

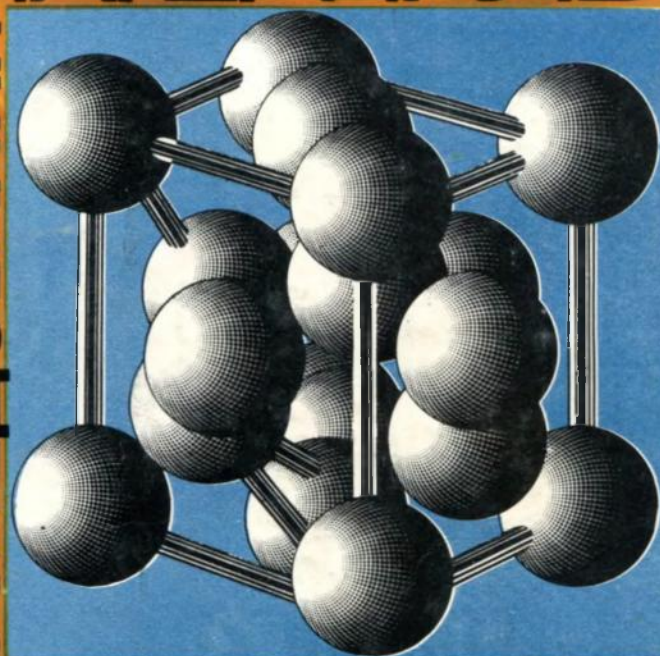


# ЭЛЕКТРОННАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

10  
1980

МАТЕРИАЛЫ

ИССЛЕДОВАНИЯ



ПРИМЕНЕНИЕ

ПРОИЗВОДСТВО

# 1980

## МИНИСТЕРСТВО ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР-НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. А. Чернышев  
(главный редактор)

В. А. Афанасьев  
Ф. И. Бусол  
А. А. Васенков  
И. Н. Воженин  
Г. Г. Горбунова  
(ответственный секретарь)

Г. Я. Гуськов  
Н. Д. Девятков  
В. И. Иванов  
А. Ф. Казаков  
А. А. Константинов  
Ю. Г. Кувшинников  
Э. А. Лукин  
А. А. Маклаков  
В. И. Машкин  
Ю. Б. Митюшин  
А. А. Орлов  
Ю. П. Поцелуев  
В. М. Пролейко (зам.  
главного редактора)

Ю. А. Райнов  
А. И. Савин  
А. А. Сорокин  
В. Д. Степанов  
Ю. Б. Степанов  
В. Н. Сретенский  
П. М. Стуколов (зам.  
главного редактора)  
И. Ф. Фадеев  
Я. А. Федотов  
О. В. Филатов  
С. К. Цаллагов

● Все шире в производстве изделий электронной техники применяются полимерные материалы. В их числе – поликарбонатные пленки для изготовления пассивных компонентов, литые диаллилфталатные реактопласты и цветные термопласты, используемые в качестве конструкционных материалов, оптически прозрачные герметики и клеи для производства оптоэлектронных приборов различного назначения, эластичные кремнийорганические компаунды, а также электро- и теплопроводящие клеи, характеризующиеся высокой адгезией к элементам конструкции приборов и способствующие повышению выхода годных.

● Разработка фототермопластичных материалов обеспечила создание носителей информации, имеющих повышенную разрешающую способность, более широкую область спектральной чувствительности по сравнению с галогеносеребряными материалами и способных записывать информацию в голографической и аналоговой формах.

● Надежная работа интегральных схем и транзисторов, связанная с обеспечением устойчивого электрического соединения контактных площадок полупроводниковых кристаллов и выводов корпуса, достигается использованием микропроволоки из алюминиевых сплавов АМг08 и А999К09.

● Широкое применение термодинамических методов анализа в полупроводниковом материаловедении способствует решению задач оптимизации технологических процессов производства материалов, дает возможность предопределять некоторые параметры материалов, а также способы управления этими параметрами.

● Модель механизма электропроводности керметных резистивных материалов, в основе которой лежит представление об островковой структуре тонких пленок, позволяет объяснить характер зависимости их удельного сопротивления от температуры и определить электрофизические параметры компонентов тонкопленочной системы, управляющие этой зависимостью.

● Методика комплексных ускоренных испытаний, воспроизводящих воздействие коррозионно-климатических факторов условий эксплуатации и хранения материалов и изделий электронной техники, дает возможность прогнозировать их коррозионную стойкость.

# С ТРУДОВОЙ ПОБЕДОЙ!

*Рабочим, инженерно-техническим работникам  
и служащим предприятий и организаций  
Министерства электронной промышленности*

Дорогие товарищи!

Центральный Комитет Коммунистической партии Советского Союза поздравляет вас с большой трудовой победой — досрочным выполнением заданий десятого пятилетнего плана.

За годы пятилетки в электронной промышленности значительно вырос объем производства, в 2 раза повышена производительность труда, в 1,4 раза увеличилась фондоотдача, снижена себестоимость продукции и материалоемкость. Существенно повысился технический уровень электронной техники, значительная работа проведена по сокращению сроков разработки и освоению в производстве новых изделий, по дальнейшему повышению качества выпускаемой продукции.

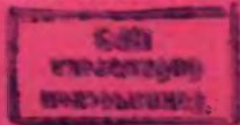
Хотелось бы подчеркнуть, что вы добились больших успехов на основе широкого использования достижений научно-технического прогресса, активной работы по техническому перевооружению научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро и предприятий, разработке и внедрению в производство современного высокопроизводительного технологического оборудования, механизации и автоматизации производства, передовой технологии и прогрессивных форм управления и организации труда.

Высокие показатели работы электронной промышленности являются результатом большой организаторской и воспитательной работы партийных, профсоюзных и комсомольских организаций и хозяйственных руководителей, умело направляющих инициативу и энергию коллективов на претворение в жизнь решений XXV съезда КПСС, самоотверженного труда и творческой активности всех работников отрасли, широко развернутого социалистического соревнования.

Центральный Комитет КПСС с глубоким удовлетворением отмечает, что в принятых вами социалистических обязательствах в честь XXVI съезда КПСС намечено изготовить до конца текущего года сверх пятилетнего плана значительное количество продукции, разработать и освоить ряд новых изделий электронной техники и технологического оборудования.

Выражаю твердую уверенность в том, что рабочие, инженерно-технические работники и служащие электронной промышленности будут и впредь настойчиво бороться за повышение эффективности и качества работы, за выполнение планов партии по коммунистическому строительству и достойно встретят XXVI съезд КПСС.

Желаю вам, дорогие товарищи, новых успехов в труде на благо нашей великой Родины.



Л. БРЕЖНЕВ

4867-9 м

# ЭЛЕКТРОННАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

**1980**      **10**  
ГОД ИЗДАНИЯ ОДИННАДЦАТЫЙ-ВЫПУСК(94)

---

## СОДЕРЖАНИЕ

---

3 *Митюшин Ю.Б.* Развитие автоматизированных систем управления в отрасли

### ПОЛИМЕРНЫЕ И ГЕРМЕТИЗИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

7 *Богомолов И.И., Гилевский В.И., Дымченко Ф.Е., Прокопова Т.В.* Полимерные пленочные и конструкционные материалы

8 *Николаев В.М., Труфанова К.А., Филоненко В.И., Шубин Н.Е.* Оптически прозрачные герметизирующие материалы

10 *Пойманов А.М., Сергиенко Ю.П., Шубин Н.Е.* Герметизирующие материалы для изделий электронной техники

12 *Айзенберг Б.Д., Баратов А.Г.* Фототермопластические носители информации

16 *Айзенберг Б.Д., Бородкина М.С., Козлов П.В., Пузова Л.Т.* Способность сополимеров стирола с бутадиеном к образованию рельефа при одновременном методе записи информации

18 *Баратов А.Г., Луковник А.В., Рожков О.В., Федоров И.Г.* Особенности воспроизведения фазово-оптической информации с фототермопластических носителей

22 *Воробьев Г.А., Джатиева Р.Д.* Электро- и теплопроводящие клеи для микроэлектроники

24 *Баратов А.Г., Бекичева Л.И.* Металлополимерные носители информации для перфорации лазерным лучом

### ИССЛЕДОВАНИЯ. РАЗРАБОТКИ. МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ

26 *Мартюшов К.И.* Туннельно-барьерный механизм электропроводности керметных материалов

28 *Алябьев И.В., Папков В.С., Сурувилов М.В., Чумак В.Д.* Современное состояние и перспективы использования КНС-структур

35 *Белоусов В.И., Вигдорovich Е.Н., Саламатин Б.А., Федоров В.А.* Термодинамические методы в технологии полупроводниковых материалов

41 *Белоусова Л. Г., Вальская М.Ф., Веселова С.С.* Прогнозирование коррозионной стойкости материалов и изделий электронной техники

45 *Иванов В.И., Терехин Н.Ф., Туев Г.В.* Прогнозирование потребности материалов в производстве интегральных микросхем

## ОБМЕН ОПЫТОМ

- 47 *Болгов И.С., Бормотов Ю.Л., Бурков А.Т., Гришмановский Л.Е., Орлов А.Д., Хозилов В.С.* Применение биметаллов с полосчатыми покрытиями в производстве микропереключателей
- 49 *Болгов И.С., Мухомин В.Д., Нефедов В.И., Трахониотовская О.В.* Получение прецезионной плющеной ленты из вольфрама
- 51 *Болгов И.С., Бусол Ф.И., Волков А.В., Мухомин В.Д.* Проволока из алюминиевых сплавов для внутренних соединений в изделиях микроэлектроники
- 53 *Волков А.Ф., Куценко В.К., Новиков В.В., Папков Н.С., Петров С.В., Суворов В.М.* Мягкие режимы термообработки — основа бездефектной технологии микросхем
- 57 *Дмитриева Г.А., Марин К.Г., Свердлов И.А., Чамов А.В.* Перспективные направления химической обработки полупроводников
- 58 *Алексахин Г.Ф., Алябьев И.В., Макаров С.Ю.* Механическая обработка кристаллов сапфира
- 61 *Пинчук В.Н., Рыбина Г.К., Стефанов Д.Т., Терехов Н.И.* Линия очистки сточных вод от мышьяка

62 *Буряченко В.Ф., Нелюбин А.Ф., Тишин Е.А.* Надежный метод контроля качества поверхности деталей полупроводниковых приборов

63 *Родионова А.А., Яснов В.С.* Материалы для химической и фотолитографической обработки кремниевых пластин

## СООБЩЕНИЯ

64 *Пашенко Н.А.* Новости зарубежной электроники

## РЕКЛАМА

6 Монокристаллический сульфид цинка. Пластины фосфида индия

46 *Борисовский С.П., Чульева Е.Г., Яковлев Ю.М.* Одночастотные газовые лазеры ЛГ-77 и ЛГ-149-1

68 *Орлов Ю.И.* Газоразрядные индикаторные крупноэлементные панели ИГПП-32/33 и ИГПП-16/32

*Лобан В.И.* Индикатор матричный газоразрядный ИМГ-1 (третья сторона обложки)

# РАЗВИТИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В ОТРАСЛИ

Ю. Б. МИТЮШИН

Совершенствование планирования и управления в значительной степени зависит от уровня использования экономико-математических методов (ЭММ) и ЭВМ.

В настоящее время в отрасли функционируют отраслевая автоматизированная система управления (ОАСУ) и автоматизированные системы управления объединениями, предприятиями, НИИ (КБ), которые решают ряд задач по учету и отчетности, оперативному регулированию производства, технико-экономическому планированию, материально-техническому снабжению и сбыту, информационному обеспечению специалистов отрасли.

В десятой пятилетке осуществлялся переход к интеграции отдельных подсистем ОАСУ в функциональные комплексы (управление развитием отрасли, ее научной и промышленной деятельностью, оперативное управление, система научно-технической информации), внедрению вычислительной техники третьего поколения — ЕС ЭВМ (использование операционной системы ОС ЕС, СУБД, телеобработки, ППП общего назначения), к созданию банков данных и нормативной базы перспективного планирования. Повысилась достоверность и своевременность информации, сбор которой производится во многих случаях на машинных носителях (ПЛ и МЛ).

Общий годовой объем собираемой и обрабатываемой на ГВЦ технико-экономической информации составляет более  $300 \cdot 10^6$  алфавитно-цифровых символов, а выходной информации (машинограмм) с ГВЦ — более  $1500 \cdot 10^6$  символов.

Основное внимание при разработке ОАСУ уделяется комплексному подходу к решению задач перспективного и текущего планирования промышленной деятельности отрасли. На основе экономико-математических динамических моделей, представляющих собой систему дифференциальных уравнений, действует система перспективных плановых расчетов. Взаимосвязанный комплекс моделей и специальная процедура многоуровневого планирования обеспечивают согласованность расчета технико-экономических показателей на уровнях: отрасль в целом, главные управления, предприятия.

Разработанный комплекс задач по управлению сбытом, реализованный на ЕС ЭВМ, включает в себя: определение потребности в изделиях отрасли (с учетом как внешних, так и внутренних фондодержателей); определение фондов, выделяемых фондодержателям, с одновременным формированием для них фондовых извещений, а для предприятий отрасли — планов поставок изделий; оперативное перераспределение выделенных фондов с учетом меняющейся потребности фондодержателей, а также контроль за ходом выполнения заключенных предприятиями отрасли договоров на поставку изделий. Указанные задачи информационно, методически и организационно взаимосвязаны на всех уровнях управления как внутри отрасли (предприятие—министерство), так и вне ее (фондодержатель—министерство).

Все основные фондодержатели страны получают машинные распечатки фондовых извещений на машинных носителях, которые затем ими используются для обработки в своих отраслевых АСУ с целью распределения выделенных фондов между предприятиями отрасли.

За годы десятой пятилетки создана база для перевода ОАСУ на вычислительную технику третьего поколения, освоены и внедрены ОС ЕС новейших версий и пакеты прикладных программ общего назначения; внедрена система управления базами данных типа ОКА; разработаны и внедрены оригинальные программы и пакеты программ, а также нормативно-техническая документация по организации и технологии обработки информации на ЕС ЭВМ.

Программные средства общего назначения используются при разработке прикладных программ и обеспечивают функционирование вычислительного комплекса на базе ЕС ЭВМ.

Фонд алгоритмов и программ ОАСУ, в котором сосредоточена вся программная документация, используется как разработчиками отраслевой системы, так и для проведения обмена данными с отраслевыми и специализированными фондами смежных отраслей и оказания технической помощи предприятиям отрасли.

Одной из важнейших проблем разработки ОАСУ

является создание единого информационного обеспечения для планирования и управления отраслью, которое предполагает, в свою очередь, создание единой системы классификации и кодирования технико-экономической информации по всем уровням (ОАСУ, АСУО, АСУРП), разработку, внедрение и ведение унифицированных форм документов (УФД). Обеспечение комплексного характера разработки, внедрения и ведения необходимых классификаторов и УФД требует повышения ответственности головных и базовых служб, служб ведения УФД и КТЭИ на предприятиях (организациях) отрасли.

В разработанных ранее классификаторах продукции отсутствуют технико-экономические признаки, необходимые для решения задач АСУ отрасли, дублируются отдельные позиции, существует разная значимость кода ВГК ОКП. Все это затрудняет обработку плановой и отчетной документации предприятий и организаций отрасли.

Упорядочение и переработка классификаторов, модернизация отраслевого раздела ОКП, отраслевых классификаторов непрофильной продукции и материалов, а также создание единого номенклатурного перечня продукции (ЕНПП), что особенно актуально для электронной промышленности как многономенклатурной отрасли, является основным условием в работе по повышению эффективности АСУ.

Разработка ЕНПП позволит обеспечить информационную увязку номенклатурных задач планирования, учета и анализа производства, сбыта, расчета сводных норм в материалах на ИЭТ на всех уровнях управления отраслью и сопряженность с АСПР Госплана СССР.

В настоящее время разрабатываются машинно-ориентированные (внутримашинные) коды номенклатурных позиций, которые будут использоваться в системе машинного ведения ЕНПП.

Уже сдана в эксплуатацию часть отраслевой автоматизированной системы ведения классификаторов (ОАСВК), которая обеспечивает машинное ведение и издание томов классификаторов технико-экономической информации и отраслевого раздела общесоюзного классификатора предприятий и организаций отрасли (ОКПО).

В результате проведенных работ по унификации форм документов значительно сократилось число форм входных документов на отраслевом уровне и на уровне предприятий.

Внедрение на объединениях и предприятиях отрасли АСУО и АСУП позволило повысить качество и эффективность управления. В составе АСУП наиболее широкое распространение получили комплексы задач по управлению сбытом и реализацией гото-

вой продукции, оперативно-календарному планированию и управлению производством, в том числе по оперативному контролю за ходом производства и планированию запуска на определяющие операции. На многих предприятиях АСУ стали неотъемлемой частью действующей системы управления. Внедрение АСУП одновременно с проведением организационных мероприятий на ряде предприятий отрасли способствовало повышению уровня выполнения договорных обязательств и повышению ритмичности производства.

Наряду с отмеченными достижениями в использовании ЭВМ и экономико-математических методов в управлении отраслью имеется ряд нерешенных проблем, сдерживающих темп и качественный уровень работ в области создания и использования АСУ. Основной удельный вес в АСУ на всех уровнях составляют задачи, связанные с обработкой статистической отчетности и автоматизацией расчетной работы аппарата управления, а оптимизационные задачи решаются еще в недостаточном объеме.

Для ликвидации недостатков в разработке информационного обеспечения АСУ отрасли необходимо ускорить внедрение ЕНПП, решить проблему его машинного ведения, завершить разработку альбомов унифицированных форм первичных документов на уровне объединения и предприятия.

С целью совершенствования планирования и управления отраслью на базе внедрения современных средств вычислительной техники и экономико-математических методов разработана "Комплексная программа развития АСУ в электронной промышленности в одиннадцатой пятилетке".

Программа охватывает все уровни управления в отрасли: министерство — главное управление — предприятие. Развитие АСУ предусматривается на основе совершенствования методов планирования (вариантной проработки планов и оптимизации плановых решений с использованием научно обоснованных нормативов), их учета и анализа в соответствии с постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР "Об улучшении планирования и усилении воздействия хозяйственного механизма на повышение эффективного производства и качества работы".

Для создания и развития АСУ предусмотрено выделение соответствующих технических средств и финансирование в сроки, обеспечивающие внедрение запланированных АСУ в одиннадцатой пятилетке.

Программа определяет состав исследований и работ по общесистемному, методическому, информационному, программному, техническому, организационно-технологическому обеспечению, а также требования к взаимодействию с АСПР и отрасле-

выми АСУ. Устанавливаются последовательность и сроки внедрения работ, а также основные разработки. Предусматривается интеграция функциональных подсистем в функциональные комплексы.

Программа включает совокупность заданий, определяющих сроки ввода новых и развитие действующих АСУ; выполнение НИР и ОКР по развитию и совершенствованию системы управления отраслью на базе внедрения современных средств ВТ и АСУ; получение экономического эффекта от мероприятий по внедрению вычислительной техники и АСУ; определение потребности в ЭВМ, периферийном и других видах оборудования; поставки средств вычислительной техники для оснащения АСУО, АСУП, АСУРП по главным управлениям и для развития ОАСУ; объем государственных капитальных вложений на внедрение вычислительной техники и АСУ.

Основные направления развития АСУ в отрасли в одиннадцатой пятилетке предусматривают:

- дальнейшее расширение автоматизируемых функций управления преимущественно за счет прогнозных, плановых и аналитических задач, а также развития нормативной базы;

- повышение обоснованности, комплексности и сбалансированности планов (долгосрочных, пятилетних, текущих), включая формирование годовых планов на основе заданий и нормативов пятилетнего плана с необходимой детализацией и конкретизацией:

- повышение полноты контроля и анализа выполнения планов и деятельности предприятий и организаций отрасли, обеспечивающих переход от фиксации расхождений между отчетом и планом к активному воздействию на ход выполнения плана, сведение к минимуму возникающих отклонений;

- улучшение форм и повышение оперативности представления информации пользователям, включая непосредственное представление информации через видеотерминалы руководителям отрасли; обеспечение обслуживания пользователей не только по регламенту, но также в виде запроса и диалога;

- создание интегрированных банков данных технико-экономической и научно-технической (документальной и фактографической) информации, ориентированных как на решение задач управления (ОАСУ, АСУО, АСУП, АСУРП), так и на автоматизацию проектирования;

- обеспечение взаимодействия ОАСУ с АСУ Госплана СССР и АСУО, АСУП и АСУРП на основе согласованной методологии планирования, учета и анализа, единого информационного обеспечения, иерархической сети вычислительных центров.

В соответствии с программой количество вновь разрабатываемых АСУ предполагается сократить, а

основные усилия направить на повышение эффективности ОАСУ и уже функционирующих АСУО (АСУП). Для этого необходимо наладить обмен передовым опытом по решению задач по всем функциям управления, что позволит повысить экономии производственных, трудовых и финансовых ресурсов по сравнению с достигнутым уровнем.

Внедрение АСУ должно проводиться одновременно с совершенствованием организационных форм и методов конструкторской и технологической подготовки производства, улучшением организации производства и труда, внедрением новых форм и методов планирования и учета, а также системы материального стимулирования.

Предусматривается создание дифференцированных по всем уровням управления норм и нормативов, позволяющих обоснованно рассчитывать потребности в основных видах материальных и трудовых ресурсов, планировать и учитывать объемы выпуска в натуральном и стоимостном выражении.

Предприятиям, укомплектованным необходимыми кадрами и имеющим наилучшие технико-экономические показатели от внедрения АСУП, могут быть выделены дополнительные ЭВМ. Расширение и развитие АСУ на остальных предприятиях планируется осуществлять на базе имеющихся ЭВМ с доукомплектованием их дополнительными устройствами и периферийной техникой.

Одной из необходимых предпосылок эффективного внедрения АСУП является обеспечение их достоверной информацией. Система сбора, регистрации и хранения первичной информации должна строиться на широком применении технических средств с использованием микро- и мини-ЭВМ: регистраторов информации, терминальных устройств, систем оперативно-диспетчерского управления, систем передачи данных с непосредственным вводом в ЭВМ. Такие системы, созданные на уровне цехов и участков, должны обеспечить сбор и ввод информации непосредственно с рабочих мест, контроль достоверности вводимой информации, обработку ее для решения ряда оперативных задач и агрегирование информации для последующей передачи на верхние уровни.

