудничестве с ГНЦ «Курчатовский институт» ведет работу по проектированию и изготовлению ИС газовых сенсоров на базе КМДП ИС, GaAs технологий и кремниевой мембранной технологии, исследуются также возможности применения в качестве сенсоров и элементов волоконнооптических систем [1].

Элементы ИС чувствительны одновременно к различным внешним факторам: температуре, давлению, составу атмосферы, влажности, действию излучений и других факторов. Это, с одной стороны, позволяет использовать их в качестве преобразователей соответствующих величин в электрические сигналы, а, с другой, — необходимо учитывать или устранять влияние остальных факторов. В газовых сенсорах главная помеха — изменение температуры. Поэтому в состав ИС газового сенсора входят как минимум три элемента. Это газо-

чувствительная структура и элементы обеспечивающие стабилизацию или изменение по заданной программе температуры — измеритель температуры и нагреватель. Наибольшее быстродействие и чувствительность сенсора реализуется при повышенных (100—600°C) температурах, что налагает дополнительные условия на тепловую и электрическую изоляцию элементов ИС.

Микроэлектронная технология позволяет создать газовые сенсоры на базе кремния, KHC,  $A_3B_5$ , SiC,  $SnO_2$ , ZnO и других материалов (см.таблицу). В гибридном

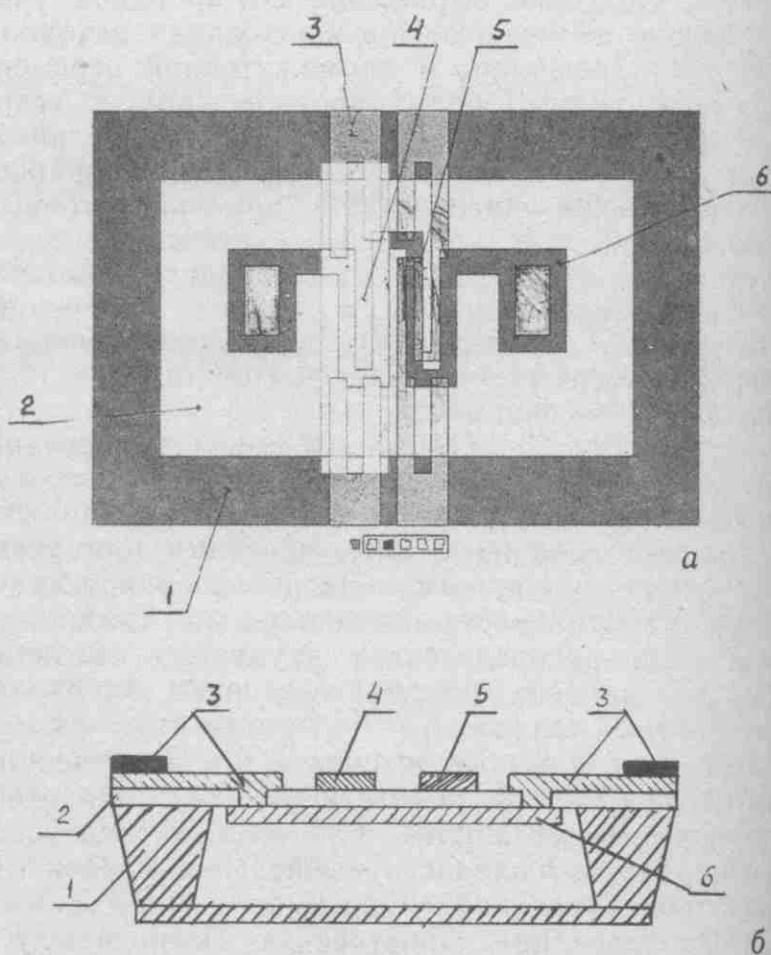


Рис. 1. Фотография (а) и разрез базового кристалла газового сенсора (б): 1 — кремниевая рамка-основание, 2 — многослойная диэлектрическая мембрана, 3 — контактные площадки и разводка, 4 — резистивный датчик температуры, 5 — газочувствительный резистор, 6 — резистор-нагреватель



Сравнительная характеристика газовых полупроводниковых сенсоров

Материал сенсора	Элементы сенсора			Способ изоляции элементов	Тепловая постоянная времени, с	Рабочая температура, °С	Потребляемая мощность, Вт	Тепловая связь элементов
	газочувствительные	термочувствительные	нагреватель					
Кремний (ГИС)	МДП-структура, диод Шотки	PIN-диод	Резистор металлический	Диэлектрик	5—10	100	2—3	Плохая
Кремний (ИС)	МДП-структура, диод Шотки	диод	Резистор из монокристаллического кремния	<i>p-n</i> -переход	1—5	100	1—2	Хорошая
Кремний (ИС)	—«—	Поликремниевый резистор	Поликремниевый резистор	SiO <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )	1—5	160	1—2	Хорошая
КНС (ИС)	—«—	Диод	Резистор из монокристаллического кремния	Сапфир	1—5	160	2—3	Отличная
GaAs (ИС)	Диод Шотки, ПТШ	Диод Шотки	GaAs-резистор	Аморфизация	1—5	200	2—3	Хорошая
GaAs (ИС)	—«—	—«—	—«—	Межа	1—5	250	1—2	Средняя
Кремний (ИС)	Резистор SiO <sub>2</sub> , ZnO и т.д.	Резистор Pt, поликремниевый, монокремниевый	Резистор поликремниевый	Диэлектрическая мембрана	1—3×10 <sup>-2</sup>	600—800	7,5×10 <sup>-2</sup>	Отличная

варианте сенсоров электрическая и тепловая изоляция элементов обеспечивается почти идеально [2], но по всем остальным показателям (мощности, быстродействию, надежности, тепловой связи между элементами, технологичности и т.д.) ГИС уступают ИС. Сравнение вариантов ИС сенсоров (в том числе по материалам периодической печати и трудов конференций по сенсорной тематике) показывает, что наиболее перспективной является кремниевая мембранная технология [3].

На рис.1 представлена топология и разрез одного из вариантов кристалла газового сенсора, изготовленного в НИИФП по кремниевой мембранной технологии [4]. Многослойная композиционная диэлектрическая мембрана толщиной несколько микрон выполнена на кремниевой рамке-основании. На нижней плоскости мембраны расположен термочувствительный резистор из монокристаллического кремния *p*<sup>+</sup>-типа проводимости. Он формируется в процессе локального травления высокоомного кремния с обратной стороны пластины при формировании мембраны. На верхней плоскости мембраны расположены поликремниевый резистор-нагреватель, а над ним — изолированный диэлектриком — газочувствительный резистор из SnO<sub>2</sub>, Pd, ZnO или другого газочувствительного материала и разводка, выполненная из тугоплавкого материала. Контактные площадки на кристалле выполняются из стандартного алюминиево-кремниевое сплава (для низкотемпературных ИС) или тугоплавкого материала (для высокотемпературных ИС). Контактные площадки (200×200 мкм<sup>2</sup>) расположены на верхней плоскости рамки-основания. При изготовлении кристалла сенсора использовались двухсторонняя фотолитография, магнетронный способ напыления, ионная имплантация и низкотемпературные процессы напыления диэлектриков. Сенсор размещается в стандартном корпусе ТО-5.