Для осуществления взаимосвязи АСУП с АСУТП целесообразно создавать автоматические линии с одновременной разработкой АСУ этих линий на базе микро-ЭВМ, которые наряду с управлением технологическими агрегатами и режимами будут применяться для учета изготовленных изделий по операциям, прогнозирования качества изделий, их надежности, а также учета простоев оборудования. Наличие такой автоматически получаемой информации даст возможность решить широкий круг задач по



анализу использования оборудования и совершенствованию его эксплуатации.

Методические материалы и комплексы задач АСУ для всех уровней управления (отрасль—подотрасль—предприятие) охватывают следующие функциональные комплексы: "Управление развитием отрасли", "Управление промышленной деятельностью отрасли", "Оперативное управление", "Управление научной деятельностью отрасли", "Управление качеством изделий отрасли".

Внутри каждого функционального комплекса задания сгруппированы по соответствующим направлениям. Так, все задания по функциональному комплексу "Управление развитием отрасли" объединены в три группы: прогнозирование перспективной потребности в изделиях отрасли; перспективное планирование промышленной деятельности отрасли; управление проектированием и капитальным строительством. Число уровней и заданий зависит от степени детализации рассматриваемой функции управления и от состава объектов, на которых она реализуется. Так, задания по управлению проектированием и капитальным строительством реализуются на уровне министерства, главного управления, предприятия, а по прогнозированию перспективной потребности в изделиях отрасли — на уровне министерства.

Одной из важных проблем развития АСУ в одиннадцатой пятилетке является создание общесистемного обеспечения, включающего информационное, программное, техническое и организационно-технологическое обеспечение.

В области информационного обеспечения предстоит завершить разработку единых для ОАСУ, АСУО, АСУП и АСУРП классификаторов информации на базе общесоюзных классификаторов и единых систем кодирования, а в случае необходимости — методов и средств перекодировки информации при переходе с одного уровня управления на другой. Основное внимание необходимо уделить внедрению ЕНПП для решения задач АСУ и реализации его машинного ведения.

Предполагается завершить унификацию форм планово-отчетной документации, циркулирующей между предприятиями (объединениями) и министерством, с одновременным приведением этой документации к виду, удобному для машинной обработки.

Реализация программы развития АСУ будет способствовать дальнейшему росту эффективности производства и качества продукции, снижению себестоимости изделий отрасли, максимальному удовлетворению потребностей народного хозяйства в ИЭТ.

Статья поступила 9 июня 1980 г.

## РЕКЛАМА · ЭП · РЕКЛАМА

### МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ СУЛЬФИД ЦИНКА

Используется для изготовления светодиодов видимой области спектра, холодных катодов электронных ламп, фотодиодов, а также в тонкопленочной технологии и оптоэлектронике.

#### ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Размеры слитка, мм

высокоомный ZnS

диаметр ..... 20—25  
высота ..... до 100

низкоомный ZnS

диаметр ..... 20—25  
толщина ..... 3—4

Удельное сопротивление, Ом·см:

высокоомный ZnS .....  $10^{10}$ — $10^{13}$   
низкоомный ZnS .....  $1,0$ — $10^3$

Подвижность электронов

при 300K,  $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  ..... 70—100

Содержание примесей, %:

медь .....  $\leq 5 \cdot 10^{-5}$

серебро .....  $\leq 1 \cdot 10^{-5}$

железо .....  $\leq 1 \cdot 10^{-4}$

кремний .....  $\leq 1 \cdot 10^{-3}$

магний .....  $\leq 1 \cdot 10^{-4}$

Полиэтиленовые пакеты с монокристаллом упаковываются в полистироловые коробки.

### ПЛАСТИНЫ ФОСФИДА ИНДИЯ

Используются для изготовления эпитаксиальных структур и непосредственно в производстве изделий электронной техники.

#### ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Диаметр, мм ..... до  $60 \pm 0,5$

Толщина, мкм ..... 400

Тип проводимости ..... n, p

Ориентация ..... (111), (100)

Прогиб, мкм ..... 90

Поверхность пластин полированная.

Упаковка: кассеты из полистирола.



## ELECTRONZAGRANPOSTAVKA

THE GENERAL SUPPLIER OF THE PRODUCTS  
OF THE ELECTRONIC INDUSTRY OF THE USSR

24/2, Ul. Usievicha, Moscow 125315, USSR

Cable: Ezop Telephone: 155-49-15 Telex: 7626



## Techsnabexport

Moskva 6-200 ☎ 244-32-85 📠 7239

# ПОЛИМЕРНЫЕ И ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.315.616.9

И. И. Богомолов, В. И. Гилевский,  
Ф. Е. Дымченко, Т. В. Прокопова

## ПОЛИМЕРНЫЕ ПЛЕНОЧНЫЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Разработанные полимерные пленочные материалы, в частности литые диаллилфталатные реактопласты, стекло- и древеснонаполненные, с высоким коэффициентом отражения, цветные термопласты, СВЧ поглощающие полимерные прокладки нашли широкое применение в производстве различных приборов электронной техники.

Научно-технический прогресс и совершенствование традиционных направлений развития отрасли требуют постоянного поиска новых материалов, улучшения качества и увеличения объемов выпуска ранее освоенных.

*Полимерные пленочные материалы* находят большое применение в производстве пассивных компонентов изделий электронной техники (конденсаторов, резисторов, сборочных лент и др.).

Наиболее распространенным материалом для изготовления низковольтных конденсаторов является полиэтилентерефталатная (лавсановая) пленка толщиной 3—10 мкм. Полимерные пленки из лавсана используют и в качестве звукоприемников динамических микрофонов. Замена лавсановых пленок поликарбонатными при изготовлении диафрагм микрофонов позволяет повысить их чувствительность в низкочастотном диапазоне почти в 2 раза.

Разработанные оборудование и технология обеспечивают получение поликарбонатных пленок ПК-20, ПК-30 толщиной соответственно 20 и 30 мкм, которые используются в динамических микрофонах серий МД-52, МД-201, МД-71, МД-78.

Предъявляемые в настоящее время к переменным проволочным резисторам повышенные требования по надежности и технологичности изделий не могут быть выполнены, если использовать в качестве резистивных элементов традиционные материалы: электрокартон, стеклопластики или керамику.

Внедрение поликарбонатной пленки ПКК толщиной 500 мкм для каркасов резистивного элемента в резисторах марки СП5-28Б позволило улучшить их характеристики и автоматизировать процесс изготовления.

Основные характеристики поликарбонатных пленок приведены в табл. 1.

*Конструкционные пластмассы.* В их число входят диаллилфталатные материалы, которые используются для изделий радиоэлектроники, эксплуатируемых при температурах от -60 до +250 °С. Эти материалы обладают химической устойчивостью к окислителям, ряду растворителей, маслам, повышенной влагостойкостью, устойчивостью к истиранию. Диаллилфталаты не вызывают коррозии ме-

таллической арматуры. Изделия из них отличаются хорошей стабильностью размеров.

Гранулированные диаллилфталатные материалы перерабатываются на серийных реактопластавтоматах литьем под давлением.

Стеклонаполненные диаллилфталаты марок ДАИФ-СЛ и ДАФ-СЛ используются в различных изделиях. Применение реактопласта ДАИФ-СЛ целесообразно для изготовления деталей аппаратуры массой от 13 до 127 г с толщиной стенок до 0,4 мм; ДАФ-СЛ, используемый при изготовлении деталей блоков трансформаторов типа БТИ2-10, может быть внедрен в производство электрических соединителей, работающих в различных климатических условиях (РПМ, ГРПМ I, 2РМ, РГ, РШ), и изделий технологического назначения (типа УКУ2-1).

Таблица 1  
Физико-механические и электроизоляционные свойства поликарбонатных пленок

Наименование показателей	ПК	ПКК
Толщина, мкм	20; 30	500
Ширина, мм	50—200	200
Разрушающее напряжение при растяжении, МН/м <sup>2</sup>	800	630
Относительное удлинение при разрыве, %	100—140	100
Водопоглощение, %	0,2	0,2
Электрическая прочность, кВ/мм	100—160	35—45
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см	$2 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{16}$
Диэлектрическая проницаемость	—	3,1—3,2
Тангенс угла диэлектрических потерь	$(1,2—1,4) \cdot 10^{-3}$	$(1,2—1,4) \cdot 10^{-3}$
Усадка после воздействия температуры +125°С в течение 10 мин. не более	0,02	0,03
Диапазон рабочих температур, °С	от -60 до +125	от -60 до +125

Таблица 2  
Физико-механические и электроизоляционные свойства конструкционных пластмасс

Наименование показателей	ДАИФ-СЛ	ДАФ-СЛ	ДАФ-ДЛ
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,2	2,2	1,5
Показатель текучести, мм	200	200	190
Разрушающее напряжение, МН/м <sup>2</sup> при растяжении	85	80	45
при сжатии	180	180	120
при изгибе	155	180	82
Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	10—15	6—10	4—6
Теплостойкость по Мартенсу, °С	300	250	200
Водопоглощение, %	0,08	0,08	0,3
Электрическая прочность, кВ/мм	27	22	15
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см	$8 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{16}$	$10^{15}$
Диэлектрическая проницаемость	5	4,6	5
Тангенс угла диэлектрических потерь	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Усадка образцов после термообработки, %	0,6—0,7	0,6—0,7	0,6—0,7
Грибоустойчивость, балл	0—1	0—1	0—1

Таблица 3

Изменение параметров пластмасс после воздействия влаги

Наименование показателей	ДАИФ-СЛ				ДАФ-СЛ				ДАФ-ДЛ			
	$\rho_{\text{в}}$ , Ом·см	$\text{tg}\delta$	$\epsilon$	$E$ , кВ/мм	$\rho_{\text{в}}$ , Ом·см	$\text{tg}\delta$	$\epsilon$	$E$ , кВ/мм	$\rho_{\text{в}}$ , Ом·см	$\text{tg}\delta$	$\epsilon$	$E$ , кВ/мм
Исходное состояние	$8 \cdot 10^{18}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	5	25	$2 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{-2}$	4,6	25	$3 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{-2}$	5	17
Воздействие влаги в течение 10 суток	$10^{18}$	$2 \cdot 10^{-2}$	5,5	25	$10^{18}$	$4 \cdot 10^{-2}$	5	22	$5 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{-2}$	5,2	16
в течение 30 суток	$6 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{-2}$	5,6	22	$5 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{-2}$	5,2	21	$10^{12}$	$2 \cdot 10^{-2}$	5,5	15
в течение 56 суток	$6 \cdot 10^{14}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	5,6	21	$6 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{-2}$	5,2	20	$8 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{-2}$	6	15

Таблица 4

Изменение параметров пластмасс после длительного теплового воздействия

Наименование показателей	ДАИФ-СЛ		ДАФ-СЛ		ДАФ-ДЛ	
	500 (250°C)	5000 (200°C)	5000 (200°C)	5000 (180°C)	5000 (125°C)	1000 (170°C)
Длительность воздействия тепла (при температуре), ч						
Разрушающее напряжение при статическом изгибе, МН/м <sup>2</sup>	130	177	135	130	83	80
Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	9	10	6	10	4	3
Электрическая прочность, кВ/мм	18	17	15	15	15	12
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см	$2 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^4$
Диэлектрическая проницаемость	5,1	5,5	4,8	4,6	5	4,8
Тангенс угла диэлектрических потерь	$4 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$

Таблица 5

Свойства светоотражающих пластмасс

Наименование показателей	ПБ-003	ДАИФ-БЛ
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,2	180 (мм)
Показатель текучести	7,5 (г/10 мин)	
Разрушающее напряжение, МН/м <sup>2</sup>		
при растяжении	66	—
при изгибе	80	12
Диапазон рабочих температур, °С	-60 ... +125	-60 ... +125 (150)
Водопоглощение, %	0,1	0,2
Электрическая прочность, кВ/мм	23	22
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см	$2 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{18}$
Диэлектрическая проницаемость	2,8	5,2
Тангенс угла диэлектрических потерь	$3 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$
Усадка при литье, %	0,6-0,8	0,5-0,7
Коэффициент отражения в области длин волн 550-710 нм		
в исходном состоянии	0,86	0,87
после воздействия температуры:		
90°C в течение 5000 ч	0,85	0,85
125°C в течение 1000 ч	0,74	0,76
Грибостойкость, балл	2	0

Материал ДАФ-ДЛ с древесной мукой в качестве наполнителя с успехом используется для изготовления подшипников микроэлектродвигателей.

Основные свойства материалов ДАФ-СЛ, ДАИФ-СЛ, ДАФ-ДЛ представлены в табл. 2-4.

Увеличение объемов выпуска цифровых индикаторов в связи с постоянным ростом производства приборов вычислительной техники потребовало разработки материалов, обладающих набором определенных свойств. К их числу относятся термопластичный и термореактивный белые непрозрачные материалы ПБ-003 (на основе поликарбоната марки дифлон) и ДИАФ-БЛ, обладающие стабильным коэффициентом отражения в области длин волн 550-710 нм (табл. 5).

Организован выпуск окрашенных термопластов — поликарбоната, полистирола и АБС — пластика белого, синего, зеленого, желтого и красного цветов — для изготовления световых экранов кнопочных переключателей, световых табло ЭВМ, клавиатур микрокалькуляторов и других конструктивных деталей.

Полимерные материалы широко используются и в новых разработках бытовых приборов.

Оборудование и технология изготовления СВЧ-поглощающих полимерных прокладок, обеспечивающих коэффициент затухания излучения не менее 10 дБ, позволили упростить конструкцию электробытовой печи «Электроника», причем использование более совершенных наполнителей дало возможность получать прокладки с затуханием не менее 20 дБ.

Внедрение прогрессивных полимерных материалов, разработанных в отрасли, позволяет повысить эффективность изготовления и надежность работы изделий.

Статья поступила 1 апреля 1980 г.

УДК 621.315.616.97

В.М. Николаев, К.А. Труфанова,  
В.И. Филоненко, Н.Е. Шубин

## ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫЕ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Применение оптически прозрачных герметизирующих материалов позволяет организовать массовый выпуск оптоэлектронных приборов различного назначения.

Корпус оптоэлектронного прибора помимо защиты активного элемента от воздействия окружающей среды выполняет функцию направленной передачи

светового потока. В связи с этим полимерные материалы, применяемые для герметизации светодиодов, цифро-буквенных индикаторов и других оптоэлектронных приборов, должны иметь высокое светопропускание в видимой области спектра и сохранять его в условиях эксплуатации прибора. Этим требованиям отвечают разработанные оптически прозрачные материалы: жидкие и порошкообразные заливочные компаунды марок ОП-3, ОП-3М, ОПР, ОР, ОП, пресс-материал марки ОПП [1, 2] и оптические клеи марок ОПН-1, ОПН-2, ПО-2, ОПК-1, ОПК-2. Указанные герметизирующие материалы обладают высокими диэлектрическими и физико-механическими свойствами, низким водопоглощением, достаточной жизнеспособностью и длительным сроком хранения (табл. 1).

Высокое светопропускание указанных материалов сохраняется и после длительного воздействия повышенной температуры и влажности (рис. 1). По оптическим и физико-механическим свойствам эти герметизирующие материалы не уступают зарубежным герметикам аналогичного состава и назначения [3, 4].

Для увеличения контрастности свечения приборов герметизирующие компаунды окрашивают в красный, желтый, зеленый цвет. При этом спектр пропускания окрашенного компаунда согласовывают со спектром излучения прибора (рис. 2).

В последнее время в устройствах визуального контроля используют индикаторы с высотой знака 7–15 мм. Для таких приборов разработаны светорассеивающие компаунды марок ОПР, ОР, которые имеют высокое интегральное светопропускание и интенсивное светорассеяние, что позволяет значительно расширить угол обзора индикатора.

Герметизация компаундами ОП-3 ОП-3М, ОПР, ОР осуществляется заливкой в форму; герметизация порошкообразным компаундом ОП требует его предварительного плавления с последующей заливкой или нанесения предварительно отформованной таблетки на герметизируемый прибор с последующим плавлением и отверждением. При использовании пресс-материала ОПП применяется трансферное прессование при удельном давлении (0,3–5) МПа. использование указанных материалов в производстве изделий оптоэлектроники позволяет увеличить надежность приборов в условиях резких колебаний температуры и механических нагрузок.

Широкое применение для сборки узлов и деталей приборов при герметизации стеклянных и стеклокерамических корпусов нашли оптические клеи. В зависимости от конструкции прибора и допустимых технологических температур используют жидкие, порошкообразные и пленочные клеи, отверждаемые при температурах от 20 до 140°С.

Наибольшее распространение в настоящее время получили жидкие клеи, отверждаемые при комнатной температуре или при температурах до 100°С, например оптический клей ОК-72ф. Однако этот клей не влагостоек. Поэтому взамен него разработаны

Таблица 1

Свойства оптически прозрачных герметизирующих материалов

Наименование показателей	Заливочные компаунды			Светорассеивающие компаунды		Пресс-материал (ОПП)
	ОП-3	ОП-3М	ОП	ОПР	ОР	
Внешний вид	Бесцветная или слабоокрашенная жидкость		Порошок белого цвета	Полупрозрачная жидкость белого, желтого, зеленого, красного цвета		Порошок белого цвета
Показатель преломления	1,517	1,515	1,603	—	—	1,574
Рабочая температура, °С	125–130	125–130	150	125–130	125–130	125–130
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10 <sup>4</sup> Гц и температуре 20°С	< 0,015	< 0,015	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,03
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10 <sup>4</sup> Гц и температуре 20°С	< 4,0	< 4,0	< 4,5	< 4,0	< 4,0	< 4,0
Удельное объемное электрическое сопротивление при температуре 20°С, Ом·см	> 10 <sup>11</sup>	> 10 <sup>11</sup>	> 10 <sup>11</sup>	> 10 <sup>11</sup>	> 10 <sup>11</sup>	> 10 <sup>11</sup>
Предел прочности при растяжении, МПа	25	30	60	20	40	73
Температурный коэффициент линейного расширения, 10 <sup>-6</sup> /°С	50–55	65–70	40–50	70–75	65–70	49
Водопоглощение в холодной воде за 24 ч, %	< 0,3	< 0,3	< 0,3	< 0,3	< 0,3	< 0,15
Режим отверждения: Температура, °С	125	125	160	125	125	160
Продолжительность, ч	10	10	24	10	10	5 мин в форме
Срок хранения, сут	5	5	365	3	2	6–8 мин в форме
Время желтого цвета, мин (120°С)	> 10 (120°С)	> 10 (120°С)	> 10 (150°С)	> 10 (120°С)	> 10 (120°С)	20 (160°С)
Срок хранения компонентов материала, мес	3	3	12	3	2	—

Таблица 2

Свойства оптических клеев

Наименование показателей	ОПН-1	ОПН-2	ПО-2	ОПК-1	ОПК-2
Интервал рабочих температур, °С	-60...125	-60...125	-60...125	-60...200	-60...200
Показатель преломления	1,555	1,491	—	1,5835	1,5960
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см	> 6·10 <sup>11</sup>	> 6·10 <sup>11</sup>	> 10 <sup>11</sup>	10 <sup>11</sup>	10 <sup>11</sup>
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10 <sup>4</sup> Гц и температуре 25–35°С	2·10 <sup>-3</sup>	2,6·10 <sup>-3</sup>	1,9·10 <sup>-3</sup>	1,5·10 <sup>-3</sup>	2,3·10 <sup>-3</sup>
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10 <sup>4</sup> Гц и температуре 25–35°С	3,8	4,3	4,5	3,9	4,1
Прочность клеевого соединения стекло-стекло на сдвиг, МПа	> 9	> 8	15	3	5
Водопоглощение в холодной воде за 24 ч, %	0,1	0,3	0,13	0,4	0,3
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	70	72,5	—	—	—
Вязкость кинематическая при 20°С, сСт	1100–1300	600–700	—	—	—
Жизнеспособность при комнатной температуре	4–5 ч	1,5–2 ч	1 мес	1 год	1 год
Режим отверждения: Температура, °С	80	80	130	160	160
Продолжительность, мин	20	20	24	24	24
Срок хранения, мес	2	2	2	12	12

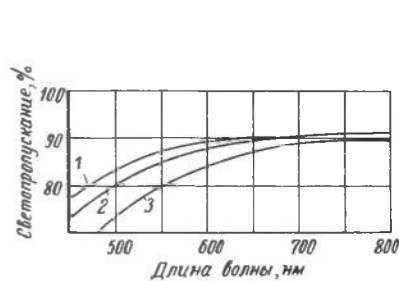


Рис. 1. Светопропускание образцов компаунда ОП-3 в исходном состоянии (1), после хранения в течение 30 суток в камере влаги (2), после хранения в течение 1000 ч при температуре 125°С (3)

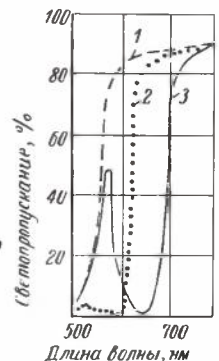


Рис. 2. Спектры пропускания компаунда ОП: желтого цвета (1), красного цвета (2), зеленого цвета (3)

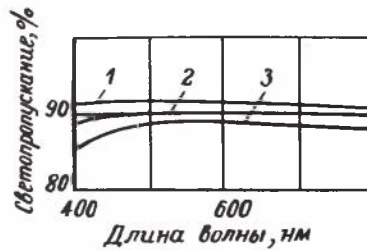


Рис. 3. Светопропускание образцов клея ОПН-1, ОПН-2 в исходном состоянии (1), после хранения в течение 30 суток в камере влаги (2), после хранения в течение 1000 ч при температуре 125°C (3)

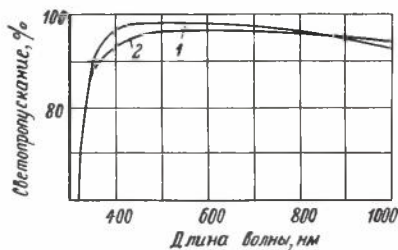


Рис. 4. Светопропускание клея ПО-2 в исходном состоянии (1), после хранения в течение 1000 ч при температуре 120°C (2)

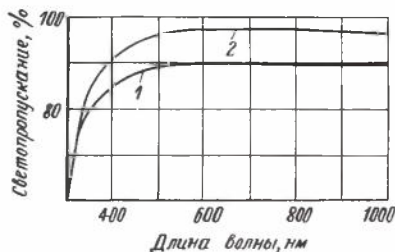


Рис. 5. Светопропускание клея ОПК в исходном состоянии (1) и после хранения в течение 1000 ч при температуре 150°C (2)

жидкие оптические клеи марок ОПН-1, ОПН-2 с температурой отверждения 20–80°С обладающие повышенной влагостойкостью и стабильными оптическими свойствами (табл. 2, рис. 3), а также пленочный оптический клей ПО-2 и порошкообразные термостойкие клеи ОПК-1 и ОПК-2, позволяющие механизировать процесс сборки и герметизации оптических деталей. Клеи обладают высокими диэлектрическими и адгезионными свойствами, высоким светопропусканием, повышенной термостойкостью (рис. 4, 5).

По оптическим, физико-механическим и технологическим свойствам эти клеи не уступают зарубежным аналогам — клеям марок Epo-Tec 301, 301-2, 305 (фирма Epoxy Technology, США) [5].

Клеи могут быть изготовлены в виде пластинок определенной конфигурации, таблеток, стержней, карандашей или в виде твердого покрытия на поверхности склеиваемых деталей.

Дальнейшие работы в области разработки специальных материалов для оптоэлектроники направлены на получение материалов из компонентов высокой степени чистоты и обработку промышленных процессов их получения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Групповой метод герметизации светодиодов / В.М. Николаев, К.А. Труфанова, В.И. Филоненко, Г.И. Плешивцева. — Электронная техника. Сер. Технология и организация производства и оборудование, 1978, вып. 6, с. 64.
2. Эпоксидный оптически прозрачный пресс-материал / А.М. Пойманов, Е.Б. Тростянская, Н.Е. Шубин, Н.С. Журавлев. — Электронная техника. Сер. Материалы, 1976, вып. 4, с. 94.
3. Пат. 49-48175 (Япония). Хаяси Сюньити, Кавамото Норю. — Нитто дэнки когё К.К., 19.12.1974.
4. Пат. 50-32279 (Япония). Оно Такэо, Ямамото Рёта, Яммото Кацужиро, Хаяси Сюньити. — Нитто дэнки когё К.К., 18.10.1975.
5. Materials and processes. Clear epoxy. — Product Engineering, 1978, N 12, p. 85.

Статья поступила 1 апреля 1980 г.

УДК 621.315.616.97 621.38

А. М. Пойманов, Ю. П. Сергиенко, Н. Е. Шубин

## ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

На примере эластичных компаундов и пресс-материалов сделан анализ свойств и перспектив развития полимерных материалов, используемых для герметизации РЭА.

Еще 20 лет назад стекло, металл и керамика считались единственными материалами, пригодными для герметизации полупроводниковых приборов. Использование пластмасс в электронике началось с замены ими традиционных материалов, главным образом вследствие большей технологичности. Затем последовала разработка конструкций приборов, которые оказались возможным создать лишь благодаря специфическим свойствам полимеров. Такая тенденция наблюдалась и для герметизирующих материалов. В результате совместных усилий разработчиков конструкций РЭА и технологов-материаловедов в области полимеров стало возможным организовать массовый выпуск приборов в пластмассовых корпусах.

Одним из наиболее перспективных видов герметизации, обеспечивающей высокую надежность приборов, явилось применение комбинированных способов защиты поверхности полупроводниковых приборов низкомолекулярными полимерами, в частности кремнийорганическими компаундами в сочетании с защитными материалами.

Кремнийорганические компаунды, контактирующие с поверхностью *p-n* переходов полупроводниковых приборов, должны обладать хорошей адгезией к поверхности кристалла, высокими электронизоляционными свойствами, необходимыми для снижения токов утечки, которые возникают при действии температуры, влаги, высокого напряжения, не содержать ионных и корродирующих примесей, сохранять эластичность и другие свойства в рабочем интервале температур после длительного воздействия тепла, влаги, термоциклов. Среди эластичных защитных кремнийорганических материалов широкое применение в полупроводниковой технике нашли компаунды типа КЛТ-30, «Эластосил», «Виксинт», НК Однако недостаточная чистота этих материалов

и невысокая технологичность предопределили разработку защитных материалов с улучшенными свойствами на основе низкомолекулярных кремнийорганических каучуков. Для их отверждения используются неионогенные вулканизирующие системы. Исходные компоненты компаундов очищаются от ионных примесей по специальным методикам. Высокими электроизоляционными свойствами, хорошей адгезией, длительным сроком хранения и технологичностью отличается однокомпонентный компаунд марки ГК (ТУ БУО.028.021).

Для приборов, не подвергающихся действию высоких температур, разработана серия эластичных компаундов низкотемпературного отверждения КЭН-1, КЭН-2, КЭН-3, КЭН-4 (ТУ БУО.028.055). Отличительной особенностью материалов этой серии, в частности компаундов КЭН-1, КЭН-3, является их

хорошая технологичность: время жизнеспособности после смешения с катализатором вулканизации составляет 5—8 ч, отверждение при 60—80°C происходит в течение 2—5 ч. Слои компаунда КЭН-2 толщиной до 15 см отверждаются как в закрытом, так и в открытом объеме с незначительным выделением тепла. По сравнению с другими ненаполненными компаундами, разработанными на основе каучука СКТН, компаунды КЭН-2 и КЭН-3 отличаются более высокой прочностью. Разработанные компаунды типа КЭН с успехом используются в серийных изделиях (микросхемах и полупроводниковых диодах).

Термостойкие компаунды типа КЭТ (БУО.028.047 ТУ) рассчитаны на эксплуатацию в широком диапазоне температур (от -100 до +250°C). Они выдерживают кратковременный нагрев до 350-400°C и могут отверждаться в слоях значительной толщины.

Эластичные защитные кремнийорганические компаунды

Таблица 1

Наименование показателей	ГК	КЭН1	КЭН2	КЭН3	КЭН4	КЭТ1	КЭТ1Н	КЭТ2	КЭТ2Н
Вязкость по ВЗ-1 при 25±10°C, не менее	20*	120	350	480	900	90-240	180-300	90-240	180-300
Срок хранения, мес	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Жизнеспособность при 18±10°C, ч	2	5	6	8	-	> 5	> 5	> 5	> 5
Количество компонентов в состоянии поставки	1	2	2	2	1	2	2	2	2
Режим отверждения, °C/ч	20/20 110/2 150/5	60/5 или 80/3	25/20 60/4 или 25/20 80/3	60/3 или 80/2	60/3 или 80/2	25-20	+ 110/2	+ 150/2	24/8
Диапазон рабочих температур, °C	-60 +200	-60 +200	-80 +200	-80 +200	-70 +250	-80 +250	-80 +250	-100 +250	-100 +250
E <sub>пр.</sub> , кВ/мм, не менее	25	25	25	27	25	25	30	34	29
Удельное объемное сопротивление, Ом·см, не менее	1·10 <sup>14</sup>	1·10 <sup>14</sup>	1·10 <sup>14</sup>	1·10 <sup>14</sup>	1·10 <sup>14</sup>	1·10 <sup>14</sup>	2·10 <sup>14</sup>	1·10 <sup>14</sup>	1·10 <sup>14</sup>
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10 <sup>6</sup> Гц, не более	3·10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>	8·10 <sup>-3</sup>	8·10 <sup>-3</sup>	8·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-3</sup>	5·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>-3</sup>
Диэлектрическая проницаемость, не более	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,0	4,0
Водопоглощение за 7 сут, %	0,2**	0,15	0,3	0	0	0,07	0,02	0,11	0,03

\* Измерения проведены с использованием вискозиметра ВЗ-4

\*\* За 24 ч.

Физико-механические свойства отечественных пресс-материалов

Таблица 2

Наименование показателей	К-81-39с	ЭФП-606	ЭФП-60	ЭКП-200	КЭП-1	ТЭМП-250	КФП	ТЭП	ТМП
Текучесть по спирали, см, не менее	90	150	80	150	35	40	50	90	80
Срок хранения при 20-25°C, мес	0,5-1,0	3	1,0	1	-	-	2	2	6
Время выдержки в форме, мин	3-5	3-5	3-5	5-7	5-6	5-6	5-7	2-3	4-6
Температурный коэффициент линейного расширения, 1/°C	38·10 <sup>-6</sup>	36·10 <sup>-6</sup>	35·10 <sup>-6</sup>	30·10 <sup>-6</sup>	32·10 <sup>-6</sup>	15·10 <sup>-6</sup>	23·10 <sup>-6</sup>	(20-25)·10 <sup>-6</sup>	25·10 <sup>-6</sup>
Температура стеклования, °C	100	100	110	140	110	130	160	160	160
Предел прочности при изгибе, МН/м <sup>2</sup> , не менее	70	70	70	60	75	65	45	80	80
Удельная ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	8-10	5	5	5	5	18	3	-	8
Теплостойкость по Мартенсу, °C	130	130	130	170	-	123	более 300	180	до 200
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см	10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup>
Тангенс угла диэлектрических потерь при 1 МГц	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,05	0,03	0,02	0,02
Диэлектрическая проницаемость при 1 МГц	4,6	4,5	5	5	4,5	5	4,5	4,5	4,5
Электрическая прочность, кВ/мм	15	20	20	20	20	20	15	20	20

Свойства эластичных компаундов приведены в табл.1.

Из кремнийорганических пассивирующих материалов наиболее перспективен материал КА (БУО.029.66 ТУ), который в сочетании с компаундом КЭТ-2Н позволяет увеличить выход годных, повысить стабильность параметров приборов при повышенных температурах.

В технологии герметизации радиоэлектронных приборов преобладающим направлением становится трансферное (литьевое) прессование. Для его осуществления разработан ряд пресс-материалов, из которых наибольшее предпочтение отдается ЭФП-60 и К-81-39С (табл.2). Это обусловлено их достаточно надежными электроизоляционными свойствами, прочностью, легкостью переработки при сравнительно низких давлениях и температурах, коротким циклом отверждения. Повышенной теплостойкостью обладают эпоксикремнийорганические пресс-материалы ЭКП-200 и КП.

В последнее время разработаны новые пресс-материалы, не уступающие по защитным и физико-механическим показателям лучшим зарубежным аналогам. Так, пресс-материалы ТЭП и ТМП (см. табл.2) обладают высокой теплостойкостью, достаточно низким ТКЛР, что в сочетании с длительным сохранением текучести делает предпочтительным их использование для массового выпуска радиоэлектронных изделий повышенной надежности.

По мере усложнения задач в области созданных новых конструкций РЭА необходимо дальнейшее развитие полимерных герметизирующих материалов.

Статья поступила 1 апреля 1980 г.

УДК 778:681.39

Б.Д. Айзенберг, А.Г. Баратов

## ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИЕ НОСИТЕЛИ ИНФОРМАЦИИ

Фототермопластические носители являются весьма перспективными материалами для записи видеоинформации в голографической и аналоговой форме.

В последние годы во всем мире ведутся интенсивные исследования с целью создания новых, бессеребряных регистрирующих сред для записи оптической информации. Это объясняется не только необходимостью экономии дефицитного сырья, но и тем, что галогеносеребряные материалы при всех своих положительных качествах не могут уже удовлетворять требованиям, предъявляемым современной наукой и техникой в отношении скорости записи информации, многократности использования, радиационной стойкости и т.д.

Весьма перспективными бессеребряными материалами являются фототермопластические носители (ФТПН) информации. Они относятся к классу материалов, в которых в качестве регистрирующей

среды используется полимерный слой, избирательно деформирующийся под влиянием нанесенного на поверхность заряда. Сравнение характеристик различных материалов, представляющих интерес для целей записи информации (см. таблицу), показывает, что ФТПН имеют более высокую разрешающую способность, более широкую область спектральной чувствительности, характеризуются значительно меньшим по сравнению с галогеносеребряными материалами временем получения изображения и по совокупности свойств выгодно отличаются от других несеребряных регистрирующих сред. Из достоинств ФТПН необходимо отметить также сухое проявление (не требуется применение проявляющих растворов), возможность контроля качества изображений в процессе записи и проведения копирования видеозаписи методом горячего тиснения. ФТПН не боятся засветки, так как очуствление их производится в процессе записи. Кроме того, фототермопластические носители способны

Фотографические и технические характеристики светочувствительных систем и материалов для записи информации [1]

Способы записи	Светочувствительность, Дл см <sup>-1</sup>	Разрешающая способность, мм <sup>-1</sup>	Область спектральной чувствительности, нм	Время получения изображения, с	Возможность многократного использования
Галогеносеребряные материалы					
Фототехнические пленки	5 · 10 <sup>-7</sup>	160	400-500	100	Нет
Медицинские рентгеновские пленки	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-8</sup>	50	до 450	300	Нет
Системы магнитной видеозаписи	-	1000	-	0	Да
Диазопленки	5 · 10 <sup>-7</sup> -7 · 10 <sup>-7</sup>	1000	360-420	30	Нет
Везикулярные системы	5 · 10 <sup>-7</sup>	150	300-400	10	Нет
Фотополимеры и фоторезисты	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-8</sup>	1000-2000	400-450	480	Нет
Фотохромные материалы	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-8</sup>	5000	320-600	0	Да
Фотоматериалы с физическим проявлением					
Физическое проявление галогеносеребряных фотоматериалов с малым содержанием серебра	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-8</sup>	400	360-500	30	Нет
Физическое проявление несеребряных материалов	1 · 10 <sup>-6</sup>	1500	360-420	30	Нет
Свободнорадикальные системы	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-8</sup>	400-2500	300-400	2	Нет
Фотобиохимические системы	1 · 10 <sup>-6</sup>	10-20	313-360	-	Нет
Аморфные полупроводники	10	2500	450-650	-	Да
Электрофотографические системы					
Порошковое или жидкостное проявление	1 · 10 <sup>-6</sup>	100-200	400-700	10	Да
Проявление коллоидными частицами	1 · 10 <sup>-6</sup>	600	400-700	10	Да
Визуализация изображения методом электрического считывания	1 · 10 <sup>-6</sup>	30	360-750	0,1	Да
Электрооптический метод визуализации	1 · 10 <sup>-6</sup>	400	360-500	0,001	Да
Фототермопластические материалы	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-8</sup>	1000-4000	110-1150	0,01	Да

записывать информацию как в голографической, так и в аналоговой формах.

ФТПН информации представляет собой многослойную конструкцию, состоящую из основы, электропроводящего, фотопроводящего и термопластического слоев (см. рисунок). Помимо этих слоев могут вводиться и дополнительные — антистатические, защитные промежуточные.

*Основа носителя* (подложка) является силовым каркасом ФТПН, воспринимающим действующие на него нагрузки. Предъявляемые к основе требования заключаются главным образом в достаточной механической прочности и стабильности размеров и формы в процессе эксплуатации носителя. Высокие требования предъявляются также и к оптической однородности (при считывании информации на просвет) и гладкости поверхности основы,

Основа носителя может быть жесткой или гибкой. Жесткие подложки, главным образом стекло [2–4], применяются для изготовления носителей матричного типа; гибкие — для изготовления носителей рулонного типа и микрофиш. Основным материалом, используемым для этих целей, являются полиэфирные пленки, в частности полиэтилентерефталатная (ПЭТФ) пленка [4, 5] толщиной 50–200 мкм, выгодно сочетающая высокие механические свойства, теплостойкость и прозрачность. Однако выпускаемые промышленностью ПЭТФ пленки общего назначения обладают недостаточной оптической однородностью, приводящей к появлению шумов в записываемом изображении при считывании на просвет. Существенным недостатком является также повышенная электризуемость ее поверхности, приводящая к загрязнению в процессе эксплуатации, и микрошероховатость, обусловленная наличием наполнителя. Указанные недостатки делают необходимым организацию производства специальных типов пленок для использования в качестве основы.

Известно, что для этих целей могут быть применены полимеры других классов, например полиимидные пленки, поликарбонатные пленки, близкие по свойствам к ПЭТФ, и полипиромеллитимидные

пленки, которые сохраняют работоспособность до 1000 ч при температуре +250°C.

*Электропроводящий слой* (ЭПС), который наносится на основу носителя, в процессе записи является заземляющим электродом. Нагрев термопластического слоя может осуществляться пропусканием импульса тока через металлический слой, выполняющий в этом случае функцию резистивного нагревателя.

Основными требованиями, предъявляемыми к ЭПС, являются достаточно высокая электропроводность, хорошая адгезия к подложке, прозрачность и отсутствие хрупкости (для гибких подложек), стабильность свойств в процессе хранения и эксплуатации. В качестве материалов ЭПС используются никель, платина, хром, висмут, алюминий, золото, иодистая медь, двуокись олова, низкоомные полупроводники, проводящие полимеры.

Для увеличения равномерности электрического сопротивления по поверхности предложено изготавливать прозрачные электроды из двуокиси олова в смеси с окисью индия [6]. Весьма перспективны вследствие низкой стоимости и технологичности полимерные проводники. Есть сведения о применении для этих целей композиций на основе эластомеров или блоксополимеров, содержащих звенья простых или сложных полиэфиров, сополимера стирола с винилипиридином [7, 8], а также сополимера винилацетата с акриловой кислотой ( $\rho_s = 5 \cdot 10^{10}$ – $2,5 \cdot 10^{11}$  Ом) с добавкой поверхностно-активных веществ [9].

Требования, предъявляемые к *фотопроводящему слою* (ФПС), связаны главным образом с его достаточно высоким темновым электрическим сопротивлением ( $\rho_v \geq 10^{13}$  Ом·см) и высокой чувствительностью, т.е. способностью изменять величину сопротивления под действием света заданного спектрального состава. Кроме того, материал ФПС должен быть технологичным в изготовлении, обладать достаточной гибкостью (в рулонных формах), прозрачностью при считывании на просвет.

В качестве фотопроводящего слоя ФТПН можно использовать различные органические и неорганические фотополупроводники. Наиболее часто применяемыми из неорганических материалов являются селен [10, 11], его соединения с мышьяком [11] и халькогенидные стеклообразные полупроводники [12]. В качестве легирующих добавок, увеличивающих чувствительность и расширяющих диапазон спектральной чувствительности ФПС в красную область, используются таллий и теллур.

Для получения высокоомных фоточувствительных слоев используется селенид кадмия, для повышения контрастности записываемой информа-



Структурная схема ФТПН



ции в состав ФПС дополнительно вводят молибдат неодима. Наиболее перспективным представляется использование пленок стеклообразных халькогенидов мышьяка —  $As_2S_3$ ,  $As_2Se_3$ , а также их твердого раствора  $(As_2S_3)_{0,5}(As_2Se_3)_{0,5}$ . Они имеют устойчивую аморфную фазу, практически не кристаллизуются даже при длительном хранении, устойчивы к радиации, имеют высокое темновое сопротивление ( $10^{12} \div 10^{13}$  Ом·см для  $As_2Se_3$ ;  $10^{14} \div 10^{16}$  Ом·см для  $As_2S_3$ ) и хорошую фоточувствительность. Эти материалы достаточно технологичны, слои на их основе могут быть получены вакуум-термическим напылением при сравнительно низких температурах испарителя (350–440°C).

Работы по созданию ФТПН на основе органических полупроводников, которые энергично ведутся как в нашей стране, так и за рубежом, обусловлены высокой технологичностью этих материалов и низкой стоимостью. Однако они имеют более низкую по сравнению с неорганическими материалами чувствительность.

Анализ патентных данных позволяет выделить два основных направления в создании фототермопластических носителей на основе органических полупроводников (ФТПН—0). К первому направлению можно отнести носители с разделенными фотопроводящим и термопластическим слоями (так называемая четырехслойная конструкция), ко второму — носители, регистрирующий слой которых обладает одновременно термопластичностью и фоточувствительностью (трехслойная конструкция). В четырехслойной конструкции в качестве ФПС применяется обычно поливинилкарбазол, сенсибилизированный электроакцепторными веществами, чаще всего 2, 4, 7-тринитрофлуореноном [2, 4, 13, 14] и 2, 4, 5, 7-тетранитрофлуореноном [14–16] или красителями [3]. Для повышения чувствительности и предельного потенциала зарядки в состав полупроводника вводят ангидриды ароматических кислот — ортобензолдикарбоновой (фталевой), 1, 2, 4, 5-бензолтетракарбоновой (пиромеллитовой) или бензолгексакарбоновой (меллитовой) [17]. В трехслойных ФТПН—0 рабочий слой выполняется из различных сополимеров *N*-винилкарбазола, обладающих способностью к образованию рельефа. Известны носители с регистрирующим слоем из терсополимера метакрилата стирола и *N*-винилкарбазола [18, 19], сополимеров 9-винилкарбазола с октиловым эфиром метакриловой кислоты, а также сополимеров глицидилкарбазола, позволяющих получать прозрачные эластичные слои, легко деформируемые под действием заряда и позволяющие производить запись голограмм в видимой области спектра.

Весьма перспективным материалом для ФТПН является полиэпоксипропилкарбазол, имеющий вы-

сокие чувствительность и способность к образованию рельефа (дифракционная эффективность 20–22%, разрешающая способность 600–700 мм<sup>-1</sup>, чувствительность 10<sup>-4</sup> Дж/см<sup>2</sup>). Для повышения чувствительности этого материала в него вводят различные добавки, особенно эффективными среди которых являются электроакцепторные вещества, в частности тринитрофлюорен.

Известны попытки применения в качестве фотопроводника нафталина, поливинилнафталина, антрацена, поли-(9-винилантрацена), *N*-винилкарбазола, поли-*N*-винилкарбазола и спектральных сенсибилизаторов (бриллиантовый зеленый, родамин-Б, эритрозин, флуоресцеин, бенгальский розовый, акридиновый желтый) [20], а также продуктов поликонденсации формальдегида с карбоциклическими замещенными ароматическими соединениями (пиреном, пириленом) [21]. Высокой гибкостью, хорошей формруемостью и пленкообразованием характеризуется фотопроводящий материал, содержащий гомо- или сополимер *N*-акриламиноалкилкарбазола [22].