Исследования сенсоров, выполненных по мембранной технологии, показали, что данная конструкция позволяет создавать семейство газовых сенсоров различного назначения в зависимости от материала газочувствительных слоев. На рис.2 приведена зависимость температуры активной части сенсора от величины мощности потребления нагревателя: она практически линейна, коэффициент пропорциональности более 4°С/Вт. Тепловая постоянная времени кристалла в диапазоне температуры (100—400)°С не превышает 30 мс. Прибор сохраняет свои параметры после 10<sup>6</sup> циклов измерения температуры от +20°С до 400°С. Температурный режим задавался генератором прямоугольных импульсов напряжения, питающего нагреватель сенсора. Время действия импульса и пауза между импульсами составляли 0,5 с. Аналогичные циклы, но с верхней температурой 800°С (1000 циклов) не приводят к разрушению каких-либо элементов кристалла. Таким образом, конструкция позволяет обеспечить низкое энергопотребление при широком диапазоне рабочих температур, малую тепловую инерционность. К недостаткам следует отнести не очень высокую газовую чувствительность в случае применения пассивного чувствительного элемента — резистора, выполненного из материалов типа SnO<sub>2</sub>, ZnO и др.

Примером прибора с высокой чувствительностью и селективностью к водороду может служить сенсор, использующий в качестве чувствительного элемента МДП структуру (конденсатор, транзистор, диод Шотки) с затвором из каталитического металла (Pd, Pt и т.д.) предложенного Лундстремом [5].

На рис.3 представлена фотография кристалла водородного сенсора, разработанного и изготовленного в НИИФП. Кристалл выполнен на эпитаксиальной структуре и содержит два независимых сенсора. Каждый сен-

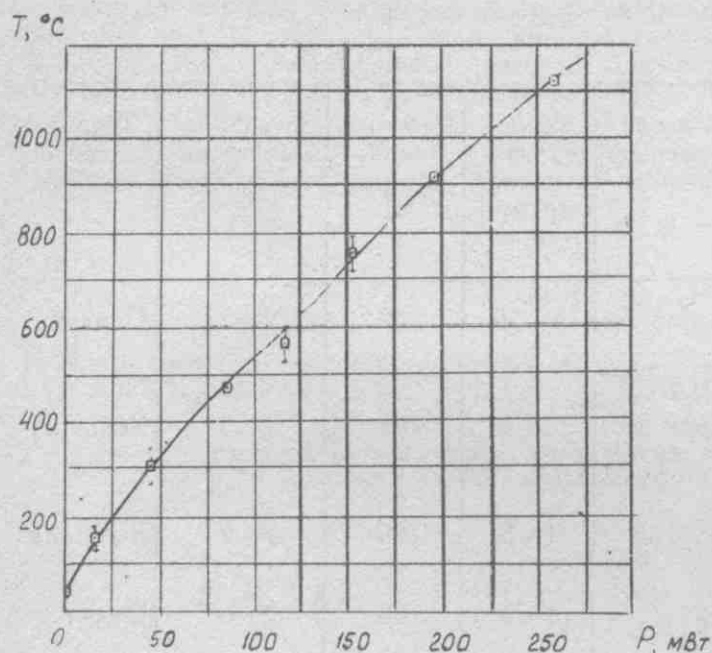


Рис. 2. Зависимость температуры газочувствительного элемента сенсора от мощности потребления нагревателя

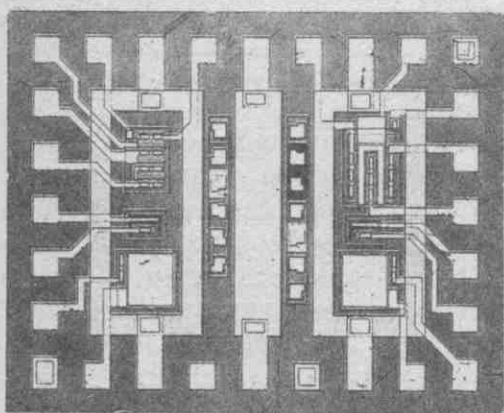


Рис. 3. Фотография кристалла «водородного» сенсора

сор имеет отдельный нагреватель, выполненный в виде рамки из поликристаллического кремния (с сопротивлением  $R = 150 \text{ Ом}$  в холодном состоянии). Дополнительный резистор линейной формы из поликремния расположен между сенсорами ( $R = 150 \text{ Ом}$  в холодном состоянии). В каждом сенсоре выполнены диоды — датчики температуры (с температурным коэффициентом  $1,6 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ ), а также МДП транзистор и МДП конденсатор с палладиевыми затворами (газочувствительные элементы). Активные элементы, изолированы  $p-n$ -переходом, резисторы — диэлектриком. Данный способ изоляции ограничивает диапазон рабочих температур величиной  $100^\circ\text{C}$ . В случае использования в качестве датчика температуры дополнительного поликремниевого резистора ( $1,6 \text{ Ом}/^\circ\text{C}$ ) рабочая температура составляет  $165^\circ\text{C}$ , что является пределом рабочей температуры активных элементов на кремнии. Кристалл размещен в корпусе ТО-5, тепловая изоляция от корпуса осуществлена посредством кремниевой рамки, покрытой толстым слоем двуоксида кремния и выполненной по мембранной технологии. Технологический маршрут изготовления кристалла сенсора практически совпадает с процессом изготовления КМДП ИС с поликремниевым затвором средней степени интеграции. Выход годных

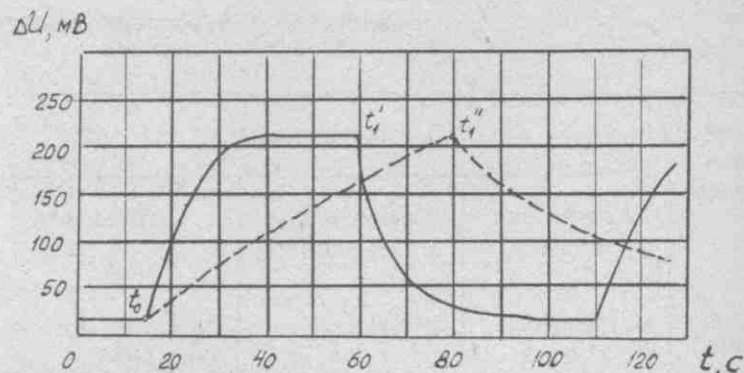


Рис. 4. Зависимость изменения напряжения смещения на МДП-конденсаторе с палладиевым электродом от времени при фиксированной величине емкости и температуры:  $t_0$  — начало подачи водородной смеси  $\text{H}_2(100 \text{ ppm}) + \text{He}$ ;  $t_1$  — начало подачи кислородной смеси  $\text{O}_2(2\% \text{ объемн.}) + \text{He}$ . Сплошная линия — средняя мощность потребления нагревателя  $0,9 \text{ Вт}$  ( $\sim 150^\circ\text{C}$ ), пунктир —  $0,3 \text{ Вт}$  ( $\sim 50^\circ\text{C}$ )

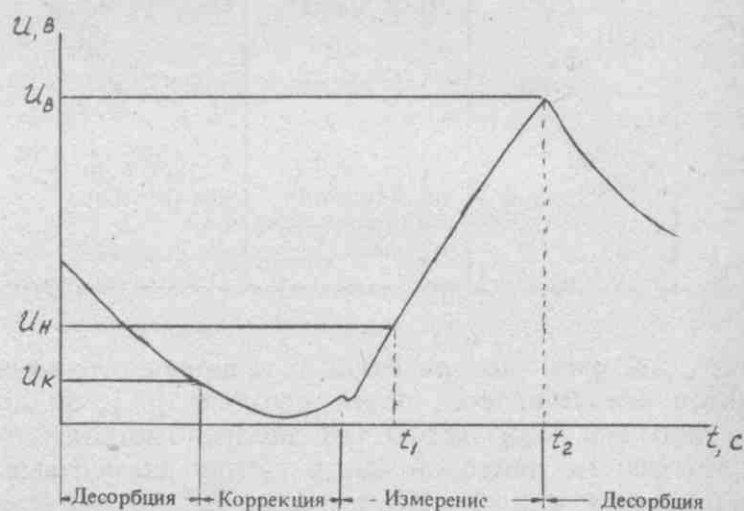


Рис. 5. Диаграмма работы измерителя концентрации водорода

кристаллов сенсоров и их стоимость аналогична стандартным ИС данного типа.

На рис.4 приведена зависимость изменения напряжения на МДП — конденсаторе при фиксированной величине емкости и температуры. При двух значениях температуры ( $50^\circ\text{C}$  и  $150^\circ\text{C}$ ) время отклика сенсора на однократное возмущение ( $100 \text{ ppm}$  водорода в гелии) отличается почти на порядок. Тепловая постоянная времени сенсора составляет  $0,5 \text{ с}$ . Динамический диапазон при считывании информации по скорости нарастания напряжения отклика  $d\Delta V/dt$  в начальной части характеристики  $\Delta V = f(\text{Pn}_2)$  (где  $\Delta V$  — напряжение отклика,  $\text{Pn}_2$  — концентрация водорода в гелии) [6] составляет  $10^{-5} \dots 10^{-2}$  объемных %. Постоянная времени на водородное возмущение составляет от долей до нескольких секунд в зависимости от концентрации водорода. Время восстановления в стандартной атмосфере ( $2\%$  кислорода в гелии) составляет  $60 \text{ с}$ . Пороговая чувствительность к водороду в гелии  $0,1 \text{ ppm}$ , рабочая температура  $+165^\circ\text{C}$ .

На основе водородного сенсора был разработан переносный прибор — индикатор содержания водорода в воздухе. Прибор содержит блок стабилизации рабочей температуры датчика, источник опорного напряжения,

блок усиления выходного сигнала сенсора и блок индикации. Источник опорного напряжения задает уставки для блока стабилизации рабочей температуры и опорное напряжение-уставку для задания рабочей точки газочувствительного элемента сенсора. Блок стабилизации температуры усиливает разностный сигнал между опорным напряжением и напряжением термочувствительного элемента, и через ключевой усилитель включает и выключает нагреватель датчика. В блоке усиления выходного сигнала усиливается разность между выходным сигналом сенсора и опорным напряжением, соответствующем пороговому значению концентрации газа. В блоке индикации происходит компарирование усиленного рабочего сигнала с напряжениями, задающими три уровня концентрации исследуемого газа. При воздействии водорода на сенсор в блоке индикации включаются один, два или три светодиода в зависимости от концентрации газа. Разработанная блок-схема прибора оказалась достаточно универсальной для адаптации к индикаторам других газов.

На базе водородного сенсора разработан и изготовлен портативный высокоточный измеритель концентрации водорода в атмосфере [6]. Прибор работает либо в автономном режиме, либо совместно с ЭВМ. Измерение концентрации осуществляется в адсорбционном — десорбционном режиме. Калибровка прибора — ручная или автоматическая. Газ-десорбер содержится в высокочистой емкости. Измеритель выполнен в виде настольного прибора. Он содержит первичный преобразователь концентрации водорода (ПП) с чувствительным элементом — МДП-транзистором с Pd-затвором (ЧЭ), резистивным нагревателем и измерителем температуры; газовую систему (камера, переключатель потоков газа, насос); регулируемый стабилизатор температуры; усилитель формирования сигнала; трехразрядный цифровой индикатор; персональный компьютер системы автоматического управления; систему ручного управления; систему коррекции состояния ПП и управления газовой системой. Система индикации обеспечивает показания в единицах ppm на трехразрядном индикаторе прибора или на дисплее ЭВМ. При замене сенсора режим его работы задается первоначальной настройкой. Формирователь сигнала автоматически компенсирует медленное изменение параметров сенсора. На рис.5 представлена диаграмма рабочего цикла прибора. Первый этап начинается с паузы. В это время ПП подготавливается к измерениям, т.е. происходит процесс десорбции водорода из ЧЭ сенсора. Этап длится от нескольких секунд до одной минуты. На втором этапе осуществляется автоматическая коррекция нуля прибора. Необходимость этой операции вызвана временной и температурной нестабильностью сенсора. Длительность периода не более 10 секунд. Третий этап — измерение. Система коррекции и управления переключает газовую систему на измеряемый газ, который поступает в газовую камеру ПП. УФ дифференцирует электрический сигнал ЧЭ в промежутке времени  $t_1 - t_2$ . Скорость нарастания сигнала прямо пропорциональна величине измеряемой концентрации водорода в воздухе:

$$C_{H_2} = k \frac{\delta \Delta V}{\delta t} \quad | \quad T = \text{const.}$$

где  $\delta \Delta V = (U_B - U_H)/q_{УФ}$ ,  $q_{УФ}$  — коэффициент усиления;  $U_B$  и  $U_H$  — верхний и нижний пороговые значения компаратора УФ в моменты времени  $t_2$  и  $t_1$ , соответст-

венно. Коэффициент пропорциональности  $k$  задается начальной калибровкой прибора. В момент окончания измерения ( $t_2$ ) система управления переключает газовую систему в режим десорбции. Далее цикл повторяется.

Краткая техническая характеристика прибора: измеряемый диапазон 1—100 ppm, анализируемый газ — водород в воздухе, индикатор — цифровой трехразрядный с плавающей запятой; точность 10% от полной шкалы; время подготовки — 1 мин. Время измерения — 20 сек, температурный диапазон окружающей среды —40°C — +40°C, питание 220 В, 15 Вт, выход на АВМ/РС и в коде КОИ-7.