Чувствительность носителей на органических фотополупроводниках меняется от 10<sup>-2</sup> [23] до 10<sup>-5</sup> Дж/см<sup>2</sup> [3, 15].

**Термопластический слой (ТПС).** Требования, предъявляемые к этому слою, очень сложны и многообразны. С одной стороны, полимер должен обладать определенным, зависящим от способа записи и необходимых параметров изображения, соотношением вязкостных и диэлектрических свойств при температуре записи. С другой стороны, он должен иметь достаточную поверхностную твердость, характеризоваться отсутствием липкости и хрупкости (для рулонных форм), длительно сохранять изображение при повышенных температурах эксплуатации.

Среди термопластических материалов одно из ведущих мест для записи голографической информации занимают стейбелиты [2, 13, 23] — глицериновые эфиры диспропорционированной канифоли. Однако этот материал обладает повышенной хрупкостью и не может применяться в носителях информации рулонного типа. Есть сведения о применении в качестве термопластического слоя гидрированного эфира канифоли, полистирола, поли- $\alpha$ -метилстирола, сополимера стирола с  $\alpha$ -метилстиролом, сополимера стирола с эфиром акриловой кислоты с добавкой силиконового, фторуглеродного или хлорфторуглеродного масла в количестве 0,1–10 % по массе [24–26].

Термопластическим материалом может служить сополимер стирола с бутилметакрилатом [4], пластифицированный полистиролом, сополимер стирола с бутадиеном, полипропиленоксид [27], синтетический воск (дифракционная эффективность 70%, разрешающая способность 100 мм<sup>-1</sup> [28], полимер гли-

цидинового эфира дигидроабетиновой кислоты [29], сополимер стирола с фенилалкилметалкрилатом [30]. С целью уменьшения липкости в ТПС из полимера глицидилового эфира диспропорционированной канифоли вводят полибутилизоцианат в количестве 0,1–2% по массе [31].

Для увеличения скорости образования потенциального рельефа и улучшения качества изображения ФТПН может быть снабжен дополнительными диэлектрическими слоями, расположенными между проводниковым и фотопроводниковым слоями или между фотопроводниковым и термопластическим слоями, причем диэлектрические слои толщиной 1,5–2 мкм выполняют из поликарбоната, фторлона, поли-*n*-ксилилена или поли-ди-(тетра)-метилбензила [32].

Целям улучшения качества записанного изображения, в частности увеличения отношения сигнал/шум, служат защитные слои, которые наносятся на поверхность ТПС. Защитные слои могут быть как постоянными [33–35], так и съемными, защищающими ТПС только в процессе изготовления носителя (при резке, перфорации, перемотке и других операциях). Однако постоянные защитные слои эффективны только при относительно толстых ТПС (более 5–6 мкм), поскольку толщина защитного слоя (0,5–1 мкм) должна составлять не более 10% толщины ТПС, в противном случае деформационная способность ТПС заметно снижается. С целью увеличения срока службы ФТПН и уменьшения уровня шумов в качестве защитного слоя предложено применять поливинилбутираль, в который вводят дополнительно вещество с донорно-акцепторными свойствами (хлоранил) [33]. Для уменьшения липкости защитный слой выполняют из фенолформальдегидной смолы с пластификатором [34], а для увеличения чувствительности носителя защитный слой выполняют из того же материала, что и термопластический, но с более высоким молекулярным весом [35].

Анализ патентной и библиографической информации показывает, что интерес к фототермопластической записи растет с каждым годом как в нашей стране, так и за рубежом. Основное внимание уделяется рассмотрению ФТПН для записи голографической информации. В то же время имеются данные о применении этих материалов для прямого фотографирования и записи изображения с экрана электронно-лучевой трубки.

В СССР в настоящее время выпускаются ФТПН для записи голографической информации (ФТПН–Л) и для динамической регистрации аналоговой информации (ФТПН–АД) с фотопроводящим слоем на основе неорганических полупроводников. Ниже приведены технические характеристики этих материалов:

	ФТПН–АД	ФТПН–Л
Чувствительность, Дж/см <sup>2</sup> .....	10 <sup>5</sup>	10 <sup>4</sup>
Дифракционная эффективность, % .....	–	4
Отношение сигнал/шум, дБ .....	32	35
Число циклов запись-стирание .....	20	100
Разрешающая способность, мм <sup>-1</sup> .....	100–200	800

Достигнутые в настоящее время параметры записи не уступают соответствующим характеристикам галогеносеребряных фотоматериалов и позволяют поставить вопрос о широком внедрении ФТПН в народное хозяйство.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фотоника, М.: Мир, 1978, с. 174–208.
2. Пат. 4012253 (США).
3. Пат. 4032338 (США).
4. Пат. 1430236 (Великобритания).
5. Пат. 2539524 (ФРГ).
6. Killat U., Ferrell D.R. Performance and limitation of photothermoplastic devices. — *Opt. acta*, 1977, v. 24, N 4, p. 441–452.
7. Пат. 53–16786 (Япония).
8. Пат. 2516172 (ФРГ).
9. Пат. 476420 (Австрия).
10. Пат. 1446111 (Великобритания).
11. Пат. 2518107 (ФРГ).
12. А.с. 632975 (СССР). Устройство для получения изображения/А.Г.Парицкий, О.М.Сресели. Оpubл. в Б.И., 1977, № 42.
13. Пат. 2451714 (ФРГ).
14. Комаров В.А. и др. Запись документальной информации на термопластических носители. — *Фундаментальные основы оптической памяти и среды*, 1978, вып. 9, с. 139–143.
15. Пат. 2640277 (ФРГ).
16. Баженов М.Ю. Работа термопластических сред в реальном масштабе времени. — *Фундаментальные основы оптической памяти и среды*, 1979, вып. 10, с. 3–16.
17. Пат. 1470634 (Великобритания).
18. Пат. 1458830 (Великобритания).
19. Пат. 228945 (Франция).
20. Пат. 4088482 (США).
21. Пат. 2137288 (ФРГ).
22. Пат. 52–36017 (Япония).
23. Killat U., Ferrell D.R. Performance and limitations of photothermoplastic devices. — *Opt. acta*, 1977, v. 24, N 4, p. 441–452.
24. Пат. 4103071 (США).
25. Пат. 2609682 (США).
26. Пат. 2539524 (ФРГ).
27. А.с. 234863 (СССР). Фотополимеризующая композиция для изготовления фотополимерных печатных форм/Б.Ю.Гордицкий, Е.Г.Акоева. Оpubл. в Б.И., 1969, № 4.
28. Beaullien R. Pulsed in holography on Takiwax films. — *Appl. Opt.* 1978, v. 17, N 22, p. 3619–3621.
29. А.с. 530347 (СССР). Термопластический слой термопластической мишени/Ю.П.Гетманчук, В.Н.Старенькая, О.И.Кравченко. Оpubл. в Б.И., 1976, № 36.
30. Cormier M. Holographie en infrarouge sur de minces couches d'huile. — *Appl. Opt.*, 1978, v. 17, N 22, p. 3622–3626.
31. А.с. 530346 (СССР). Термопластический слой термопластической мишени/Е.Б.Блажко, Ю.П.Гетманчук, В.А.Кудренко. Оpubл. в Б.И., 1976, № 36.
32. А.с. 591927 (СССР). Фототермопластический носитель информации/Л.И.Бекичева, Н.П.Жулай, Т.В.Калоева и др. Оpubл. в Б.И., 1978, № 5.
33. А.с. 627526 (СССР). Термопластический носитель информации/В.В.Трачевский, Г.В.Гураш, С.П.Гукалов, А.Г.Грудзинский, Оpubл. в Б.И., 1978, № 37.
34. А.с. 537383 (СССР). Термопластический носитель/Ф.Г.Баранский, В.И.Булгаков, Л.Н.Герасимук и др. Оpubл. в Б.И., 1976, № 44.
35. А.с. 608117 (СССР). Термопластический носитель информации/А.Г.Баратов, А.М.Пойманов, Э.А.Головской, В.Д.Айзенберг, Т.В.Калоева. Оpubл. в Б.И., 1978, № 19.

УДК 621.397.36:771.531.37:678.746.22-13

Б. Д. Айзенберг, М. С. Бородкина,  
П. В. Козлов, Л. Т. Пухова

# СПОСОБНОСТЬ СОПОЛИМЕРОВ СТИРОЛА С БУТАДИЕНОМ К ОБРАЗОВАНИЮ РЕЛЬЕФА ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ МЕТОДЕ ЗАПИСИ ИНФОРМАЦИИ

Требования, предъявляемые к полимеру термопластического слоя ФТПН, определяются способом записи и в значительной степени изменяются при использовании одновременного метода записи информации.

Известно, что способность полимера к образованию рельефа в процессе фототермопластической записи обуславливается в основном соотношением его реологических и диэлектрических свойств при температуре записи [1]. Однако при этом обычно не учитываются особенности, присущие способу проведения записи. Из существующих методов записи информации – последовательного (при котором зарядка деформируемого слоя, экспонирование и нагрев разнесены во времени) и одновременного (при котором образование рельефа происходит на фоне непрерывной зарядки поверхности предварительно нагретого деформируемого слоя) – последний имеет ряд преимуществ [2]. Применение этого метода записи делает необходимым определение связи способности полимерных слоев к образованию рельефа с их реологическими и диэлектрическими свойствами, как это сделано в отношении к последовательному режиму записи [3].

Исследования способности термопластического слоя (в качестве объектов исследования были использованы сополимеры стирола с бутадиеном различной молекулярной массы; слои полимера толщиной 3 мкм наносились методом полива из раствора на стекло с проводящим покрытием SnO<sub>2</sub>) к образованию рельефа, которые проводи-

лись с помощью методики, аналогичной описанной в работе [4], показали следующее.

С увеличением температуры светомодуляционная способность (A) и скорость образования рельефа (v<sub>3</sub>) возрастают до максимального значения, а при дальнейшем росте температуры уменьшаются (рис. 1). С увеличением молекулярной массы полимера его вязкость η<sub>00</sub> и удельное объемное сопротивление ρ<sub>v</sub><sup>00</sup>, измеренные при одинаковой температуре (80°C), возрастают (см. таблицу). Точка перегиба на температурной зависимости удельного объемного сопротивления ρ<sub>v</sub>(T) смещается в сторону больших температур (рис. 2). Од-

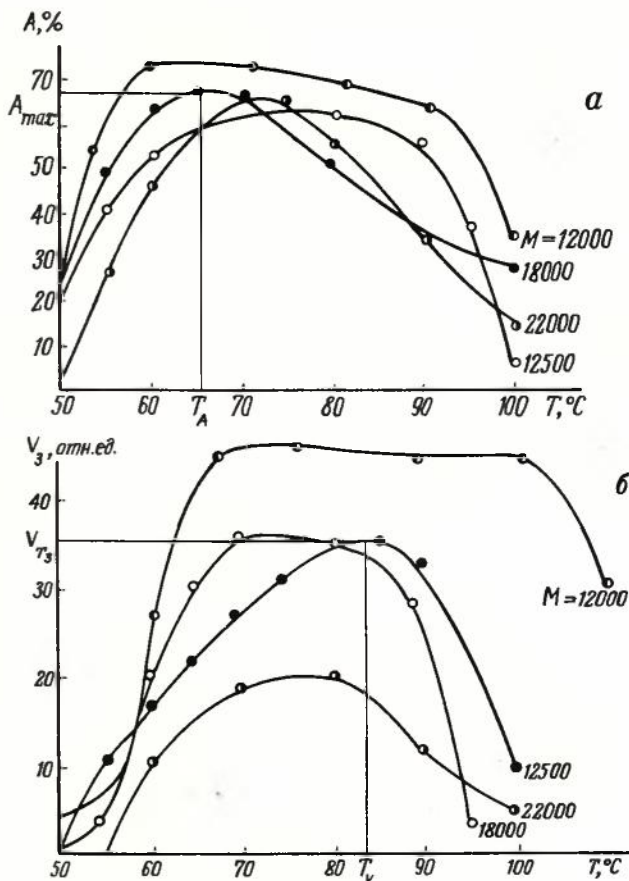


Рис. 1. Зависимость светомодуляционной способности (а) и скорости образования рельефа (б) от температуры для сополимеров с различными молекулярными массами

Физико-химические свойства и эксплуатационные параметры сополимеров стирола с бутадиеном

Образцы полимера	Физико-химические свойства								Термодеформационные свойства						Оптимальные режимы записи	
	$\bar{M}_v$	Содержание бутадиена, %	T <sub>c</sub> , °C	η <sub>00</sub> , Па·с	η <sub>T</sub> , Па·с	ρ <sub>v</sub> <sup>00</sup> , Ом·см	ρ <sub>v</sub> <sup>T</sup> , Ом·см	T <sub>ρv</sub> , °C	A <sub>max</sub> , %	T <sub>A</sub> , °C	ΔT <sub>A</sub> , °C	V <sub>T3</sub> , отн. ед.	T <sub>v</sub> , °C	ΔT <sub>v</sub> , °C	U <sub>k</sub> , кВ	T <sub>1</sub> , °C
1	12000	17,5	19	2,5 · 10 <sup>4</sup>	6 · 10 <sup>4</sup>	9 · 10 <sup>13</sup>	3,2 · 10 <sup>15</sup>	58	72	61	49	45	68	42	5-6	65-70
2	18000	17	35	10 <sup>5</sup>	2,5 · 10 <sup>5</sup>	4 · 10 <sup>14</sup>	3,2 · 10 <sup>15</sup>	63	65	65	30	33	72	28	5-5,8	72-75
3	19500	15	39	3,2 · 10 <sup>5</sup>	3 · 10 <sup>5</sup>	1,6 · 10 <sup>15</sup>	3 · 10 <sup>15</sup>	67	64	68	38	32	80	24	6	80-83
4	22000	15	46	2 · 10 <sup>6</sup>	1,6 · 10 <sup>6</sup>	1,6 · 10 <sup>16</sup>	1,3 · 10 <sup>16</sup>	75	65	72	25	21	79	23	6	80-85
POP-1	3200	-	45	2 · 10 <sup>4</sup>	2 · 10 <sup>4</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup>	75	47	75	20	48	88	31	5,5	80-85
СБ	14000	-	43	3,2 · 10 <sup>5</sup>	8 · 10 <sup>5</sup>	6,3 · 10 <sup>14</sup>	2 · 10 <sup>15</sup>	60	60	62	39	24	70	25	6,8	65-75

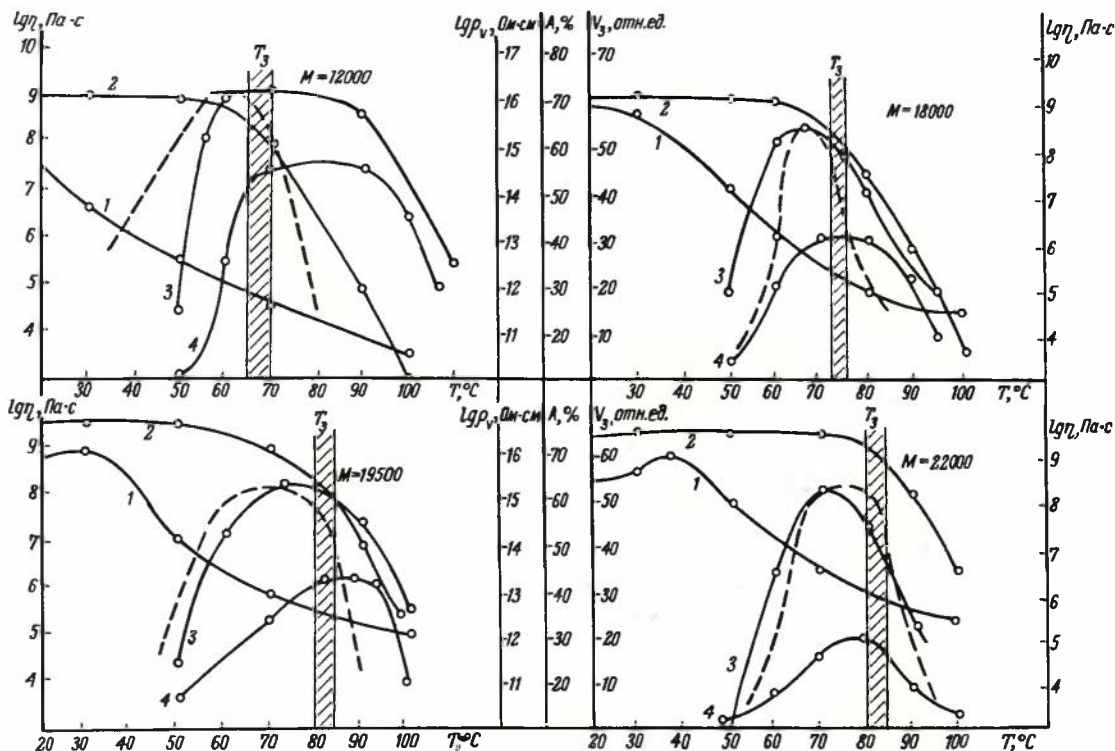


Рис. 2. Зависимость вязкости (1), удельного объемного сопротивления (2), светомодуляционной способности (3) и скорости образования рельефа (4) от температуры для сополимеров с молекулярной массой

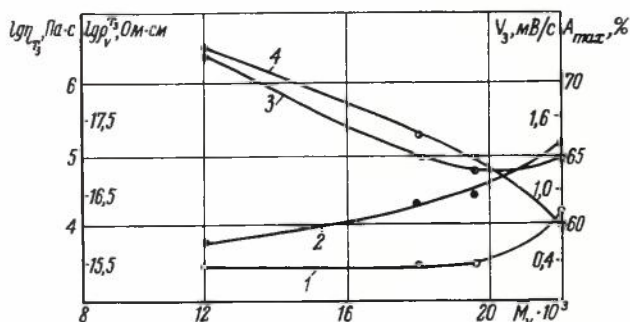


Рис. 3. Зависимость удельного объемного сопротивления (1) и вязкости при температуре записи (2), светомодуляционной способности (3) и скорости образования рельефа (4) от молекулярной массы полимера

нако при оптимальной температуре записи картина несколько иная: вязкость  $\eta_{T_3}$  возрастает, а величина удельного объемного сопротивления  $\rho_v^{T_3}$  остается практически постоянной в диапазоне молекулярных масс  $\bar{M}_v = 12000-19500$ .

Из зависимостей вязкости и удельного объемного сопротивления при температуре записи, а также светомодуляционной способности и скорости образования рельефа от молекулярной массы полимера видно, что в области  $\bar{M}_v = 19000-20000$  все кривые претерпевают излом. Это может объясняться выходом полимеров в область молекулярных масс, в которой начинается образование флуктуационной сетки зацеплений макромолекул [5], что приводит к изменению всего комплекса физико-механических свойств полимера, в том

числе вязкостных и диэлектрических [6-8].

Увеличение удельного объемного сопротивления полимера с  $\bar{M}_v = 22000$  (см. таблицу, образец 4) приводит к возрастанию светомодуляционной способности деформируемого слоя. В то же время скорость образования рельефа (рис. 3, кривая 4) практически не меняет темпа своего изменения. Это позволяет предположить, что скорость образования рельефа зависит в большей степени от вязкости полимера при температуре записи, чем от его диэлектрических свойств. Действительно, при сравнении вязкостных и диэлектрических характеристик и скорости образования рельефа сополимеров стирола с бутадиеном и полимеров других классов — например, кремнийорганического полимера POP-1 и сополимера стирола с бутилметакрилатом (СБ), — видно, что у полимеров, имеющих близкие значения вязкости при температуре записи, скорости образования рельефа также близки. В то же время на максимальную светомодуляционную способность  $A_{max}$  влияют в одинаковой степени как вязкоупругие, так и диэлектрические характеристики полимеров.

С увеличением молекулярной массы полимера светомодуляционная способность слоя и скорость образования рельефа снижаются, термодформационные кривые смещаются в сторону больших температур, при этом ширина температурных интервалов  $\Delta T_A$  и  $\Delta T_v$ , измеренных на уровне  $0,7 A_{max}$  и  $0,7 V_{max}$ , уменьшается, т.е. материал становится более критичным по отношению к температуре записи.

Сопоставление диэлектрических и вязкоупругих характеристик полимеров с их термомодеформационными свойствами и оптимальной температурой записи (см. рис. 2) указывает на то, что для исследуемых полимеров максимум на зависимости светомодуляционной способности от температуры совпадает с температурной областью начала снижения удельного объемного сопротивления. Скорость образования рельефа достигает максимального значения при более высоких температурах, чем светомодуляционная способность. Оптимальная температура записи близка к температуре максимального значения скорости образования рельефа  $T_v$ , а не к температуре максимума светомодуляционной способности, как это можно было предположить.

В ряде работ, посвященных теоретическому исследованию процесса записи в последовательном режиме [1, 3, 9], показано, что амплитуда образующегося рельефа при одной и той же структуре записываемой деформации определяется отношением характерных времен релаксации:

$$R \sim \frac{\tau_p}{\tau_{\text{ж}}},$$

где  $\tau_p = \frac{\epsilon}{4\pi\sigma}$  — время релаксации заряда;

$\tau_{\text{ж}} = \frac{2\mu h}{\alpha}$  — время релаксации поверхности полимера;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость;

$\sigma = \frac{1}{\rho_v}$  — удельная проводимость;  $\mu$  — вязкость

расплава;  $h$  — толщина термопластического слоя;  $\alpha$  — поверхностное натяжение. Так как  $\alpha$  и  $\epsilon$  слабо зависят от температуры [8], можно принять, что  $R \sim \frac{\rho_v}{\mu}$ .