Использование в данном приборе аналогичного сенсора с двумя чувствительными элементами на основе электродов с различной каталитической активностью позволяет получить измеритель концентраций бинарной смеси (кислород-водород) [7]. Но примеров замены полупроводниковых сенсоров на бинарные, а, тем более на тройные и более высокие смеси газов очень мало. Низкая селективность является основным недостатком полупроводниковых газовых сенсоров. Задача селекции газов решается путем создания диагностических систем (искусственный нос), включающих в себя матрицу неселективных, но отличающихся по чувствительности к различным газам сенсоров, процессор для обработки, выделения и формирования признаков тестируемых газов, интерфейс для ввода сигналов в ЭВМ, собственно ЭВМ и программу, на базе которой создается экспертная система [8]. Интеллектуальная диагностическая система предусматривает обучение экспертной системы и повышение точности распознавания газов при совершенствовании матрицы сенсоров.

Продолжаются работы по комплексной миниатюризации газоаналитических приборов. Основной вклад в объем, вес и энергопотребление приборов вносит газовая система и схемы управления. Замена стандартных электронных схем специализированными, выполненными, например, на основе линейных и цифровых БМК позволит сократить число корпусов микросхем приборов до двух-трех. Газовая система (насос, газовая камера, клапаны, газопроводы) могут быть выполнены методами полупроводниковой микромеханики и мембранной технологии, при этом размеры насосов и клапанов оказываются соизмеримы с размерами сенсоров [9]. Размещение сенсора, насоса и клапанов в одном корпусе — газовой камере превращает сложную электромеханическую систему в одну гибридную сборку. Измеритель превращается в карманный прибор, объем которого определяет источник питания и индикатор.

Таким образом, современное состояние микроэлектроники позволяет создать конкурентоспособные индивидуальные индикаторы газов и диагностические автоматизированные газоаналитические системы, способные удовлетворить потребности различных отраслей промышленности в газоаналитических приборах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Hydrogen concentration GaAs detectors/V.A.Berezkin, V.P.Grabchak, V.N.Inkin, G.S.Rychkov. — Sensors and Actuators, 1991, vol. A28, p. 191—196.
2. An investigation of the hydrogen Si—SiO<sub>2</sub> interface by X-ray diffraction/A.E.Rzanov, V.A.Chaplanov, V.I.Filipov, S.S.Yakimov. — Material Letters, 1988, vol. 6, N 5—6, p. 170—172.
3. Johnson C.L., Wise K.D., Schwank J.W. A thin-film gas detector for semiconductor process gases 1988, IEDM, Book of abstracts, p. 622—665.

4. Базовый кристалл газового сенсора.— Электронная промышленность, 1993, № 8.  
 5. Lundstrom L., Shivaraman M.S., Svensson S.M. A hydrogen sensitive Pd-gate-MOS transistor.— J. Appl. Phys., 1975, vol. 46, p. 3876—3887.  
 6. Portable meter of hydrogen concentration in air/V.A. Berezkin, V.P. Grabchak, V.V. Doronchenkov et al.— Proceedings abstracts, St-Petersburg, 1993, p. 63—64.

7. Book of abstracts Euroensors VI/V. Berezkin, V. Filipov, V. Grabchak et al.— San Sebastian, Spain, 1992, p. 141—142.  
 8. Expert Systems Applications, 1991, vol. 7, N 1, p. 12—15.  
 9. Lammerring T.S.J., Elwenspach M., Fluitman J.H.J. Micro-liquid flow sensor.— Book of Abstracts Euroensors VI, San Sebastian, Spain, 1992, p. 66.

# Установка оперативного контроля микронных и субмикронных размеров

С.А. КОКИН, Ю.И. ТИШИН

**Применение матричного датчика на ПЗС в установке контроля позволяет проводить измерение размеров элементов от 6 до 0,5 мкм с точностью до 5%.**

Наиболее распространенным оборудованием для контроля критических размеров элементов интегральных схем (ИС) и фотошаблонов является стандартный оптический микроскоп.

При производстве схем динамической памяти емкостью 4 Мбит характерный критический размер составляет 0,8—0,7 мкм, а точность измерения должна быть не хуже  $3\sigma = 0,026$  мкм ( $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение) [1]. В случае схем динамической памяти 16 Мбит соответствующие величины составят 0,5—0,6 мкм и  $3\sigma = 0,016$  мкм.

В настоящее время за рубежом для решения этой проблемы выпускается специализированное оборудование, позволяющее контролировать критические размеры элементов оптическими методами — MARK III (США) [2], и MPV CD2 [3] (ФРГ). Существенным недостатком последнего является невозможность контролировать двумерные изображения.

В НИИФП разработана установка для измерения критических линейных размеров субмикронных элементов ИС на полупроводниковых пластинах и фотошаблонах с матричным ФПЗС в качестве датчика изображения. Установка состоит из стандартного оптического микроскопа фирмы Leitz, ЭВМ типа IBM PC, специализированной черно-белой видеокамеры и блока автоматической фокусировки.

**Видеокамера.** В качестве фотоприемника видеокамеры был выбран матричный ПЗС МФП 1 [4], с разрешением  $256 \times 384$  элемента разложения в полукадровом режиме. Размер фоточувствительной области составляет  $6,2 \times 4,6$  мм, при размере отдельной ячейки  $24 \times 24$  мкм. Матрица МФП 1 помещается в специальный корпус, снабженный микрохолодильником на эффекте Пельтье. Двухкаскадный холодильник обеспечивает эффективное охлаждение ПЗС приблизительно на  $60^\circ\text{C}$ , что уменьшает темновые токи более чем в 100 раз, и позволяет получить время экспозиции до 4-х секунд без потери динамического диапазона. Отличительной особенностью МФП 1 является возможность аппаратной предварительной обработки изображения в поле матрицы, с целью улучшения параметров определения размеров. Суммируя двумерное изображение поэлементно

вдоль выбранного направления, например по столбцам, мы получаем свертку, представляющую проекцию изображения на строку матрицы. Меняя отношение тактовых частот матрицы и регистра, можно менять направление суммирования. При этом улучшается отношение сигнал/шум как  $\sqrt{n}$ , где  $n$  — число элементов суммирования.

Конструктивно камера состоит из трех основных блоков:

- выносная головка с фотоприемником,
- блок управления МФП 1 и цифровой обработки видеосигнала,
- параллельное интерфейсное устройство для связи с ЭВМ.

Такая конструкция обеспечивает гибкость системы при стыковке с различными видами оборудования.

Выносная головка содержит собственно ФПЗС в охлажденном корпусе, предварительный усилитель видеосигнала и фильтры питающих напряжений. Блок управления МФП 1 и цифровой обработки видеосигнала формирует все необходимые импульсные и постоянные питающие напряжения, преобразует видеосигнал в цифровой код и записывает полученную информацию в буферное запоминающее устройство (БЗУ). Интерфейсное устройство обеспечивает передачу информации в параллельном коде в память ЭВМ.

## Технические характеристики видеокамеры

Число элементов разложения двумерного изображения	256 × 192 (256 × 384)
одномерного (свертка)	256
Число градаций яркости черно-белого	
двумерного изображения	6 разрядов
одномерного	10 разрядов
Время экспозиции	0,008—1,0 с
Отношение сигнал/шум	1000:1
Режим работы	Малокадровый
Размер БЗУ	1 кадр
Устройство отображения	ЭВМ, совместимая с IBM PC
Скорость вывода двумерного изображения на экран дисплея	до 5 кадр./с

Разработанная конструкция видеокамеры позволяет выводить как двумерное изображение объекта, так и свернутое в одну строку (суммирование по столбцам). Переключение режимов работы происходит по коман-

дам ЭВМ. Следует отметить, что малокадровый режим работы видеокамеры позволяет существенно упростить всю конструкцию в целом, улучшить эффективность переноса и уменьшить величину паразитных наводок. Быстродействие системы практически не падает, так как существует ограничение на скорость ввода изображения в память ЭВМ — 3–5 кадра в секунду.

Установка измерения субмикронных размеров. Состоит из:

- стандартного оптического микроскопа типа Ergolux SCAN 2000,
  - ЭВМ типа IBM PC/AT 386,
  - описанной выше специализированной видеокамеры,
  - блока автоматической фокусировки изображения.
- Известно, что достигнуть субмикронного разрешения можно даже при использовании объективов с увеличением 40, числовой апертурой 0,65 и сине-зеленых (0,55 мкм) фильтров.

$$R = \frac{0,61\lambda}{N.A.} \approx 0,5 \text{ мкм},$$

где  $R$  — разрешение,  $\lambda$  — длина волны,  $N.A.$  — числовая апертура. Именно такая установка описана в работе [5], где авторами был использован матричный ПЗС с фотоувеличительным полем 8,8x6,6 мм и числом линий 750x480. Однако в этом случае размер элемента ПЗС, приведенный к изображению, составляет около 0,3 мкм/элемент, что явно недостаточно для получения необходимой точности при измерении критических размеров элементов 0,8 — 0,5 мкм [1].

С целью получения необходимых параметров был использован объектив NPL 100x0,9 и дополнительный окуляр с увеличением 12,5, что обеспечивает разрешение  $\approx 0,37$  мкм, и размер элемента ПЗС, приведенный к изображению, равен 0,019 мкм/элемент. Видимое поле при этом составляет 5x3,7 мкм. В этом случае, если требуется проводить измерение элементов больших размеров или визуально (на экране дисплея) контролировать поле, превышающее вышеуказанный размер, необходимо снизить увеличение окуляра.

Для достижения высокой точности измерения необходимо правильно сфокусировать изображение. Для этого служит блок автоматической фокусировки, который позволяет управлять вертикальным перемещением стола по командам ЭВМ. Основа алгоритма фокусировки заключается в определении производной (наклона) одномерного распределения интенсивности от отдельного элемента ИС. Далее ЭВМ через блок автоматической фокусировки управляет микроскопом с целью получения максимальной производной (максимального наклона).

Полученное сфокусированное одномерное распределение интенсивности изображения обрабатывается, и по результатам вычислений определяется размер элементов ИС.

Проведенные исследования показали возможность обеспечить измерение размеров элементов от 6 до 0,5 мкм с точностью не хуже 5%.

$L$ , мкм	0,52	1,0	1,4	1,8	3,0	6,0
$H$ , лин ПЗС	4,52	8,85	12,43	16,43	27,23	54,02
$\sigma$ , мкм	0,025	0,044	0,056	0,042	0,048	0,041,

где  $L$  — размер элементов,  $H$  — размер в линиях ПЗС. Размер и среднее квадратичное отклонение определялись по 100 выборкам.

Установка обеспечивает измерение элементов ИС на фотошаблонах и кремниевых пластинах в слоях металла, поликремния, фоторезиста и окисла кремния с контрастом не хуже 5% от величины максимального сигнала. Ниже приведены контрастности изображения для различных образцов в безразмерных единицах. Максимальный сигнал в этих единицах составляет 1024.

Материал	Контраст [б/р]
Алюминий на Si	250 ед.
Si* на Si	52 ед.
Ф/Р на алюминии	100 ед.
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> шаблон	700 ед.
Ni шаблон	300 ед.

Полученные результаты позволяют гарантировать высокоточные измерения малых размеров элементов ИС в слабоконтрастных слоях. Для проведения калибровки установки необходим набор аттестованных стандартов с неоднородностью края менее 0,02 мкм.

Разработанная установка позволяет проводить автоматизированные контрольно-измерительные операции критических размеров субмикронных элементов на полупроводниковых пластинах в процессе производства ИС и фотошаблонах, существенно снизить их стоимость. Созданная специализированная черно-белая малокадровая ПЗС видеокамера может быть установлена на различные микроскопы, имеющие стандартный оптический выход. Следует отметить, что проблема регистрации изображения и передача его в память ЭВМ имеет место и для других типов оптических микроскопов, разработанных в последнее время — конфокального и интерференционного [6, 7].

Дальнейшее развитие и удешевление системы требует создания универсального базового микроскопа типа Ergolux фирмы Leitz отечественного производства. Наличие системы для контроля размеров двумерных изображений и блока фокусировки позволяет создать эффективное программное обеспечение для проверки соответствия технологического чертежа реальным элементам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Timothy R. Corle. Submicron metrology in the semiconductor industry.— Solid State Electronics, 1992, vol. 35, N 3, p. 391—402.
2. Robert E. Melen, Stephen Williams. A high-precision, wide dynamic range CCD based image acquisition system.— SPIE, vol. 775. Integrated Circuit Metrology, Inspection and Process Control, 1987, p. 134—137.
3. Leitz MPV CD Aphotometric line-width measuring system: Проспект фирмы Leitz, ФРГ.
4. Сафонов А.Г., Седунов Б.И., Ракитин В.В., Тишин Ю.И. Функциональные приемники на приборах с зарядовой связью.— Микроэлектроника и полупроводниковые приборы, 1989, вып. 10, с. 41—51.
5. Steven Mechels, Matt Young. Video microscope with submicrometer resolution.— Applied optics, 1991, vol. 30, N 16, 1 June, p. 2202—2211.
6. Cohen D.K., Cochran E.R., Ayres J.D. Development of an automatic focusing mechanism for an interference microscope.— SPIE, vol. 1164. Surface Characterization and Testing II, 1989, p. 128—133.
7. Pomposo T., Awamura D., Ode T. Vertical Profiling, CD measurement, and 3D surface profiling with a Confocal Laser Scanning Microscope.— SPIE, vol. 1164. Surface Characterization and Testing II, 1989, p. 191—202.