Анализ рассчитанной согласно последнему выражению зависимости  $R(T)$  (пунктирная кривая на рис. 2) свидетельствует о том, что форма кривой при последовательном режиме записи близка к полученной экспериментально зависимости  $A(T)$  для одновременного режима на образцах 2, 3, 4. Для полимеров с низкой молекулярной массой (образец 1) расчетная и экспериментально полученная зависимости значительно различаются. Проведение процесса записи в одновременном режиме приводит к расширению интервала температур записи и увеличению светомодуляционной способности полимера при повышенных температурах, что объясняется непрерывной зарядкой слоя в процессе образования рельефа, компенсирующей стекание заряда, причем этот эффект усиливается с уменьшением молекулярной массы полимера.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Находкин Н. Г. Некоторые физические аспекты термопластической записи информации. — В сб.: Способы записи информации на бессеребряных носителях. Вып. 1. Киев: Вища школа. 1969, с. 11–12.

2. Lee T. S. Holographic recording of thermoplastic films. — Appl. Opt., 1974, v. 13, N 4, p. 888–895.

3. Бутенко А. Д., Находкин Н. Г., Немцев В. П., Шевляков Ю. А. Характерные времена и свойства термопластического носителя. В сб.: Способы записи информации на бессеребряных носителях. Вып. 5. Киев: Вища школа. 1974, с. 18–26.

4. Панасюк Л. М., Барба Н. А., Робу С. В., Форш А. А. Влияние коронного разряда на стабильность полимерных слоев. — В сб.: Способы записи информации на бессеребряных носителях. Вып. 7. Киев: 1976, с. 87–94.

5. Айзенберг Б. Д., Баратов А. Г., Пухова Л. Т., Френкин Э. И. Исследование реологических свойств полимеров деформируемого слоя фототермопластического носителя информации. — Труды X Всесоюзного симпозиума по реологии полимеров и нефти. Пермь, 1978.

6. Колесов С. Н. Структурная электрофизика полимерных диэлектриков. Ташкент: Узбекистон, 1975.

7. Сажин Б. И. Электрические свойства полимеров. Л.: Химия, 1977.

8. Виноградов В. Д., Малкин А. Я. Реология полимеров. М.: Химия, 1977.

9. Гушо Ю. П. Фазовая рельефография. М.: Энергия, 1974.

Статья поступила 1 апреля 1980 г.

УДК 621.397.6.037.733.2:771.531.37

А. Г. Баратов, А. В. Луковкин,  
О. В. Рожков, И. Г. Федоров

## ОСОБЕННОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ФАЗОВО-ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ С ФОТО- ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИХ НОСИТЕЛЕЙ

Результаты исследования индикатрисс светорассеяния на деформации типа "мороз" позволяют оптимизировать системы воспроизведения фазово-оптической информации с учетом изменения в процессе записи параметров микроструктуры фазового рельефа. Такая оптимизация важна в связи с особенностями воспроизведения фазово-оптической записи с деформацией типа "мороз", обусловленной зависимостью качественных показателей воспроизводимого изображения от параметров микроструктуры рельефа.

Фототермопластические носители (ФТПН) информации относятся к классу регистрирующих сред, преобразующих входной оптический сигнал в геометрический рельеф поверхности. Принципы и методы записи на ФТПН освещены в работах [1, 2]. Отличительной особенностью ФТПН и других рельефографических носителей является фазовая модуляция считываемого светового потока [1, 3], а не амплитудная, как в обычных фотографических материалах, поэтому для воспроизведения фазово-оптической информации необходимы новые устройства воспроизведения в отличие от традиционных считывающих устройств [1, 3, 4].

Исследования процессов записи информации на ФТПН в динамическом режиме показали, что

эффективным является метод с одновременным очувствлением (зарядкой), экспонированием и тепловым проявлением, причем деформация регистрирующего слоя (термопластика) имеет "морозный характер". Кинетика образования деформации типа "мороз", предъявляющей некоторые особые требования к считывающим устройствам, исследована в работах [2, 5]. Целью настоящей работы является оптимизация некоторых элементов считывающих устройств, выбор методов воспроизведения по результатам исследования индикатрисс светорассеяния на микроструктуре фазово-оптического изображения при деформации указанного типа.

Исследования микроструктуры проводились на установке, приведенной на рис.1. Принцип ее работы заключается в следующем. Когерентный луч света с длиной волны  $\lambda = 632,8$  нм от оптического квантового генератора (ОКГ) через систему зеркал и нейтральный фильтр фокусируется микрообъективом на диафрагму, установленную в фокусе линзы. С выхода линзы параллельный пучок света падает на фазовый транспарант. Продифрагировавший на фазовых неоднородностях свет собирается в фокальной плоскости линзы, где наблюдается дифракционная картина Фраунгофера, представляющая собой распределение интенсивности в зависимости от микроструктуры фазового транспаранта, которое считывается сканирующим фотоприемником. Оптический сигнал, преобразованный в электрический, усиливается и регистрируется самопишущим потенциометром. На диаграммной ленте КСП-4 записываются индикатриссы светорассеяния (рис.2, 3). Исследование различных материалов термопластического слоя (ТПС) показало, что при деформации типа "мороз" часть материалов имеет один дифракционный максимум в высокочастотной области спектра, другая часть — два максимума: высокочастотный и низкочастотный (см. рис. 2, кривые 2 и 3 соответственно). Для сравнения на рис.2 приведена кривая 1, характеризующая собственные шумы ФТПН. Появление низкочастотного дифракционного максимума обусловлено дифракцией светового луча на микроворонках более крупного диаметра и "перемычках" между микроворонками, появляющихся в процессе деформации. При этом образование деформаций типа "мороз" носит случайный характер и обусловлено объединением лунок (микроворонки) за счет действия поверхностных тангенциальных сил [2]. При объединении микроворонки возможно появление трех видов микрорельефа: микроворонки (лунок), канавки (перемычки) и микроворонки с увеличенным из-за пробоя эффективным диаметром. Фотография микроструктуры (рис. 4) позволяет убедиться в том, что микрорельеф деформированной поверхности носит хаотичный характер, а распределение элементов микроструктуры является случайным. Отмечаются и микроворонки с более крупным эффективным диаметром, а также

канавки (перемычки), связывающие микроворонки меньшего диаметра. Микроворонки наименьшего диаметра определяют высокочастотный дифракционный максимум. Для подтверждения данного предположения построена номограмма, представленная на рис. 5.

При построении номограммы использовалась формула  $\xi = \nu \lambda f$ , где  $\xi$  — координата в плоскости фазового транспаранта [6],  $\nu_x$  — прост-

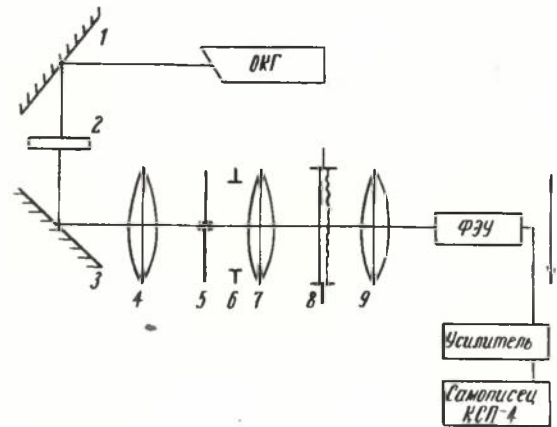


Рис.1. Схема установки для снятия индикатрисс светорассеяния: 1,3 — зеркала; 2 — нейтральный фильтр; 4 — микрообъектив; 5 — диафрагма  $d = 0,05$  мм; 6 — апертурная диафрагма; 7 — линза; 8 — фазовый транспарант; 9 — линза;  $F = 250$  мм

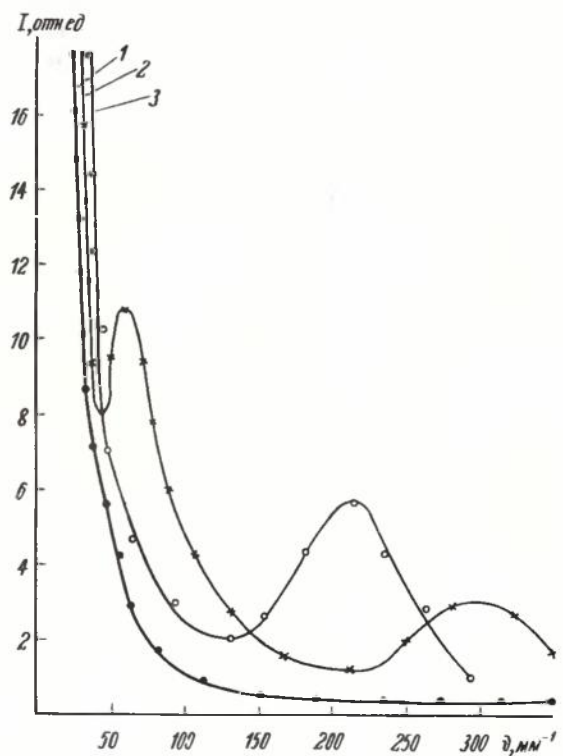


Рис.2. Индикатриссы светорассеяния на микроструктурах деформации типа "мороз": 1 — ФТПН без записи; 2 — ФТПН с деформацией типа мороз (толщина термопластического слоя  $d = 1,5$  мкм,  $U_{кор} = 6$  кВ,  $T = 82^\circ$ ); 3 — ФТПН с деформацией типа мороз (толщина термопластического слоя  $d = 2,2$  мкм,  $U_{кор} = 6$  кВ,  $E = 82^\circ$ )

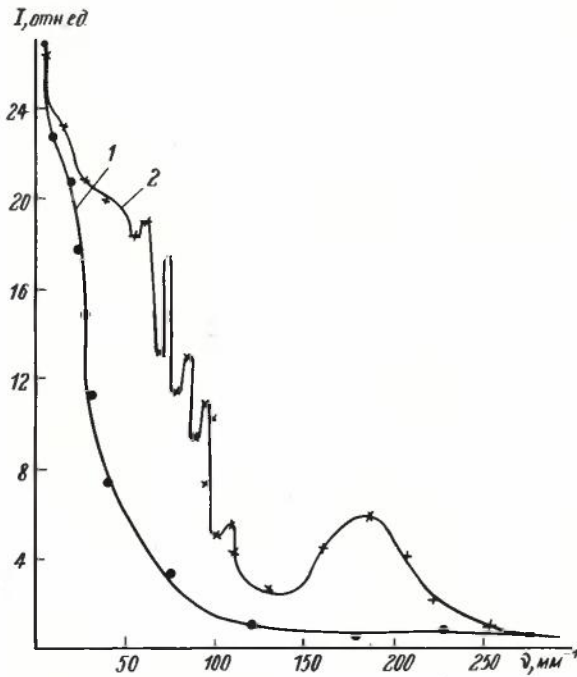


Рис.3. Индикатриссы светорассеяния: 1 – ФТПН без записи; 2 – ФТПН с записанным изображением (толщина термопластиче-ского слоя  $d = 2,2$  мкм,  $U_{кор} = 6$  кВ,  $T = 82^\circ$ )

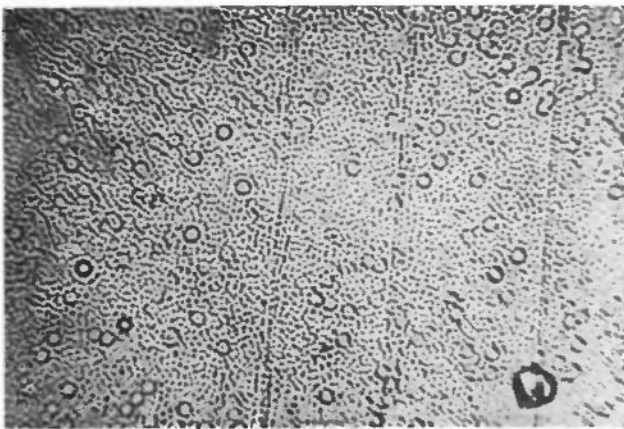


Рис.4. Деформация типа "мороз" приводится с увеличением в 450 раз

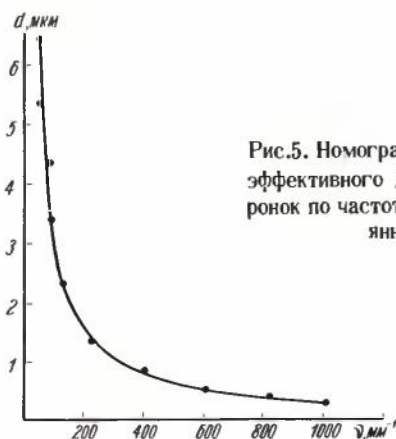


Рис.5. Номограмма для определения эффективного диаметра микро-воронок по частотному спектру рассе-янного света

ранственная частота в фокальной плоскости объек-тива (см.рис.1);  $\lambda$  – длина волны оптического квантового генератора;  $f$  – фокусное расстоя-ние объектива; эффективный диаметр микроворонок  $d = 2\nu_x \lambda f$ .

Номограмма позволяет с достаточной степенью точности определить эффективные диаметры микро-воронок. Измерения диаметров микроворонок с помощью микроскопа МИИ-4 и сравнение измерен-ных образцов по их индикатриссам светорассеяния подтвердили достоверность номограммы.

С целью определения модуляции частотами элементов изображения резонансных частот дефор-мации типа "мороз" на материалах, имеющих два дифракционных максимума, было записано произ-вольное аналоговое изображение. Индикатрисса светорассеяния 1 данного фазового транспаранта представлена на рис.3 (кривая 2). Кривая 1 яв-ляется индикатриссой светорассеяния на том же материале без записи и обусловлена микровклю-чениями, трещинами и дефектами слоев ФТПН. Кривая 2 свидетельствует о том, что в об-ласти первого дифракционного максимума имеет-ся полезная информация, а не шумы, обусловлен-ные деформацией типа "мороз", подтверждая тем самым предположение об особенностях воспроиз-ведения фазовой информации с ФТПН. Поэтому при применении тех или иных методов воспроизведения необходимо исследовать микроструктуру дефор-мации.

Для воспроизведения фазово-оптической записи необходимо преобразовать фазовую модуляцию в распределение интенсивностей на экране, т.е. в амплитудную, методами темного и светлого поля [5]. Оба метода можно реализовать с помощью ширен-системы с параллельным лучом света (рис.6).

При воспроизведении методом светлого поля визуализирующая диафрагма имеет вид непро-зрачного экрана, перекрывающего всю дифракци-онную картину Фраунгофера, с круглым прозрач-ным отверстием в центре, пропускающим лишь нулевой порядок. При воспроизведении методом темного поля визуализирующая диафрагма имеет вид непрозрачного диска, не пропускающего лишь ну-левой порядок. Применительно к фазово-оптиче-скому изображению с микроструктурой деформа-ции типа "мороз" метод воспроизведения может быть выбран по результатам исследования индикатрисс светорассеяния. При рассмотрении кривых 2, при-веденных на рис.2,3, становится очевидным вывод о целесообразности применения метода светлого поля. Тогда эффективный контраст изображения определится по формуле

$$K_{эф} = \frac{(F_1 - F_{ш1}) + (F_2 - F_{ш2})}{F_0 - [(F_1 - F_{ш1}) + (F_2 - F_{ш2})]}$$

где  $F_0$  – мощность светового потока непродифрагировавшего света;  $F_1, F_2$  – мощность светового потока первого и второго дифрагированных максимумов;  $F_{ш_1}, F_{ш_2}$  – мощность светового потока, продифрагировавшего на микрорельефе шумов в области частот первого и второго дифракционных максимумов.

Мощность световых потоков в зависимости от пространственных частот в дифракционной картине Фраунгофера

$$F_i = \int_0^{2\pi} d\phi \int_{\theta_i}^{\theta_n} f_i(\theta) d\theta,$$

где  $\theta$  – угловая координата дифракционного максимума (угол дифракции);  $f_i(\theta)$  – функции изменения интенсивности светового потока в зависимости от угла дифракции.

Если индикатрисса светорассеяния данного материала ТПС имеет вид кривой 3, приведенной на рис.2, то необходимо применять метод темного поля. В этом случае эффективный контраст изображения

$$K_{эф} = \frac{F_i - F_{ш_1}}{F_{ш_1}}.$$

При исследовании полученных индикатрисс светорассеяния установлено, что низкочастотная область обладает более мощным световым потоком. В связи с этим контраст изображения при методе светлого поля выше, что позволяет применять в системах воспроизведения менее мощные источники света.

С целью дальнейшего исследования микроструктуры деформации типа "мороз" и подтверждения результатов исследования индикатрисс светорассеяния разработан стенд (рис.7), позволяющий воспроизводить фазово-оптическую информацию на экране телевизионного приемника или видеоконтрольного устройства. Стенд разработан с условием исследования методами темного и светлого полей.

Промежуточная диафрагма, установленная в передней фокальной плоскости объектива и в задней фокальной плоскости конденсора, формирует из теплового источника точечный источник света. С выхода объектива параллельный пучок падает на кадровое окно с фазовым транспарантом. При исследовании методом темного поля непродифрагировавший на фазовом рельефе световой поток фокусируется объективом в плоскость непрозрачной визуализирующей диафрагмы. Продифрагировавший световой поток минует визуализирующую диафрагму и фокусируется объективом на мишень видикона. При исследовании методом светлого по-

ля визуализирующая диафрагма, являясь непрозрачным экраном с круглым отверстием, пропускающим лишь непродифрагировавший световой поток, задерживает продифрагированный на фазовых неоднородностях свет, тем самым вычитая его из нулевого максимума. Таким образом, на мишень видикона попадает свет, интенсивность которого определяется по формуле  $I_1 = I_0 - I_D$ , где  $I_1$  – интенсивность света, падающего на мишень видикона;  $I_0$  – интенсивность света, падающего на фазовый транспарант;  $I_D$  – интенсивность света, продифрагировавшего на фазовых неоднородностях изображения и шумовых включениях (трещинах, царапинах, различных неоднородностях). Для упрощения формулы можно пренебречь потерями светового потока по толщине носителя.

С выхода видикона видеосигнал изображения усиливается предварительным видеоуслителем и поступает на вход видеоусилителя, на который подаются импульсы синхрогенератора. С выхода видеоусилителя полный видеосигнал поступает на

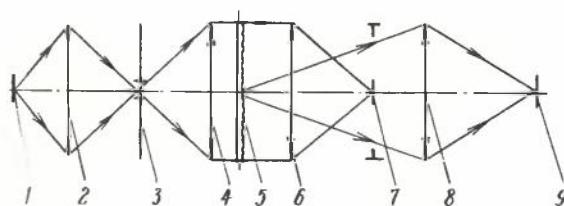


Рис.6. Оптическая схема с параллельным лучом света: 1 – тепловой источник света; 2 – конденсор; 3 – промежуточная диафрагма  $d = 0,8$  мм; 4 – осветительный объектив; 5 – фазовый транспарант; 6 – дополнительный объектив; 7 – визуализирующая диафрагма; 8 – проекционный объектив; 9 – мишень видикона

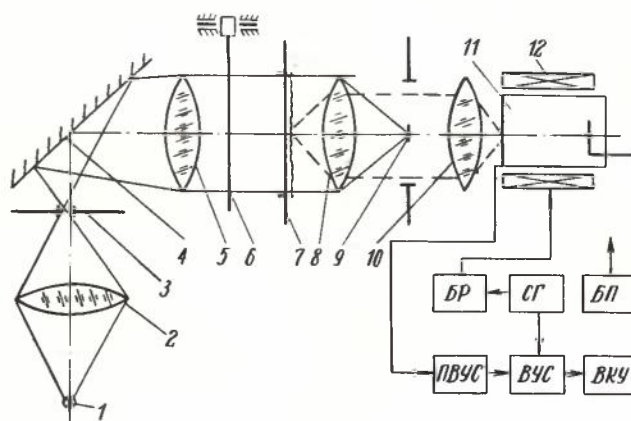


Рис.7. Схема стенда для исследования методов воспроизведения фазово-оптического изображения телевизионным способом: 1 – тепловой источник света; 2 – конденсор; 3 – промежуточная диафрагма  $d = 0,8$  мм; 4 – зеркало; 5 – осветительный объектив; 6 – obtюратор; 7 – кадровое окно с фазовым транспарантом; 8 – дополнительный объектив; 9 – визуализирующая диафрагма; 10 – проекционный объектив; 11 – видикон ЛИ-421-1; 12 – фокусирующая отклоняющая система; БП – блок разверток; СГ – синхрогенератор; ПВУС – предварительный видеоусилитель; БП – блок питания; ВКУ – видеоконтрольное устройство



видеоконтрольное устройство или на вход "Видео" телевизионного приемника. Блок разверток предназначен для управления считывающим лучом видеодиска.

Анализ спектральных характеристик фотоэлектронного умножителя ФЭУ-84, видеодиска ЛИ-421-1 и характеристики светопропускания ФТПН показывает, что в установке для исследования индикатрисс светорассеяния в качестве фотоприемника можно применять ФЭУ-84, а в стенде воспроизведения – видеодиск ЛИ-421-1. В процессе исследования контраста изображения при различных методах воспроизведения получены результаты, характеризующие зависимости контраста изображения от диаметра отверстия визуализирующей диафрагмы (рис.9). Исследования подтвердили, что контраст изображения выше в случае применения метода светлого поля.