# Изобретательская деятельность

В.А.САДОВОЙ

В 1968 г. в соответствии с постановлением СМ СССР и приказом Министерства электронной промышленности на предприятиях электронной промышленности стали организовываться и формироваться патентные службы. Одной из основных задач этих служб являлась подготовка специалистов-патентоведов из числа инженерно-технических работников, а также выбор организационно-технических форм работы патентных подразделений, пропаганда патентных знаний среди разработчиков и т.д.

В НИИФП патентная служба была создана в 1967 г. Ее становление проходило одновременно с быстрым развитием микроэлектроники. Первый этап организации патентной деятельности в Институте закончился к началу семидесятых годов. Он включал в себя создание патентной службы, повышение квалификации патентоведов, формирование патентного фонда, донесение необходимых патентных знаний до исследователей. Научно-технические сотрудники Института принимали активное участие в изобретательской деятельности. Число изобретателей составляло от 190 в 1980 г. до 110 в 1987 г., число изобретений за этот же период изменялось от 110 до 60.

В 1970-х гг. инофирмы, создав определенный научно-технический задел в области полупроводниковой технологии и микроэлектроники, защитили патентами базовые технологические процессы и изделия, обеспечив тем самым себе монопольное право на внутреннем и международном рынке. В связи с этим в отношении зарубежного патентования патентная служба Института выработала стратегию определения коммерческого интереса у иностранных фирм — продуцентов электронной техники, и на решении связанных с этим проблем были сконцентрированы усилия ученых, инженерно-технических, патентных и информационных работников.

К настоящему времени сотрудники Института являются авторами 1764 изобретений. Такой высокий показатель свидетельствует о достаточно слаженной системе изобретательского процесса. Разработчиками Института с помощью сотрудников патентного отдела поданы заявки и получены авторские свидетельства на изобретения по созданию ряда новых элементов, структур, приборов и устройств микро-, нано- и молекулярной электроники. Например, успех развития исследований в области вакуумных интегральных схем и приборов на основе автоэлектронной эмиссии в НИИФП связан с созданием оригинальной технологии получения суб-

наномикронных размеров между электродами вакуумных микроэлементов (а.с. № 545216 от 31.03.75 г. авторы *В. И. Махов, В. П. Лаврицев, Б. В. Бондаренко*). Это изобретение обеспечило создание низковольтных микроприборов с кремниевыми автоэмиссионными эмиттерами (а.с. № 10222383 от 29.12.81), работающих в условиях отсутствия ионной бомбардировки, т.е. при рабочих потенциалах, равных или ниже потенциала ионизации газов.

Устранение других дестабилизирующих факторов, вольт-амперных характеристик автоэлектронных эмиттеров стало возможным благодаря защите поверхности автоэмиттера туннельно тонким слоем диэлектрика. Это позволило обеспечить стабильность работы выхода и геометрических параметров рабочей поверхности автоэмиттера (а.с. № 1088567 от 30.03.82 г., *В. И. Махов, В. А. Афанасьев, Б. В. Бондаренко, Н. А. Дюжев*; а.с. № 944460 от 04.10.80 г., *Д. В. Еремченко, В. И. Махов*).

На 18 лет опередили российские ученые зарубежных коллег в области использования автоэлектронных катодов в СВЧ-приборах М-типа. Подобные приборы обладают существенными эксплуатационными преимуществами по сравнению со старыми разработками. Новые приборы сочетают достоинства полупроводниковых приборов, обладая мгновенностью запуска в рабочий режим, в них отсутствует энергия накала, что увеличивает их экономичность и надежность (положительное решение по заявке на выдачу патента от 27.07.92 г.; Патент РФ № 007777).

Разработаны сверхпроводниковые метрологические приборы нового класса авторами В.В.Масаловым и другими (а.с. №№ 1101113; 1118186; 1253393; 1271304; 1281010; 1322941). Реализация этих приборов возможна на основе современной сверхпроводниковой элементной базы низко- и высокотемпературных сверхпроводников. Улучшенные метрологические характеристики приборов позволяют значительно расширить их функциональные возможности.

В НИИФП впервые в мире разработан принципиально новый тип джозефсоновских переходов — так называемые резонансные джозефсоновские переходы с непосредственной проводимостью (а.с. № 15441244 1570580 авторов *А. А. Гудкова* и др.), в которых существенную роль играет длина волны де Бройля электронов в материале прослойки. Данный тип переходов обеспечивает сверхбыстродействие сверхпроводниковых ИС.

Разработана субмикронная технология изготовления полупроводниковых подложек с супертонкими мембранами на основе изобретений авторов *В. И. Мишачева* и др. (а.с. № 760768, 1531763). Эта технология послужила базой для создания малогабаритных датчиков давления, расхода, ускорения с высокой чувствительностью и надежностью, используемых в автоматических и сервисных устройствах, бытовых приборах, автомобилях.

На установленном в НИИФП новом явлении — магнитно-индуцированном долговременном изменении реальной структуры твердых тел вследствие изменения состояния примесно-дефектных комплексов во время релаксации электронно-ядерной спиновой системы (Патент РФ № 1623502, авторы *Ю. И. Климов* и др.) создан способ, который позволяет более достоверно выявлять микродефекты в полупроводниковых приборах вследствие появления электрической активности микродефектов без использования трудоемкой операции электротренировки.

К интересным работам относятся: изобретение *А. Г. Сафонова* и *Ю. И. Тишина* "Линия задержки на ПЗС" (а.с. № 1648206) — для устройств обработки сигналов в цветных телевизорах и видеоманитофонах; изобретение тех же авторов "Входное устройство ПЗС" (а.с. № 1582891) — для преобразования напряжение — заряд с высокой точностью; изобретение *Н. А. Дюжева*, *Б. С. Борисова*, *А. И. Козлова*, *В. И. Махова* и *М. В. Залютдинова* "Электровакuumный прибор" (Патент РФ № 1813299) — с высоким быстродействием и плотностью тока эмиссии, предназначенный для СВЧ устройств и приборов отображения информации.

Работниками Института исследованы и разработаны принципы и методы формирования высококачественных границ раздела в структурах: многокомпонентные полупроводники  $A_3B_5$ ,  $A_2B_6$  — диэлектрики, позволившие реализовать матричные и строчные фотоприемные ИК-детекторы с конструкцией МДП—ПЗС и  $p-n$  переходов (работы защищены 15 авторскими свидетельствами); многие процессы, методы, конструкции внедрены в производство на предприятиях различных отраслей, в т.ч. защищенные авторскими свидетельствами №№ 115710, 120403, 133260, 149772, 301354 (авторы *А. П. Алехин*, *М. О. Башкин*, *А. В. Емельянов*, *А. Д. Михеев* и другие).

К наиболее удачной разработке в области оптоэлектроники можно отнести оптоэлектронный элемент памяти (а.с. № 1284439, авторы *Э. Б. Ильичев* и др.), предназначенный для использования в системах передачи и обработки информации в качестве оптоэлектронного триггера и являющийся оптоэлектронной интегральной схемой, согласующейся по уровням управляющих сигналов с усилительными и логическими схемами и устройствами на кремнии и арсениде галлия. При изготовлении ОЭП используется монокристаллический изолирующий слой твердого раствора  $GaAlAs$ , полученный МОС гидридным методом по способу, предложенному авторами в а.с. № 11119523 от 28.03.83 г.

Квантовый интерференционный полевой транзистор (а.с. № 1549419, авторы *Э. Б. Ильичев* и др.) предназначен для использования в информационных и измерительных системах в качестве усилительного либо ключевого элемента ИС и может быть реализован на материалах  $GaAs-AlAs$  в рамках традиционной планарной технологии арсенидгаллиевых ИС. Отсутствие короткоканальных эффектов и субмикронные размеры позволяют достичь больших степеней интеграции. Для изготовления КИПТ предлагается использовать эпитаксиальную структуру, содержащую синхронизирующий электроны разделительный слой  $GaAlAs$ , полученный МОС гидридным методом с использованием оригинального способа, предложенного авторами в а.с. № 940601 и 1119523 от 23.11.80 г. и 28.03.83 г. соответственно.

Изобретение *Э. Б. Ильичева* и др. "Способ изготовления МДП транзисторов" (а.с. № 1597018) обеспечивает расширение частотного и температурного диапазона работы, а изобретение *М. О. Башкина* и др. "Способ окисления кремния" (а.с. № 1667564) — повышение качества формируемых структур за счет уменьшения количества радиационных дефектов. Изобретение *В. И. Беклемышева*, *И. И. Махонина* и др. "Состав для гидромеханической очистки поверхности кремниевых пластин" (а.с. № 1662292) обеспечивает в 2–8 раз лучшую очистку по сравнению с углеводородными ПАВ.

Существенный вклад сотрудники Института внесли в субмикронную литографию. Можно отметить изобретение *В. С. Корсакова*, *Ю. С. Бокова* и др. "Состав контрастно-усиливающего слоя" (а.с. № 2683426), обеспечивающее повышение разрешающей способности маски, снижение токсичности и пожароопасности; изобретение *Ю. С. Бокова* и др. "Способ литографии" (а.с. № 1579354), позволяющее повысить производительность не менее чем в два раза по сравнению с известными процессами; изобретение *Ю. С. Бокова* и др. "Способ формирования двухслойной маски" (а.с. № 1738037) о формировании как негативной, так и позитивной двухслойной маски с разрешением 0,3–0,4 мкм, что дает возможность использовать его в автоматизированных технологических линиях.

На ряд технических решений поданы заявки на выдачу патента РФ. Это изобретение авторов *В. С. Корсакова* и др. "Пленочное переключающее и коммутирующее устройство" (заявка № 5007851); "Состав для пьезорезистивного материала" (заявка № 5005526) авторов *В. С. Корсакова*, *В. И. Мишачева* и др.; "Пьезоэлектрический датчик давления" (заявка № 9303307) авторов *В. И. Мишачева*, *В. А. Березкина* и др.; "Газочувствительный датчик на основе полевого транзистора"

(заявка № 93008616) авторов *В.А. Автономова* и др.; "Считыватель штриховых кодов" (заявка № 93026118) и др.

Приведенные примеры показывают, что в каждой области, в которой работают сотрудники Института, предложены изобретения. Это означает, что разработки находятся на мировом рынке. Однако следует отметить, что главный недостаток — низкий уровень промышленного внедрения — при высоком уровне защищенности разработок Института привел к отрыву последнего звена в цепи "наука—техника—производство", что неминуемо должно было сказаться и сказалось при переходе экономики к рыночным отношениям.

Активность сотрудников НИИФП в изобретательстве в 90-е года начала падать. Это, возможно, связано с тем, что изобретателям не была ясна позиция государства по правовой охране изобретений (отмена авторских свидетельств, введение только патентной защиты). С другой стороны, резко возросли требования к защищаемым изобретениям. Однако, несмотря на объективные и субъективные трудности, состояние дел с изобретательством всегда находилось под пристальным вниманием научно-технического совета и администрации. Большая работа была проведена после принятия Закона об изобретениях в СССР, что впоследствии помогло быстро и грамотно вводить в жизнь принятый в 1993 г. Патентный закон Российской Федерации. Вопросы практики применения Закона неоднократно обсуждались на НТС Института, была создана во главе с главным инженером Института Патентная комиссия, которая предварительно

рассматривает все вопросы (в том числе и патенто-обладателя), касающиеся патентования изобретения, затем окончательное решение принимает НТС Института. Большая работа проводится по обмену авторских свидетельств на патенты РФ, начата правовая охрана новых субъектов промышленной собственности — программ для ЭВМ и баз данных, получено, в частности, первое свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 940076 от 28.02.94 г., правообладатель — НИИФП.

Таким образом, в Институте сложился системный подход к правовой охране промышленной собственности, включающий в себя:

- выявление и правовую охрану изобретения, программ для ЭВМ и баз данных, технологий;
- рассмотрение целесообразности использования прав на получение патентов, передаваемых или переданных Институту его сотрудниками;
- заключение договоров, в том числе с авторами изобретений;
- подготовка решений о целесообразности патентования за границей и участие в патентовании;
- участие в переговорах с партнерами по научно-техническому сотрудничеству (в т.ч. с инофирмами);
- организация патентно-информационной работы;
- обучение сотрудников предприятия основам патентных знаний.

Все это позволяет утверждать, что в новых экономических условиях разработки сотрудников Института получают своевременную и полную правовую охрану в мире.

---

Ответственный за выпуск *Г.Г. Горбунова*  
Редакторы *И.В. Кокорева, В.М. Дмитриев, Е.А. Семина*

Главный художник *А.И. Устюхин*  
Слайды *Е.Д. Германа*  
Подготовка к набору *Н.И. Кононенко*  
Технический редактор *Л.М. Румянцева*  
Корректоры *И.П. Зотова, А.В. Смирнова*

*Редакция выражает благодарность профессору В.Н. Сretenскому за активное участие в подготовке номера.*

---

Адрес редакции: 117415, Москва, просп. Вернадского, 39.  
Тел.: 432-92-72, 432-92-27, 432-91-89

---

Отпечатано в типографии ЦНИИ "Электроника"  
Подписано в печать 22.11.94 г. Уч.-изд.л. 26 Индекс 3833 Заказ 157 Тираж 470



# Электронная промышленность

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЖУРНАЛ ГОСУДАРСТВЕННОГО КОМИТЕТА РФ  
ПО ОБОРОННЫМ ОТРАСЛЯМ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Издается с 1970 г.

г.Москва

Заполнить и выслать в редакцию журнала  
"Электронная промышленность"  
по адресу: 117415, Москва, пр-т Вернадского, 39.  
тел. для справок: 432-92-27, 432-91-25.