В результате исследования микроструктуры фазово-оптического изображения типа "мороз",

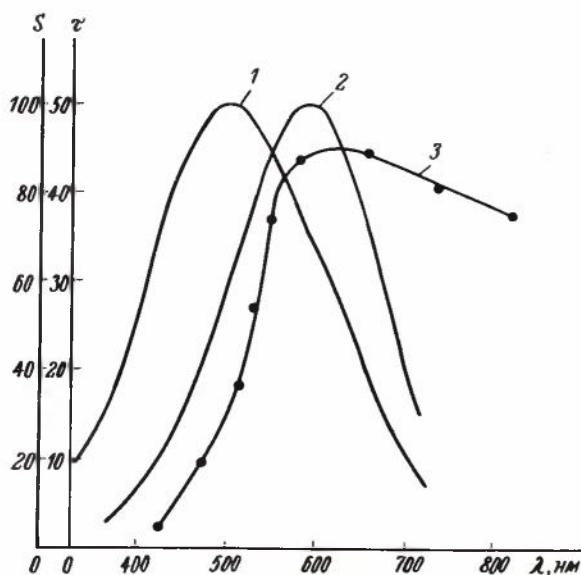


Рис.9. Зависимость контраста от диаметра визуализирующей диафрагмы: 1 – воспроизведение методом светлого поля; 2 – воспроизведение методом темного поля

Рис.8. Спектральные характеристики фотоприемников и характеристика светопропускания ФТПН: 1 – спектральная характеристика ФЭУ-84; 2 – спектральная характеристика видеодиска ЛИ-421-1; 3 – характеристика светопропускания ФТПН

записанного на ФТПН, установлено, что морозная деформация является хаотичным видом рельефа со случайным распределением микроворонки по площади поверхности фазового транспаранта и по эффективному диаметру микроворонки. При разработке систем воспроизведения и выбора метода считывания необходимо анализировать микроструктуру фазово-оптической записи с деформацией указанного типа с помощью индикатрисс светорассеяния. По индикатриссам светорассеяния оптимизируются окончательные размеры визуализирующих диафрагм, что определяет контраст и разрешение фазово-оптического изображения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гушо Ю.П. Фазовая рельефография. – М.: "Энергия", 1974.
2. Панасюк Л.М. Фототермопластическая запись на системах полупроводник-термопластик. – Способы записи информации на бессеребряных носителях, 1977, вып.8, с.14–24.
3. Дифракция света на элементах термопластической записи при ее воспроизведении в светоклаланных проекторах /Аймбандер М.С., Немтинов В.Б., Почерняев И.Н. и др. – Способы записи информации на бессеребряных носителях, 1973, вып.4, с.3–15.
4. Немтинов В.Б., Рожков О.В. Методы воспроизведения фазово-оптической записи. – Способы записи информации на бессеребряных носителях, 1977, вып.8, с.24–36.
5. Барабаш Ю.М., Кувшинский Н.Г., Павлов В.А. Фотографические характеристики термопластических сред при способе записи "мороз". – Способы записи информации на бессеребряных носителях, 1976, вып.7, с.3–12.
6. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. – М.: Мир, 1970.

Статья поступила 1 апреля 1980 г.

УДК 665 93

Г.А.Воробьев, Р.Д.Джатиева

## ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОПРОВОДЯЩИЕ КЛЕИ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Разработанные электро- и теплопроводящие клеи отличаются высокой проводимостью и хорошей адгезией к элементам конструкции приборов. В состав клеев вместо растворителей входят активные разбавители и пластификаторы, позволяющие регулировать их вязкость.

Склеивание как способ крепления элементов в конструкциях изделий микроэлектроники в настоящее время стало одним из самых распространенных технологических приемов благодаря целому ряду преимуществ по сравнению с другими видами получения соединений. Основными среди них являются простота технологии и возможность подбора материалов с комплексом необходимых свойств.

Современные синтетические клеи склеивают любые материалы, образуя высокопрочные долговечные соединения, способные работать в широком интервале температур и в различных климатических

условиях. Особый интерес представляют электропроводящие клеи, использование которых дает возможность исключить электромонтажную пайку элементов схем и применение эвтектики золота при посадке кристаллов ИС и полупроводниковых приборов.

Соединение элементов приборов с помощью таких клеев сравнительно нетрудоемко, позволяет получить надежный электрический контакт на различных подложках и дает возможность механизировать монтажно-сборочные работы [1-3].

Представляют интерес для микроэлектроники и теплопроводящие материалы, с помощью которых можно соединять детали приборов, выполненные из различных материалов, обеспечивая необходимый теплоотвод от тепловыделяющих элементов.

Электро- и теплопроводящие клеи удобны и при соединении термочувствительных элементов приборов, так как исключают вредное воздействие тепловых ударов [3,4].

В настоящее время у нас в стране ведутся интенсивные работы по разработке новых марок электро- и теплопроводящих клеев, по расширению областей их применения. Многие из ранее разработанных отечественных клеев-контактолов, например, К-8, К-16, К-17, ТПК-1, ЭНКС-2, КТП-1, недостаточно теплостойки, содержат в своей основе летучие токсичные растворители, которые обуславливают нестабильную во времени консистенцию клея, что усложняет их применение и создает неблагоприятные условия для сборки приборов [1,3,4].

Разработано несколько новых марок электро- и теплопроводящих клеевых материалов (свойства приведены в таблице), свободных от указанных недостатков. Эти клеи представляют собой вязкие, подвижные пасты и отличаются от клеев-контактолов отсутствием растворителей. Вместо растворителей в состав этих клеев входят активные разбави-

тели и пластификаторы, которые дают возможность регулировать вязкость, и обеспечивают ее высокую стабильность в течение всего срока хранения.

Высокотеплостойкие клеи — электропроводящий ЭВТ и теплопроводящий ЭЧВТ — являются однокомпонентными. Остальные клеи — двухкомпонентные — состоят из основы и отвердителя и поставляются потребителю в комплекте для перемешивания непосредственно перед применением.

Электропроводящий клей ЭВТ разработан для осуществления сборки полупроводниковых приборов. Диапазон рабочих температур клея от  $-60$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ ; ресурс работоспособности при температуре  $125^{\circ}\text{C}$  составляет более 100 тыс.ч. Клей допускает возможность термокомпрессионного присоединения выводов приборов при температуре около  $400^{\circ}\text{C}$  в течение 15—30 мин. Полученные клеевые соединения отличаются высокой электропроводимостью ( $\rho_{\text{в}} \approx 5 \cdot 10^{-4}$  Ом·см), хорошей адгезией к элементам конструкций приборов ( $\sigma_{\text{сдв}} \approx 25-7,1$  МПа), устойчивы к длительному воздействию влаги. Клей ЭЧВТ является изоляционным вариантом клея ЭВТ и обладает меньшей теплопроводностью.

На основе эпоксикремнийорганической смолы разработан электропроводящий клей ЭК-А, предназначенный для сборки цифровых полупроводниковых индикаторов и светодиодов. По консистенции клей представляет собой однородную пастообразную массу. Диапазон рабочих температур клея от  $-60$  до  $-150^{\circ}\text{C}$ , кратковременно ( $\sim 2$ ч) клей выдерживает температуру  $300^{\circ}\text{C}$ .

Для сборки полупроводниковых приборов, не допускающих воздействия высоких температур, разработаны клеевые композиции марок ЭЧЭ, ЭЧТ. Клей марки ЭЧЭ представляет собой электропроводящую, а ЭЧТ — теплопроводящую композицию

Свойства электро- и теплопроводящих клеев

	ЭЧТ МУ0.028.052	ЭЧВТ МУ0.028.064	ЭЧЭ-Н МУ0.028.052	ЭЧЭ-С МУ0.028.052	ЭК-А МУ0.028.017	ЭВТ МУ0.028.030
Внешний вид	Вязкая однородная масса белого цвета	Вязкая однородная пастообразная масса с зеленоватым оттенком	Вязкая однородная масса темносерого цвета	Вязкая однородная масса светло-серого цвета	Пастообразная однородная масса серого цвета	Пастообразная однородная масса серого цвета
Диапазон рабочих температур, $^{\circ}\text{C}$	от $-60$ до $+125$	от $-60$ до $+200$ 400 (30 мин) 450 (15 мин)	от $-60$ до $+150$	от $-60$ до $+150$	от $-60$ до $150$ 300 (2 ч)	от $-60$ до $+200$ 400 (30 мин) 450 (15 мин) 10-12
Жизнеспособность, ч, не менее	10	10-12 с ускорителем	4	4	16	10-12
Число компонентов	2	1	2	2	2	1
Вязкость по номеру круга	6-8	5-8	7-10	8-10	7-9	5-10
Отверждение (при температуре), ч	6 ( $60^{\circ}\text{C}$ ) 2,5 ( $80^{\circ}\text{C}$ ) 1 ( $120^{\circ}\text{C}$ )	3 ( $230-250^{\circ}\text{C}$ ) 3 ( $150-180^{\circ}\text{C}$ ) с ускорителем	1 ( $150^{\circ}\text{C}$ ) 1,5 ( $120^{\circ}\text{C}$ ) 2-2,5 ( $100^{\circ}\text{C}$ )	1,5 ( $120^{\circ}\text{C}$ ) 3-4 ( $80^{\circ}\text{C}$ ) 5 ( $60^{\circ}\text{C}$ )	5 ( $120^{\circ}\text{C}$ ) 1,5 ( $150^{\circ}\text{C}$ )	3 ( $230-250^{\circ}\text{C}$ )
Коэффициент теплопроводности, Вт/мК, не менее	0,5	0,8-1,0	3-6	4-6	2-3	4,0
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см	—	—	$(0,7-1,0) \cdot 10^{-2}$	$(3-4) \cdot 10^{-3}$	$(2-4) \cdot 10^{-3}$	$(2-8) \cdot 10^{-4}$
Предел прочности на сдвиг, МПа клеевых соединений Al-Al клеевых соединений Ni-Ni	8 —	4 6	5 7	6 10,2	7 13,3	4 6,2
Срок хранения, мес.	6	3	6	6	6	3
Цена за 1 кг, руб.	40	200	150	280	250	350

Клей ЭЧЭ разработан в двух вариантах: ЭЧЭ-С — наполненный серебром и ЭЧЭ-Н — наполненный никелем. Эти клеи способны отверждаться при температурах порядка 50—60°C, однако в зависимости от потребностей производства могут отверждаться и при более высокой температуре. При этом сокращается время отверждения. Поэтому для этих марок клеев рекомендовано несколько режимов отверждения и при использовании клея можно выбрать наиболее приемлемый вариант.

В связи с необходимостью механизации и автоматизации сборочных работ к клеевым композициям предъявляются дополнительные требования по обеспечению хорошей их наносимости. Этим требованиям удовлетворяет клей ЭЧТ, который может наноситься методом переноса.

Электро- и теплопроводящие клеи, рассмотренные в статье, нашли применение для крепления кристаллов в полупроводниковых и других приборах микроэлектроники.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Базарова Ф.Ф., Колесова Л.С. Клеи в производстве радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Энергия, 1975.
2. Петрова А.П. Термостойкие клеи. — М.: Химия, 1977.
3. Клеи и герметики. Под ред. Д.А.Кардашова. — М.: Химия, 1978.
4. Козловски Й.А.Л. Клеи и склеивание. М.: Знание, 1976.

Статья поступила 1 апреля 1980 г.

УДК 681.327.3:678

А. Г. Баратов, Л. И. Бакичева

## МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫЕ НОСИТЕЛИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПЕРФОРАЦИИ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ

Использование металлополимерного носителя с регистрирующим слоем SnTe и трехслойной конструкции с антиотражающим покрытием обеспечивает плотность записи  $10^6$ — $10^7$  бит/см<sup>2</sup> при чувствительности на длине волны 0,514 мкм, равной 100—200 мДж/см<sup>2</sup> и высокой контрастности, достаточных для применения в устройствах ввода-вывода информации ЭВМ.

Развитие работ по созданию устройств ввода-вывода информации, а также бытовой видеодисковой аппаратуры [1] обуславливает разработку новых, высокоэффективных сред и методов записи информации, в частности с использованием лазерного луча. Регистрирующие среды для записи двоичной кодовой информации с помощью сфокусированного луча лазера представляют собой тонкие металлические слои. Наиболее известные из однослойных носителей тонкие пленки висмута [2] обладают недостаточным контрастом и низкой ме-

ханической прочностью к истиранию в процессе эксплуатации.

Двух- и трехслойные конструкции носителей, представляющие собой основу (рулонную полиэтиленотерефталатную пленку) с нанесенными на нее регистрирующим, защитным и антиотражающим (для трехслойной конструкции) полимерными слоями, обеспечивают высокую механическую прочность и достаточную чувствительность для записи на этих носителях информации с помощью лазера.

Ниже приведены характеристики разработанных металлополимерных носителей:

Чувствительность на длине волны 0,514 мкм . . . 100—200 мДж/см<sup>2</sup>  
 Коэффициент пропускания в диапазоне длин  
 волн 0,5—1,0 мкм . . . . . не более 3 %  
 Габариты:  
 ширина . . . . . 16—0,2 мм  
 толщина . . . . . 100 ± 15 мкм  
 Длина рулона . . . . . 100 м

Известно [3, 4], что применение антиотражающих слоев способствует увеличению чувствительности и контраста носителей. Исследования в качестве антиотражающих аморфных слоев триселенида и трисульфида мышьяка (As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>), нанесенных на тонкие слои висмута или слои сурьмы, теллуридов свинца и олова (используемых в качестве регистрирующей среды), показали, что при диаметре перфорационного отверстия 6—8 мкм достигается плотность записи  $10^6$ — $10^7$  бит/см<sup>2</sup>. Наибольший контраст и высокая чувствительность получены для носителя с регистрирующей средой SnTe, а также трехслойной конструкции с использованием антиотражающего слоя (см. таблицу).

	Материалы регистрирующего слоя				
	Bi	Sb	PbTe	SnTe	Bi/As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>
Интенсивность падающего светового потока	490	470	470	470	490
Контраст*	30—40	20	23	1150	52
Чувствительность, мДж/см <sup>2</sup>	100—150	300	200	80—130	100

\* Контраст определяли как отношение светового потока, прошедшего сквозь перфорированный участок, к потоку через неперфорированный участок пленки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Обзор по материалам иностранной печати: Радиоэлектроника за 1976 год. — М.: НИИЭИР, 1977.
2. Патент 3703687 (США), 1972.
3. Патент 1491508 (Великобритания), 1977.
4. Патент 4000492 (США), 1976.

Статья поступила 1 апреля 1980 г.

# ИССЛЕДОВАНИЯ. РАЗРАБОТКИ. МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ

УДК 621.315.592.621.316 8.002.2

К. И. Мартюшов

## ТУННЕЛЬНО-БАРЬЕРНЫЙ МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ КЕРМЕТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

На основе уточнения теории проводимости островковых металлических пленок предлагается модель механизма электропроводности керметных резистивных материалов, которая объясняет характер зависимости удельного сопротивления от температуры и определяет электрофизические параметры компонентов системы, управляющие этой зависимостью.

К числу наиболее достоверных и обоснованных, с точки зрения теоретической физики, моделей механизма электропроводности керметных слоев следует отнести модели, основанные на квантово-механическом туннелировании и на процессах прыжковой проводимости [1]. Теория механизма прыжковой проводимости, которая находится в начальной стадии развития, объясняет лишь качественно специфическую особенность зависимости удельного сопротивления керметных слоев от температуры по закону Мотта-Амбегаокара

$$\rho_T = \rho_0 T^n (T_0/T)^{1/4} \quad (1)$$

и не дает закономерной связи общих электрофизических свойств системы с параметрами составляющих ее компонентов. В теории туннельного механизма проводимости керметных материалов [2], при создании которой хотя и учитывались реально существующая структура керметных слоев и наличие тонких аморфных прослоек, разделяющих гранулы проводящей фазы, а также влияние электростатической кулоновской энергии проводящих частиц на высоту потенциального барьера диэлектрической прослойки, допущены некоторые необоснованные утверждения и предположения. Ошибочные положения теории туннельного механизма проводимости будут рассмотрены ниже.

Кроме того, в существующих моделях механизма электропроводности керметных слоев отсутствуют конкретные предложения по целенаправленному поиску связи физико-химических свойств исходных материалов, используемых для синтеза керметных систем, с конечными параметрами резистивного слоя.

Большую роль в создании моделей электропроводности керметных материалов могут сыграть

достижения в области исследований свойств материалов в тонкопленочном состоянии и, особенно, так называемых "островковых" пленок [3-6]. Известно, что электрофизические свойства островковых пленок отличаются от свойств материалов в массивном состоянии. Более того, до сих пор считалось, что основной отличительной особенностью таких систем является экспоненциальная зависимость проводимости от температуры, что должно свидетельствовать об ее активационной природе [2, 6]. Однако универсальность этой закономерности не подтверждается более подробным теоретическим анализом и экспериментальными измерениями, проведенными с использованием идеализированной модели структуры островковой пленки, которая представляется как двумерная решетка круглых частиц радиусом  $r$ , расположенных на одинаковых расстояниях  $s$  друг от друга [7].

Расчет квантово-механического туннелирования такой системы с учетом деформации формы потенциального барьера в системе металл-изолятор-металл, обусловленной внешним электрическим полем, силами электрического изображения и влиянием кулоновской электростатической энергии металлических частиц, величина которой в поле  $F$  увеличивает высоту барьера на

$$\delta E = \frac{e^2(r+s)}{\epsilon \epsilon_0 r(2r+s)} - F \cdot e(2r+s), \quad (2)$$

дает при условии малых величин градиента напряжения поля ( $eV \ll kT$ ) следующие выражения для плотности туннельного тока:

$$i(V, T) = \frac{8\pi em}{\hbar^2 B^2} \sin A \left( \frac{eV}{kT} \right) \frac{(\pi BkT)}{\sin(\pi BkT)} \exp(-A\bar{\phi}^{1/2}) \exp\left(-\frac{\delta E}{kT}\right) \text{ при } \delta E > kT; \quad (3)$$

$$i(V, T) = \frac{8\pi em}{\hbar^2 B^2} \sin A \left( \frac{eV}{kT} \right) \frac{(\pi BkT)^2}{\sin(\pi BkT)} \left( \frac{kT}{\delta E} \right) \exp(-A\bar{\phi}^{1/2}) \text{ при } \delta E < kT; \quad (4)$$

$$\text{где } A = \frac{4\pi \Delta s}{\hbar} (2m)^{1/2}; \quad \bar{\phi} = \frac{1}{\Delta s} \int_{s_1}^{s_2} \phi(x) dx; \quad B = \frac{A}{2\bar{\phi}^{1/2}}$$

$V$  — напряжение;  $T$  — температура;  $m, e$  — масса и заряд электрона;  $\hbar$  — постоянная Планка;  $k$  — постоянная Больцмана. Величина  $\Delta s$  представляет собой ширину потенциального барьера, уменьшенную за счет сил электрического изображения;  $s_1$  и  $s_2$  — классические "точки поворота" в расчетах Стрэттона-Симмонса [8, 9].

Усредненная высота потенциального барьера

$$\bar{\phi} = \bar{\phi}_s + \delta\phi - \phi_{\text{и}} - \phi_E - \phi_m,$$

где  $\bar{\phi}_s$  — высота энергетического барьера электрона из проводящей частицы в подложку;  
 $\delta\phi$  — изменение высоты потенциального барьера

ера, вызванное переходом зарядов между проводящей частицей и подложкой за счет выравнивания электрохимических потенциалов (изгиб энергетических зон) – положительная величина, когда в изолирующей фазе на границе раздела образуется обедненный слой;

$\phi_{и}$  – уменьшение высоты потенциального барьера за счет сил электрического изображения;

$\phi_E$  – уменьшение высоты барьера за счет внешнего поля;

$\phi_m$  – уменьшение высоты барьера за счет наличия ионных примесей.

$|\bar{\phi}_s + \delta\phi|$  является энергетической константой границы раздела и определяется работой выхода электронов контакта "хорошо проводящая фаза – диэлектрик".

Параметры  $\bar{\phi}$ ,  $\delta\phi$ ,  $\phi_{и}$ ,  $\phi_E$  и  $\phi_m$  зависят от физических свойств и толщины диэлектрической пленки, градиента напряженности поля и количества "активных" примесей на границе раздела "частица – подложка".

Теоретические и экспериментальные закономерности, полученные в работе [7] для островковых металлических пленок, позволяют сделать два вывода применительно к керметным материалам:

– перенос электрических зарядов осуществляется главным образом через подложку, а не через свободное пространство между островками. Поэтому, с точностью численного коэффициента 2–4, формулы (3) и (4) полностью применимы для трехмерного варианта структуры керметных материалов;

– так как размер частиц проводящей фазы находится в пределах 50–200 нм, то правомерно для определения плотности туннельного тока использовать закономерность, подчиняющуюся уравнению (4).

Сопротивление произвольно выбранного участка керметного слоя (модель ячейки туннельно-барьерной проводимости приведена на рис. 1) можно представить как

$$R_{я} = R_{б} + R_m = R_{б_0} \frac{\sin(\pi BkT)}{(\pi BkT)^2} + R_{m_0} (1 + \beta T), \quad (5)$$

где  $\beta$  – температурный коэффициент проводящей фазы керметного слоя. Отметим, что формула (5) коренным образом отличается от предложенной в работе [2]. Указанные в работе закономерности

$$G_{бT} = G_{б_0} \frac{aT}{\sin aT} \quad \text{и}$$

$$R_T = \frac{1}{2} R_{б_0} \frac{\sin aT}{aT} [1 + \exp(E/kT)]$$

являются ошибочными.

Параметр  $(\pi Bk)$  удобно обозначить одним символом "а". Тогда температурный коэффициент туннельно-барьерного слоя (TKR<sub>б</sub>) и температур-

ный коэффициент туннельно-барьерной ячейки (TKR<sub>я</sub>) можно представить в следующей форме:

$$\text{TKR}_{б} = a \left[ \frac{1}{\text{tg } aT} - \frac{2}{aT} \right], \quad (6)$$

$$\text{TKR}_{я} = \frac{a[(aT)^2 \cos aT - 2(aT) \sin(aT)] + K\beta(aT)^4}{(aT)^2 \sin aT + K(aT)^4(1 + \beta T)}, \quad (7)$$

$$\text{где } K = \frac{R_{m_0}}{R_{б_0}}.$$

Параметр  $B$  в более ранних работах по туннельному механизму проводимости обычно обозначался  $C$  [8–10]. Результаты экспериментального определения этой величины, зависящей от градиента напряженности, применительно к тонким пленкам  $Al_2O_3$ , [10] свидетельствуют, что ее минимальное значение составляет  $15,5 \text{ эВ}^{-1}$ , что соответствует величине  $a = \pi Bk = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ . Поэтому ограничение, указанное в работе [2] для величины в пределах  $(5-10) \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ , является необоснованным.

Теоретически значение "а" ограничивается соотношением  $\pi > a > 0$ . При  $a > 7 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$  предложенные в работе [2] соотношения теряют смысл и не могут объяснить характерную, установленную

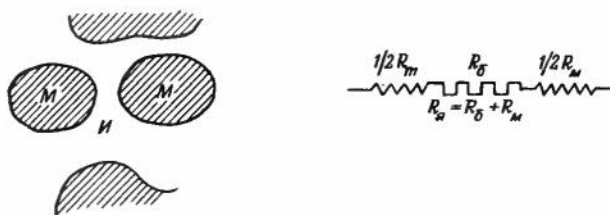


Рис. 1. Плоская модель ячейки туннельного барьера и ее эквивалентная схема: М – проводящая частица (условно сферическая); И – изолирующая прослойка (стеклофаза).

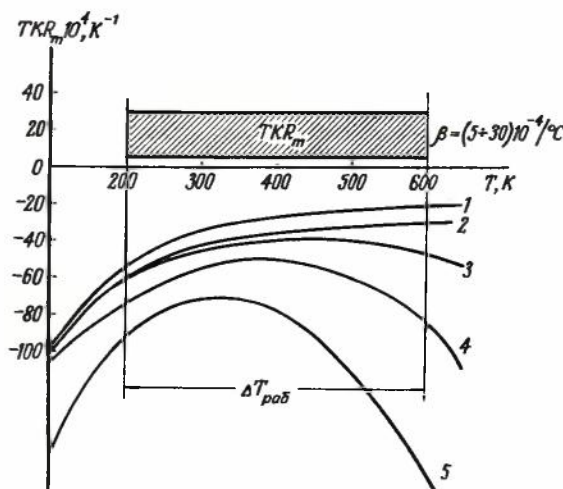


Рис. 2. Зависимость TKR от температуры элементов барьера – проводящей фазы (заштрихованная область) и изолирующей прослойки – при различных значениях параметра  $a$  ( $\text{К}^{-1}$ ): 1 –  $10^{-3}$ ; 2 –  $2 \cdot 10^{-3}$ ; 3 –  $3 \cdot 10^{-3}$ ; 4 –  $4 \cdot 10^{-3}$ ; 5 –  $5 \cdot 10^{-3}$ .

экспериментально V-образную зависимость удельного сопротивления от температуры.

Расчеты зависимости температурного коэффициента барьерного слоя от температуры при различных значениях параметра  $a$ , проведенные с использованием формулы (6), приведены на рис. 2. В верхней части рисунка показана область возможных значений ТКР проводящей фазы керметной системы (величина  $\beta$ ). Как видно, температурная зависимость ТКР  $\beta$  не монотонна, имеет хорошо выраженный максимум абсолютного значения, который смещается в область более низких температур по мере увеличения параметра  $a$ . Температурный коэффициент барьерного слоя всегда отрицателен и имеет минимальное значение при условии  $aT / \sin aT = \sqrt{2}$ .

Ниже приведены максимумы температурного коэффициента туннельно-барьерного слоя ( $\text{TKR}_{\text{бmax}}$ ) при различных значениях параметра  $a$ , который, в свою очередь, определяется высотой эффективного потенциального барьера  $\bar{\phi}$  и диэлектрической проницаемостью материала изолирующей фазы:

- $1,4 \cdot 10^{-2}$  при 100 К,
- $7 \cdot 10^{-3}$  при 200 К,
- $5 \cdot 10^{-3}$  при 280 К,
- $4,7 \cdot 10^{-3}$  при 300 К,
- $3,5 \cdot 10^{-3}$  при 400 К,
- $2,8 \cdot 10^{-3}$  при 500 К.

Таким образом, предлагаемая модель механизма электропроводности допускает возможность целенаправленного регулирования кривизны характеристики  $R = f(T)$  в необходимом рабочем интервале температур путем изменения таких электрофизических свойств компонентов, образующих сложную керметную систему, как  $\bar{\phi}$ ,  $\epsilon$ ,  $\rho_M$  и  $\beta$ .

На рис. 3 приведены расчетные зависимости нормализованных значений сопротивлений ( $R_T / R_{\text{min}}$ ) от температуры для элементарной ячейки туннельно-барьерной проводимости (см. рис. 1) для двух значений температурного коэффициента хорошо проводящей фазы. Естественно, что эти зависимости имеют лишь качественное значение. Их нельзя сравнивать с данными эксперимента реальных систем, так как обобщенная зави-

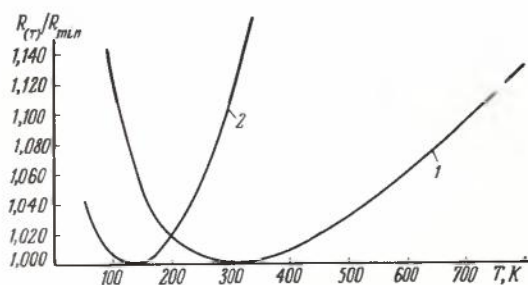


Рис. 3. Расчетные зависимости нормализованных сопротивлений для двух значений ТКР проводящей фазы: 1 —  $a = 5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ,  $\beta = 5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ,  $T_{\text{min}} = 300 \text{ K}$ ; 2 —  $a = 5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ,  $\beta = 2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ,  $T_{\text{min}} = 150 \text{ K}$

симость  $R = f(T)$  может изменяться от доли вклада термозависимых ячеек барьерно-туннельной проводимости в общей проводимости шунтирующих цепей хорошо проводящей фазы. Расчет реальных керметных систем следует проводить по известным методам [11, 12] с учетом современной теории протекания тока [13], основываясь на закономерностях "термоактивационной" части проводимости, предлагаемых в настоящей работе.

Косвенным подтверждением предлагаемого варианта модели механизма электропроводности являются предсказанные закономерности влияния состава окислительно-восстановительной газовой среды на электрофизические характеристики керметных резисторов при повышенных температурах. Так, при обработке рутенийсодержащих резисторов в атмосфере водорода можно было ожидать резкого повышения высоты потенциального барьера  $\bar{\phi}$  и увеличения удельного сопротивления за счет образования барьера "металлический рутений (чистый или легированный) — стекло" вместо обычно действующего "окись рутения (или рутенатов) — стекло". При последующем обжиге в окислительной среде восстановленных слоев должно происходить снижение величины сопротивления по сравнению с исходным, поскольку вследствие разных скоростей реакций восстановления и окисления частиц проводящей фазы образуется слоистая структура с не полностью окисленной сердцевиной. Экспериментально эти закономерности обнаружены и подвергаются в настоящее время детальному исследованию.

Рассмотренный выше вариант механизма проводимости дает возможность предсказать и объяснить характер зависимости удельного сопротивления керметных слоев от температуры. Причем он может быть целенаправленно изменен подбором исходных материалов. Определяющее значение имеет параметр  $a = \pi V k$ , который должен быть экспериментально установлен для наиболее перспективных известных керметных систем. Энергетический спектр потенциального барьера  $\bar{\phi}$  на границе раздела "частица проводящей фазы — аморфная тонкая прослойка" управляет основными электрофизическими свойствами керметного материала. Высота указанного потенциального барьера может резко снижаться при наличии в аморфной фазе активных примесей с преимущественным проявлением отрицательного температурного коэффициента системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мартышов К. Обзоры по электронной технике. Сер.5, 1979, вып. 3.
2. Pike G., Seager C. — J. Appl. Phys., 1977, v.48, N 12.
3. Палатник Л., Фукс М., Косевич В. — Механизм образования и субструктура конденсированных пленок. — М. Наука, 1971.
4. Палатник Л., Сорокин В. — Материаловедение в микроэлектронике. М.: Энергия, 1978.
5. Мейксин З. — Физика тонких пленок. Пер. с англ. т.8. М.: Мир, 1978.
6. Трусов Л., Холмянский В. Островковые металлические пленки. — М.: Металлургия, 1973.

7. Hill R.M. — Proc. Roy. Soc., 1969, N A309, p. 377—417.
8. Stratton R. — J. Phys. Chem. Solids, 1962, N 23, p. 1177—1190.
9. Simmons J. — Appl. Phys. 1963, N 34, p. 1793.
10. Hartman E., Chivian J. — Phys. Rev., 1964, 18 May, N 4A, p. 134.
11. Рахманин Н., Петров В. — Электронная техника. Сер. 5, 1977, вып. 5.
12. Векслер В., Тонконогов М. — ЖТФ, 1979, вып. 49.
13. Шкловский И. Б., Эфрос А. Электронные свойства легированных полупроводников. — М.: Наука, 1979.

Статья поступила 24 июня 1980 г

УДК 001.18.621.382

И. В. Алябьев, В. С. Папков,  
М. В. Суровиков, В. Д. Чумак

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КНС-СТРУКТУР

Возможности практического использования преимуществ КНС-технологии расширены благодаря существенному улучшению качества структур КНС, что выдвигает в ближайшие годы КНС-технологии в число ведущих направлений микроэлектроники.

Основные показатели уровня развития микроэлектроники — степень интеграции, быстродействие, потребляемая мощность и стоимость микросхем — во многом зависят от метода изоляции элементов схемы. Из известных методов изоляции, которые условно разделяют на три основные группы [1]: изоляцию *p-n* переходом, комбинированную изоляцию, при которой элементы схемы друг от друга разделяются диэлектриком, а от подложки — *p-n* переходом, и полную диэлектрическую изоляцию, когда элементы схемы со всех сторон изолированы диэлектриком, — в производстве микросхем самыми перспективными являются методы комбинированной и полной диэлектрической изоляции. Их применение позволяет существенно уменьшить паразитную емкость, увеличить пробивное напряжение, снизить рассеиваемую мощность, повысить степень интеграции и быстродействие микросхем по сравнению с диодной изоляцией. Наиболее полно перечисленные преимущества реализуются при формировании интегральных схем на сапфировых подложках.

Простейшие микросхемы на сапфире — кремниевые диодные матрицы и диодно-резистивные схемы — были созданы во второй половине шестидесятых годов одновременно с появлением ИС на автотаксиальном кремнии. Попытки сформировать bipolarные приборы в структуре "кремний на сапфире" (КНС) оказались малоэффективными, что связано с высокой плотностью структурных дефектов, присущей гетероэпитаксиальным слоям КНС.

Перспектива широкого использования КНС структур открылась после создания на их основе образцов комплементарных МОП ИС [2]. Эти схемы

не только обладают свойствами обычных КМОП схем (возможность работы от одного источника питания, малая статическая мощность, высокая помехоустойчивость в широком рабочем диапазоне температур), но и обеспечивают полную взаимную изоляцию элементов, позволяют повысить в несколько раз плотность компоновки и обладают почти на два порядка повышенной радиационной стойкостью, значительно меньшим производением потребляемой мощности на быстродействие (рис. 1) [3]. По технологии КМОП/КНС выпускаются высококачественные микропроцессорные наборы различного назначения: для быстродействующих печатющих и запоминающих приборов, микрокомпьютеров, систем телесвязи, бортовых ЭВМ и других функциональных устройств. Однако широкое развитие КНС технологии до сих пор сдерживается высокой стоимостью сапфировых подложек по сравнению с кремниевыми. Поэтому основные усилия в этой области направлены на удешевление подложек. По оценке специалистов, применение КНС-структур в производстве ИС, целесообразное в настоящее время для ограниченного ряда специальных разработок, станет экономически выгодным для большинства разработок, когда стоимости сапфировых и кремниевых подложек будут различаться не более, чем в два-три раза. Значительное снижение стоимости сапфировых подложек ожидается по мере увеличения объема их производства. Однако еще более существенным фактором снижения стоимости подложек является замена исходных объемных монокристаллов сапфира на ленточные.

Проблемы широкого развития КНС-производства не ограничиваются стоимостью сапфировых подложек. К ним относятся также задачи повышения качества и удешевления монокристаллов сапфира, совершенствования методов и оборудования для их переработки на подложки, подготовки поверхности подложек к гетероэпитаксии кремния. Несмотря на высокую степень изученности физико-химической природы и электро-физических свойств гетероэпитаксиальной пары кремний-сапфир, повышение качества слоев КНС и стабильности их свойств во времени, при температурных и других воздействиях продолжают оставаться предметом широких исследований. Не менее актуальными являются также вопросы разработки промышленных методов контроля характеристик КНС.

Первые сообщения о получении структур с монокристаллическим слоем кремния на изолирующих подложках и о приборах на их основе [4] привлекли

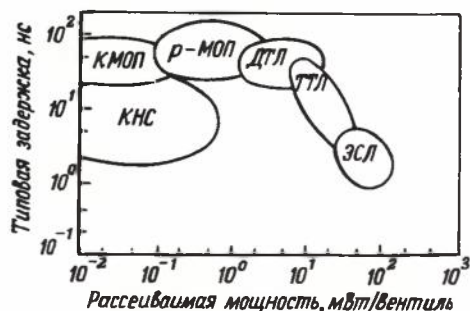


Рис. 1. Быстродействие различных типов ИС

внимание многих специалистов в области материалов и приборов микроэлектроники и инициировали проведение широких исследований гетероэпитаксиальных структур кремний-диэлектрик. В качестве материала изолирующей подложки было опробовано около десятка различных монокристаллов-диэлектриков. Критериями для их выбора являлись кристаллографическое сходство с кремнием, близость параметров решеток и термических коэффициентов линейного расширения, химическая инертность и поверхностная реакционная способность, удовлетворяющая условиям гетероэпитаксии кремния. Учитывались также технические возможности получения качественных монокристаллов достаточных размеров и переработки их на подложки. В результате исследований гетероэпитаксиальных структур кремний-диэлектрик наиболее перспективным материалом для изолирующих подложек признан сапфир, и усилия разработчиков направлены на развитие КНС-технологии, включая выращивание монокристаллов сапфира, получение подложек, гетероэпитаксиальное наращивание кремниевых слоев и создание микросхем на КНС-структурах.

**Выращивание монокристаллов сапфира.** Успехи современной КНС-технологии главным образом определяются достижениями в области выращивания высококачественных монокристаллов сапфира, подробно рассмотренными в работе [5]. За рубежом в производстве монокристаллов сапфира для целей микроэлектроники преобладает метод Чохральского, обеспечивающий получение безблочных кристаллов диаметром до 100 мм с плотностью дислокаций не более  $10^4 \text{ см}^{-2}$ . Необходимость применения дорогостоящей технологической оснастки и чрезвычайно высокие потери при переработке объемных кристаллов на подложки заставили искать более эффективные методы выращивания и более рациональные формы кристалла. К их числу относится EFG (edge-defined film-fed growth) — метод получения профилированных кристаллов сапфира, в основу которого положен метод Степанова. Предполагается, что после усовершенствования технологии и оборудования можно будет одновременно вытягивать несколько сапфировых лент шириной до 100 мм, причем поверхность лент без дополнительной подготовки будет отвечать требованиям гетероэпитаксии кремния. В случае успешного решения этой задачи сапфировые подложки практически сравняются по стоимости с кремниевыми. Однако уже сейчас, несмотря на недостаточно высокое качество лент сапфира (наличие пузырьков и включений второй фазы), изготавливаемые из них подложки могут успешно конкурировать с подложками из монокристаллов, выращенных по Чохральскому.

Более предпочтительным является выращивание объемных монокристаллов сапфира, осуществляемое способом, в основу которого положен метод Киропулоса. Благодаря более дешевой технологической оснастке стоимость выращиваемых монокристаллов по сравнению с методом Чохральского снижена в два-три раза. Тем не менее, значитель-

ные потери сапфира при переработке объемных кристаллов на подложки вызывают необходимость их замены на ленточные.

**Производство сапфировых подложек.** Сапфировые подложки из объемных кристаллов изготавливаются по технологической схеме, в основном совпадающей с производством кремниевых подложек и включающей ориентированное разрезание кристаллов на пластины, шлифование и двухстадийное полирование.

Механическая обработка сапфира довольно трудоемка из-за чрезвычайно твердости сапфира, занимающего после алмаза второе место по шкале Мооса. Не менее сложны способы травления сапфира из-за его высокой химической инертности.

Разрезание монокристаллов сапфира на пластины проводится с помощью отрезных кругов с внешней и внутренней алмазной режущей кромкой. Применение кругов с внешней кромкой обеспечивает достаточно высокую производительность, но при этом возрастают потери на ширину реза и образуется более глубокий нарушенный слой. При резке кругами с внутренней режущей кромкой отходы сапфира меньше, но снижается и производительность. Практика показывает, что разрезать кристаллы сапфира диаметром до 76 мм целесообразно кругами с внутренней режущей кромкой, а свыше 76 мм — кругами с внешней кромкой [6].

Увеличение диаметра разрезаемых кристаллов сапфира приводит к резкому возрастанию времени отрезания пластины, затрудняет подвод смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания и удаление шлама, снижает износостойкость отрезного круга. Поэтому в последние годы все большее распространение получает способ, в котором перечисленные недостатки устранены благодаря вращению кристалла в процессе его разрезания. При этом способе время отрезания пластины уменьшается по крайней мере в два раза, а наличие круговой щели облегчает охлаждение зоны резания и отвод шлама. Поскольку глубина врезания отрезного круга в кристалл не превышает половины его диаметра,

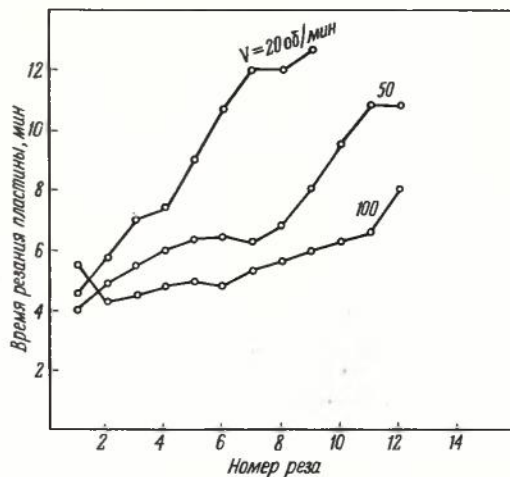


Рис. 2. Изменение времени реза при последовательном отрезании пластин сапфира от кристаллов, вращающихся с различной скоростью



расширяются возможности обработки более крупных кристаллов. Исследование эффективности резания сапфира кругами с внутренней кромкой показало, что лучшие результаты соответствуют скорости вращения кристалла, равной 100 об/мин (рис. 2) [7]. Наблюдаемый эффект объясняется самозаточкой режущей кромки о кристалл, проявляющейся при больших скоростях его вращения. Несомненно, важную роль при резке кристаллов сапфира играет правильный выбор смазочно-охлаждающей жидкости. Недостатком рассмотренного способа является образование скола в центре вращения отрезаемой пластины. Для его устранения в конце резания следует прерывать вращение кристалла и жестко фиксировать отрезаемую пластину. Кроме того, для обеспечения плоскостности пластин требуется строгое соблюдение параллельности осей вращения кристалла и отрезного круга.

Дальнейшее повышение производительности процесса резки может быть достигнуто путем использования оборудования, снабженного микропроцессором, по требуемой программе увеличивающим скорость подачи по мере уменьшения диаметра разрезаемого кристалла.

Последующая механическая обработка разрезанных пластин сапфира осуществляется по технологической схеме, во многом заимствованной из производства кремниевых подложек и включающей два этапа шлифования обеих сторон, предварительное и финишное полирование рабочей стороны.

В последнее время между операциями резки, шлифовки и полировки вводят термический отжиг сапфировых пластин. Это делается с целью удаления алмазных зерен, внедряющихся в приповерхностный объем на операциях резки и шлифовки. Отжиг пластин проводят в атмосфере кислорода при температуре 1000–1100°C [8]. Такая обработка практически полностью устраняет образование выколов и царапин при полировании.

Представляют интерес результаты исследования и разработки способа полирования сапфира коллоидной окисью кремния [8], которая успешно применяется для полирования кремния, гранатов и многих других материалов. Способность окиси крем-

ния обеспечивать полировку сапфира, чрезвычайно твердого и химически инертного материала, объясняется тем, что в нейтральной системе  $Al_2O_3-SiO_2-H_2O$  возможно образование стабильного соединения  $Al_2Si_2O_7 \cdot 2H_2O$  со структурой, близкой к природному каолину. В то же время для обеспечения заметной скорости полирования требуется соблюдение трех условий: температура должна быть достаточной для протекания реакции образования  $Al_2Si_2O_7 \cdot 2H_2O$ ; продукты реакции должны непрерывно отводиться с поверхности подложки; реагенты также непрерывно должны вводиться в контакт с полируемой поверхностью. Таким образом, съем при полировке сапфира коллоидной окисью кремния осуществляется чисто химически. При этом практически полностью с поверхности подложки устраняется нарушенный слой. Процесс характеризуется показанной на рис. 3 температурной зависимостью скорости съема, пропорциональной скорости реакции образования каолина. Энергия активации реакции равна 14,5 ккал/моль. По результатам исследований рекомендованы следующие условия полирования сапфира коллоидной окисью кремния: концентрация  $SiO_2$  в растворе – 16%, pH = 8, температура полировальника – 82°C. В этих условиях скорость съема при полировании плоскости (1102) сапфира достигает 25 мкм/ч. Сравнение морфологии образцов сапфировых подложек, прошедших полировку коллоидной окисью кремния, порошком  $Al_2O_3$  с размером зерна 0,3 мкм и порошком алмаза с размером зерна 1,3 и 1,6 мкм, подтвердило, что наилучшее качество поверхности достигается при использовании коллоидной окиси кремния [9]. Однако этот способ химической полировки сапфира пока не получил достаточно широкого распространения.

Подготовка подложек к гетероэпитаксии. В эпитаксиальных структурах наличие нарушенной при механической обработке поверхности подложки вызывает появление кристаллических дефектов и нарушений в осаждаемой пленке и делает их непригодными для применения в ИЭТ. После механического воздействия невозможно получить сапфировые подложки без остаточного нарушения поверхности. Поэтому перед гетероэпитаксией кремния требуется дополнительная подготовка подложек с целью устранения нарушенного слоя.

Стравливание нарушенного слоя химической обработкой сапфировых подложек в растворах кислот, расплавах солей и окислов не нашло применения в КНС-технологии из-за селективного характера травления и загрязнения поверхности нерастворимыми и трудноудаляемыми осадками. Использование газовых травителей – смеси  $HCl-H_2$ ,  $SF_6$ ,  $CCl_4$  – усложняло процесс и вызывало селективное растравливание поверхности. Разработчики КНС-технологии за рубежом остановили свой выбор на отжиге сапфировых подложек в потоке водорода при температуре 1200–1300°C. Поскольку травление сапфира в водороде также отличается селективным характером, требуется тщательная финишная полировка подложек субмикронным абразивом, что значительно удорожает их стоимость.