## ЗАКАЗ

на журнал "Электронная промышленность"

Подписная цена: для России — 36000 руб., для стран СНГ —  
37800 руб.

(с учетом НДС, СН и почтовых расходов)

Прошу принять подписку на журнал "Электронная промышленность" и направлять по адресу:

Почтовый индекс, горсд \_\_\_\_\_

Страна, республика, край \_\_\_\_\_

Улица \_\_\_\_\_

Дом № \_\_\_\_\_ Корпус \_\_\_\_\_ Квартира \_\_\_\_\_

Кому \_\_\_\_\_  
(полное, расшифрованное наименование предприятия, организации)

Ведомство \_\_\_\_\_  
(учредительство)

\_\_\_\_\_ (ф.и.о. индивидуального подписчика)

Телефон \_\_\_\_\_

Наш расчетный счет № \_\_\_\_\_

в \_\_\_\_\_ отделении Госбанка.

Подписная плата в сумме \_\_\_\_\_ руб.

перечислена на Ваш расчетный счет № 000263835 в Московском банке "Витта", участник 29, МФО 44583423, инд.117335, к/с 423161600, МФО 201791 банковским поручением или почтовым переводом № \_\_\_\_\_ от " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 19 \_\_\_\_ г.

Индекс издания	Подписная цена, руб.	Число экз.	Общая сумма, руб.
3833			

В 1995 г. будут изданы следующие выпуски журнала:

1. "Пензенскому НИИМП – 30 лет" (технология, материалы, изделия – исследования, разработки, производство).
2. "Выставка изделий электронной техники в Центре маркетинга в ЦНИИ "Электроника".
3. "Новые разработки изделий электроники" (очередной сборный выпуск).
4. "Лазерная техника и средства отображения информации".
5. "Отечественной медицинской электронике – 30 лет" (результаты применения).
6. "Особо чистые материалы – фундамент развития электронной техники".
7. 25-летие журнала "Электронная промышленность". "Отечественной электронной промышленности – 30 лет".
8. "Электронные технологии – в народное хозяйство" (экологически чистые технологические процессы).

Дополнительные выпуски:

"Автомобильная электроника".

"Приборы и устройства на основе сенсоров".

"Коммутационные изделия".

Вы можете дополнительно подписаться на отдельные выпуски журнала. Так как порядок их издания может быть изменен, в бланке-заказе укажите название выпуска. Стоимость – из расчета 4500 руб./экз.

РЕДАКЦИЯ ПРИНИМАЕТ ЗАЯВКИ НА РЕКЛАМУ В ЖУРНАЛЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ СЛАЙДОВ,

ЛИСТОВОК, БУКЛЕТОВ – ЛЮБОЙ РЕКЛАМНОЙ ПРОДУКЦИИ

ВЫСОКОГО КАЧЕСТВА.

СПРАВКИ ПО ТЕЛЕФОНУ (095) 431-5821 ФАКС (095) 431-5886

# ДИРЕКЦИЯ

## Научные отделы и лаборатории

Теоретических исследований  
Физико-математического моделирования  
Наноэлектроники  
Молекулярной электроники  
Биомолекулярных исследований  
Прецизионной технологии и микромеханики  
Кремниевых СБИС  
Арсенид-галлиевых приборов  
Сверхпроводниковых приборов  
Вакуумной микроэлектроники  
Лазерной диагностики  
Аналитических исследований  
Метрологии  
Патентоведения

Отдел маркетинга и международных связей

Исследовательский технологический комплекс с синхротроном  
Отделы:  
— диагностики в пучках СИ;  
— радиационно-стимулированных процессов

## Научно-технический совет. Секции:

Физической микроэлектроники  
Проблем наноэлектроники  
Молекулярной нанотехнологии  
Схемотехники и анализа свойств СБИС  
Субмикронной кремниевой технологии  
Применения синхротронного излучения  
Прецизионного эксперимента  
Контроля технологических сред  
Автоматизации научных работ

Диссертационный совет

Базовые кафедры в вузах МФТИ, МГИЭТ

Экспериментальное производство

Вспомогательные подразделения

*Структура ГосНИИ физических проблем*

СТМ – образ молекулярного слоя фуллерена в нанометровом масштабе (C<sub>60</sub> на поверхности графита) – перспективного материала молекулярной электроники и сверхпроводниковой техники



1995

	ЯНВАРЬ					ФЕВРАЛЬ				МАРТ				АПРЕЛЬ				МАЙ					ИЮНЬ						
Пн.	2	9	16	23	30	6	13	20	27	6	13	20	27	3	10	17	24	1	8	15	22	29	5	12	19	26	Пн.		
Вт.	3	10	17	24	31	7	14	21	28	7	14	21	28	4	11	18	25	2	9	16	23	30	6	13	20	27	Вт.		
Ср.	4	11	18	25	1	8	15	22	1	8	15	22	29	5	12	19	26	3	10	17	24	31	7	14	21	28	Ср.		
Чт.	5	12	19	26	2	9	16	23	2	9	16	23	30	6	13	20	27	4	11	18	25	1	8	15	22	29	Чт.		
Пт.	6	13	20	27	3	10	17	24	3	10	17	24	31	7	14	21	28	5	12	19	26	2	9	16	23	30	Пт.		
Сб.	7	14	21	28	4	11	18	25	4	11	18	25	1	8	15	22	29	6	13	20	27	3	10	17	24	Сб.			
Вс.	1	8	15	22	29	5	12	19	26	5	12	19	26	2	9	16	23	30	7	14	21	28	4	11	18	25	Вс.		
	ИЮЛЬ					АВГУСТ				СЕНТЯБРЬ				ОКТАБРЬ					НОЯБРЬ					ДЕКАБРЬ					
Пн.	3	10	17	24	31	7	14	21	28	4	11	18	25	2	9	16	23	30	6	13	20	27	4	11	18	25	Пн.		
Вт.	4	11	18	25	1	8	15	22	29	5	12	19	26	3	10	17	24	31	7	14	21	28	5	12	19	26	Вт.		
Ср.	5	12	19	26	2	9	16	23	30	6	13	20	27	4	11	18	25	1	8	15	22	29	6	13	20	27	Ср.		
Чт.	6	13	20	27	3	10	17	24	31	7	14	21	28	5	12	19	26	2	9	16	23	30	7	14	21	28	Чт.		
Пт.	7	14	21	28	4	11	18	25	1	8	15	22	29	6	13	20	27	3	10	17	24	1	8	15	22	29	Пт.		
Сб.	1	8	15	22	29	5	12	19	26	2	9	16	23	30	7	14	21	28	4	11	18	25	2	9	16	23	30	Сб.	
Вс.	2	9	16	23	30	6	13	20	27	3	10	17	24	1	8	15	22	29	5	12	19	26	3	10	17	24	31	Вс.	