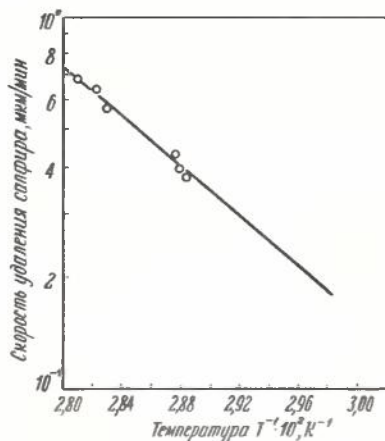


Рис. 3. Зависимость скорости съема от температуры при полировании сапфировых подложек коллоидной окисью кремния

Устранение остаточных нарушений в приповерхностном слое сапфировой подложки возможно не только с помощью химического травления, но и за счет рекристаллизации. Полуторочасовой отжиг сапфировых подложек в вакууме при температуре 1600–1800°C приводит к полной рекристаллизации нарушенной поверхности [10]. При этом происходит выравнивание рельефа — исчезновение мелких и сглаживание крупных рисок и царапин на поверхности. Благодаря этому эффекту появилась возможность исключить дорогостоящую операцию финишной доводки субмикронными алмазными порошками.

Высокое качество поверхности сапфира достигается также ее ионо-плазменной обработкой [11]. Скорость травления, носящего полирующий характер, составляет около 1 мкм/ч. Как и в случае вакуумной термообработки, наблюдается сглаживание рельефа поверхности. Особенно заметен этот эффект при обработке шлифованных и химически травленных поверхностей.

**Гетероэпитаксия КНС.** До окончательного выбора промышленного способа осаждения слоев кремния на сапфире были исследованы практически все методы, опробованные ранее в эпитаксии кремния. Вакуумные методы из-за технологической сложности и низкой производительности оборудования не получили практического применения. Использование традиционных для автоэпитаксии процессов наращивания кремния путем водородного восстановления из  $\text{SiCl}_4$  и  $\text{SiHCl}_3$  [4] невозможно, так как взаимодействие хлоридов и продуктов их восстановления с сапфировой подложкой в начальной стадии осаждения препятствует образованию сплошного слоя.

Наиболее приемлемым для гетероэпитаксии КНС является метод, использующий пиролизное разложение моносилана, разбавленного водородом (4–5 об. %). Этот метод позволяет сравнительно просто осуществлять строго дозированное легирование в широком диапазоне концентраций фосфора, бора, мышьяка, обеспечивает удовлетворительную однородность слоев КНС по толщине, наилучшие (по сравнению с другими методами) структурное

совершенство и качество поверхности, возможность достижения требуемых электрофизических свойств при осаждении субмикронных слоев кремния. Благодаря перечисленным преимуществам силановый метод повсеместно принят в качестве основы промышленной технологии формирования КНС-структур.

С постановкой задач совершенствования известных и создания новых, все более сложных, микросхем ужесточаются требования к слоям КНС по однородности электрофизических характеристик и структурному совершенству, уровню автолегирования и концентрации посторонних примесей, уменьшению влияния переходного слоя на границе кремний-сапфир, приближению подвижности носителей заряда к значениям для объемного кремния, снижению толщины вплоть до 0,2 мкм с обеспечением необходимых электрофизических свойств.

Попытка уменьшить уровень автолегирования за счет снижения температуры подложки до 950°C с одновременным увеличением скорости роста до 5,5 мкм/мин при использовании в качестве источника кремния дихлорсилана [12] не принесла преимуществ перед силановым методом. Частичная и полная замена водорода на гелий в газовой смеси водород-моносилан позволила снизить температуру гетероэпитаксии на 50°C, однако концентрация алюминия, внедренного из сапфировой подложки, практически осталась на прежнем уровне [13]. Оказался неэффективным и комбинированный способ осаждения слоев КНС (в начальной стадии на сапфировую подложку осаждался тонкий сплошной слой кремния из моносилана, затем в газовую смесь водород-моносилан вводили хлористый водород, или заменяли моносилан тетрахлоридом кремния). Перспективным путем повышения структурного совершенства слоев КНС является устранение разориентированных зародышей кремния в начальной стадии роста [14]. Для этого в реакционную смесь водород-моносилан вводится добавка тетрахлорида кремния в количестве 1,5–2,5 об. %. Электронографическое исследование полученных образцов показало существенное улучшение структурного совершенства слоев КНС, обусловившее повышение подвижности носителей заряда на 20%.

На структурное совершенство и электрофизические свойства слоев КНС, наряду с другими известными факторами, определяющее влияние оказывает характер протекания начальной стадии роста. Экспериментальное изучение этого этапа гетероэпитаксии показало [15], что формирование сплошного слоя проходит последовательно через процессы появления на поверхности подложки зародышей, их роста и коалесценции. Скорость протекания этих процессов, плотность зародышей и время, необходимое для достижения сплошности слоя, зависят от метода осаждения. Если в новом процессе плотность кремниевых зародышей в начальный момент достигает  $10^9$ – $10^{10}$  см<sup>-2</sup>, то в хлоридном процессе она не превышает  $10^6$ – $10^7$  см<sup>-2</sup>. Наблюдаемая разница объясняется тем, что при хлоридной эпитаксии температура подложки выше на 100–150°C. Кроме того, компоненты газовой смеси активно взаимодействуют химически с поверхностью подложки.

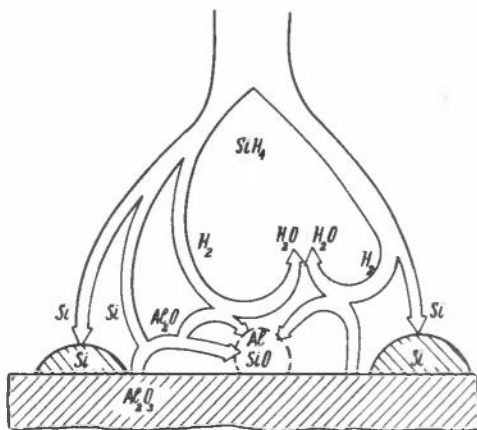
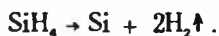
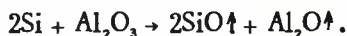


Рис. 4. Модель формирования гетероэпитаксиальных слоев КНС с учетом химических реакций, протекающих на поверхности сапфировой подложки

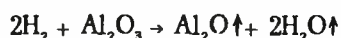
В работе [16] предложена модель формирования гетероэпитаксиального слоя КНС с рассмотрением химических реакций, протекающих в непосредственной близости от поверхности сапфировой подложки (рис. 4). Согласно модели кремниевые зародыши образуются вблизи поверхности подложки в результате пиролитического разложения моносилана:



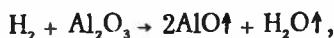
Первая или очередная порция атомов кремния адсорбируется поверхностью подложки или находящимися на ней зародышами. При этом кремний реагирует с сапфиром, образуя летучие продукты реакции:



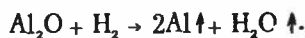
Одновременно с поверхностью подложки активно взаимодействует водород:



или



благодаря чему вблизи поверхности подложки присутствуют летучие продукты реакции и другие метастабильные соединения. На стадии зарождения и роста алюминий может переходить из подложки в кремний через субоксид:



С увеличением размера зародыши сливаются в островки, затем происходит слияние островков — коалесценция. При условии достаточно высокой температуры подложки, близкой к 1100°C, коалесценция сопровождается образованием тонкого (50 нм) слоя алюмосиликатного стекла, окружающего кремниевые зародыши и вызывающего образование дефектов упаковки [17]. По достижении сплошности (при толщине слоя свыше 0,2 мкм) взаимодействие паров кремния с наружной поверхностью подложки прекращается, в то время как обратная сторона подложки в течение всего процесса подвергается воздействию водорода.

Рассмотренная модель в основном совпадает с общепризнанным представлением природы гетероэпитаксиального роста КНС, свидетельствует о чрезвычайном влиянии характера протекания начальной стадии роста на структурное совершенство и электрофизические свойства формируемого кремниевоего слоя.

Управление начальной стадией (когда требуется обеспечение условий для максимальной плотности ориентированных зародышей и быстрого достижения сплошности) и последующим ростом кремниевоего слоя заключается в правильном выборе соотношения температуры подложки и скорости осаждения кремния. Именно эти параметры при соблюдении прочих известных требований гетероэпитаксии во многом определяют кристаллическое совершенство, уровень автолегирования и электрофизические свойства КНС. Характерной особенностью развития и совершенствования КНС-технологии за последние 15 лет является очевидная тенденция постепенного снижения температуры и увеличения скорости роста. Так, если в начале своего

развития силовая технология обеспечивала качественные характеристики КНС при температуре подложки 1100°C [18], то в настоящее время оптимальными для этого же метода считаются значения температуры ниже 1000°C [19].

Представляют интерес результаты исследования двухстадийной гетероэпитаксии [20]. Начало процесса до наступления сплошности проводят со скоростью 5 мкм/мин, а затем дорастивают кремниевый слой до заданной толщины с обычной скоростью 0,3–0,8 мкм/мин. Полученные образцы характеризуются высокими структурными и электрофизическими свойствами, однако из-за трудности осуществления этого способа в производстве структур КНС с субмикронными слоями кремния обычно используют постоянную скорость в пределах 2–5 мкм/мин [19, 21].

Уменьшению температуры гетероэпитаксии способствует прогресс в подготовке качественной поверхности сапфировых подложек. Полное отсутствие нарушенного слоя позволяет осаждать на таких подложках слои кремния высокого качества при температуре, равной 940°C [19].

Гетероэпитаксия КНС при различных соотношениях скорости роста и температуры подложки исследована с помощью оригинальной методики фотометрирования отраженного от растущего слоя монохроматического светового луча [22]. Совокупность результатов работ [15, 17, 22] позволяет рекомендовать оптимальные соотношения температуры и скорости гетероэпитаксии. Необходимость правильного сочетания этих параметров подтверждена также в работе [19].

С точки зрения технологии изготовления микросхем на основе КНС одним из важных показателей качества слоев кремния является стабильность их электрических характеристик при длительном воздействии высоких температур. С целью повышения термостабильности слои кремния осаждают при скорости более 2 мкм/ч и переменной температуре подложки (от 950 до 1030°C) [21]. Низкая температура в начальной стадии способствует увеличению плотности зародышей, а повышение ее в период роста гарантирует высокое качество кристаллической структуры. Путем предварительного нанесения тонкого (0,1 мкм) слоя вольфрама на обратную сторону подложки устраняется один из главных источников автолегирования. Эта мера в сочетании с переменной температурой гетероэпитаксии позволила получать термостабильные слои КНС с холловской подвижностью, на 15–20% превышающей обычный уровень [21].

Существует значительное расхождение в оптимальных условиях гетероэпитаксии для реакторов вертикального и горизонтального типа. Заметно смещается оптимум и при изменении геометрии реактора, подложкодержателя, системы ввода в реактор парогазовой смеси. Эти обстоятельства следует учитывать при модернизации и смене эпитаксиального оборудования.

Проблемы оценки качества КНС. Структуры КНС с толщиной кремниевоего слоя 0,3–0,8 мкм и удельным сопротивлением свыше 10 Ом·см в основном используются в настоящее время в произ-

водстве КМОП ИС. Традиционные методы контроля, применяемые для измерения электрических параметров автоэпитаксиальных и толстых гетероэпитаксиальных слоев кремния, не пригодны в данном случае по ряду причин.

Наличие в кремниевых структурах заряда поверхностных состояний приводит к изгибу энергетических зон и образованию в приповерхностном слое области пространственного заряда. При определенных условиях область объемного заряда может распространяться на всю глубину слоя и резко уменьшать его проводимость. Очевидно также, что этот эффект вносит значительную погрешность в результаты измерения электрических параметров КНС. Выделяют две составляющие погрешности измерений [23]. Первая определяется систематическим дрейфом поверхностного потенциала вследствие образования на поверхности КНС естественного окисного слоя, содержащего отрицательный заряд. Окисный слой растет во времени по логарифмическому закону. По такому же закону увеличивается во времени измеряемое удельное сопротивление. Вторая составляющая погрешности измерений связана с флуктуацией величины поверхностного потенциала при изменении внешних атмосферных условий: влажности, давления, температуры, состава газовой среды и т.п. Эта составляющая носит случайный характер и проявляется в виде различных скачков измеряемого параметра в различные моменты времени. Первая составляющая погрешности уменьшается примерно вполупу путем обработки КНС структур в безводной плавиковой кислоте. Снижению флуктуации поверхностного потенциала способствует более длительное охлаждение структур в эпитаксиальном реакторе.

Существенный вклад в ограничение проводимости субмикронных слоев КНС вносят структурные дефекты, вокруг которых образуется область пространственного заряда. На границе кремний-сапфир плотность структурных дефектов составляет  $10^{11}$  см<sup>-2</sup> и проводимость приграничного кремниевого слоя снижается практически до нуля. С увеличением расстояния от границы раздела количество структурных дефектов экспоненциально убывает и на расстоянии 0,5 мкм снижается до  $10^9$  см<sup>-2</sup> (рис.5) [24].

Поскольку существующие зондовые методы измерения электрических параметров эпитаксиальных кремниевых слоев не в состоянии обеспечить достоверную оценку субмикронных КНС структур, их качество контролируется нетрадиционными методами. Наиболее объективным способом является измерение эффективной подвижности *p*- и *n*-канальных транзисторов, сформированных в контролируемых образцах КНС [25]. Аналогичным образом определяется профиль распределения легирующей примеси по глубине тонких слоев [26]. Широко распространен способ оценки структурного совершенства слоев КНС по оптическому поглощению в области 2,0–2,7 эВ, определяемому методом отражательной интерференции [19]. Параметром качества в этом случае является фактор оптического поглощения, характеризующий величину поглощения и наклон кривой поглощения. Чем совершеннее исследуемый образец, тем ниже значение фактора

оптического поглощения (для объемного кремния он равен  $90 \cdot 10^6$  см<sup>-2</sup>). Возможности указанного метода позволяют всесторонне исследовать качество КНС-структур и рекомендовать оптимальные соотношения условий гетероэпитаксии, обеспечивающие понижение фактора оптического поглощения до  $(115-120) \cdot 10^6$  см<sup>-2</sup> (рис. 6) [19]. Результаты оценки качества КНС-структур оптическим методом хорошо согласуются с прямыми измерениями параметров МОП-транзисторов, изготовленных на их основе. При этом подвижность и время жизни носителей заряда хорошо коррелируют с результатами оптических измерений и по последним удается заранее оценить характеристики готового прибора.

Не менее распространенным методом оценки качества тонких слоев КНС является измерение полуширины кривых качания, полученных с помощью рентгеновской дифракции [27]. Уширение дифракционных пиков связывают с наличием в кремниевом слое различных несовершенств (рис. 7). Сопоставление результатов оценки качества по данному методу и по измерению эффективной подвижности показало удовлетворительную сходимость.

Таким образом, нетрадиционные методы контроля дают объективную оценку качества субмикрон-

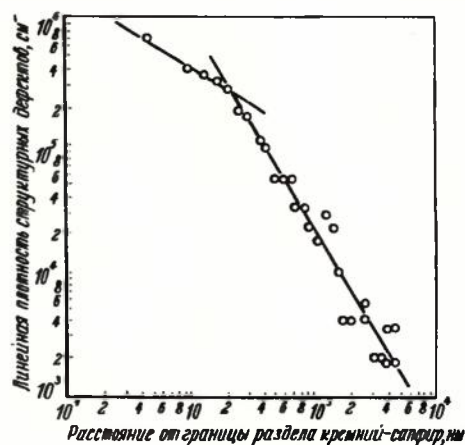


Рис. 5. Распределение плотности структурных дефектов по толщине слоев КНС

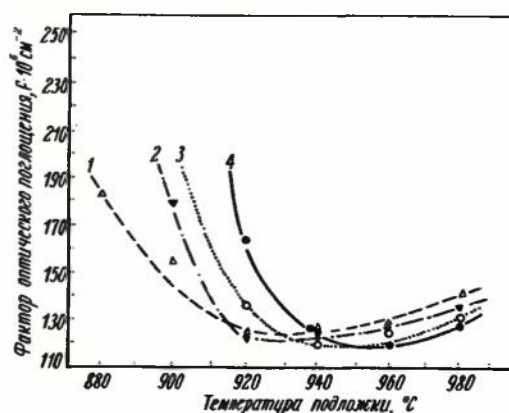


Рис. 6. Зависимость фактора оптического поглощения от температуры подложки при различных скоростях роста (мкм/мин): 1 – 0,2–0,5; 2 – 1,2–1,5; 3 – 2,2–3,2; 4 – 5,3–6,0

ных слоев КНС, но требуют доработки с целью их промышленного применения.

**Перспективы развития КНС технологии.** Дальнейшее развитие производства КНС структур предполагает повышение качественных и экономических показателей всех его переделов, включая выращивание монокристаллов сапфира, получение подложек и осаждение слоев КНС. Несомненно, важная роль здесь принадлежит разработке новых методов осаждения кремния, обеспечивающих возрастающие требования производства микросхем.

Одним из перспективных методов, эффективно используемых в настоящее время в автоэпитаксии, является метод осаждения кремния при пониженном давлении в реакторе. Большой интерес вызывает сообщение о молекулярно-лучевой эпитаксии, в том числе на подложках из сапфира и шпинели [28]. Опытные образцы слоев КНС толщиной 0,5 и 1,0 мкм, выращенные при температуре подложки 650–800°C со скоростью 0,5 нм/с, характеризуются подвижностью носителей заряда, на 25–30% превышающей уровень в структурах, полученных силано-

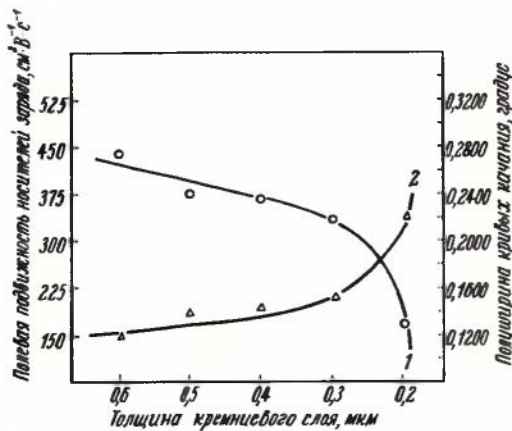


Рис. 7 Зависимость полевой подвижности носителей заряда (1) и полуширины кривых качания рентгеновских дифракционных пиков (2) от толщины кремниевого слоя

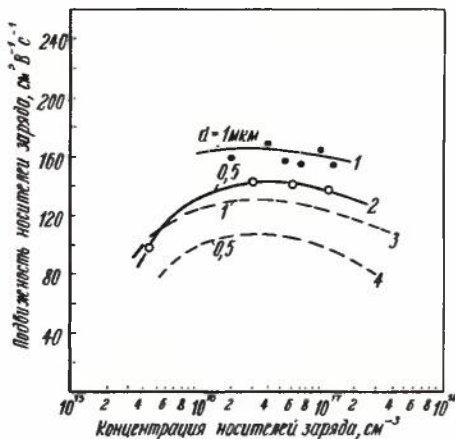


Рис. 8. Зависимость Холловской подвижности носителей заряда от их концентрации для слоев кремния p-типа различной толщины, полученных молекулярно-лучевой (кривые 1 и 2) и газофазной (кривые 3 и 4) эпитаксией

вым методом (рис.8). В данном случае благодаря низкой температуре подложки следует ожидать уменьшения уровня автолегирования и соответствующего повышения термостабильности электрических характеристик слоев КНС.

Весьма обнадеживающие результаты получены с помощью лазерного отжига и рекристаллизации слоев КНС [29]. МОП-транзисторы, сформированные в слоях КНС, подвергнутых лазерному облучению с плотностью энергии 0,8 Дж/см², имели подвижность в канале, на 30% превышающую обычные значения. В результате лазерной обработки с целью активации ионно-имплантированного слоя в КНС достигается низкое сопротивление на затворе и в межсоединениях, снижается до минимума боковая диффузия. Применение импульсной лазерной обработки позволяет контролировать величину внутренних напряжений в слоях КНС, способствуя повышению их качества.

Приведенные выше данные позволяют заключить, что современный уровень разработки КНС-технологии дает возможность разрешить ряд проблем микроэлектроники, позволяет обеспечить в ближайшие годы повышение качества и значительное снижение стоимости КНС-структур. Нет сомнения, что в результате намеченного прогресса КНС-технология станет одним из ведущих направлений в производстве интегральных схем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ базовых технологических процессов микроэлектроники с помощью качественных коэффициентов/А.А.Васенков, О.М.Красовский, Г.П.Милова, В.А.Юдинцев — ЗЭТ, 1978, № 1, с. 3.
2. B o l e k y E. J., M e y e r I. E. High-performance low-power CMOS memories using silicon-on-sapphire technology, IEEE. — Solid State Circuits, 1972, SC-7, N 2, p. 135.
3. E a t o n S. S. Sapphire brings out the best in CMOS. — Electronics, 1975, v. 48, N 12, June 12, p. 115.
4. M a n a s e v i t H. M., S i m p s o n W. J. Single crystal silicon on a sapphire substrate. — J. Appl. Phys., 1964, v. 35, N 4, p. 1349.
5. Блещкан Н.И., Папков В.С., Суруков М.В. Крупногабаритные монокристаллы сапфира для микроэлектроники — Электронная промышленность. 1980 вып 8-9, с.19.
6. M a u r i t s I. E. A. Problems and Solutions in the preparation of SOS Wafers — Solid State Technology, April 1977, p.81.
7. B ü t t n e r D. R., W i n t e r E. Cutting sapphire with annular saw blades. — Industrial Diamond Review, February 1978, p. 10.
8. G ü t c h e H e n r y W., M o o d y J e r r y W. Polishing of sapphire with colloidal silica. — J. Electrochem. Soc.: Solid State Science and Technology, 1978, January, v. 125, N 1, p.136.
9. Z a n z u c c h i P. J. Optical Reflectance method for determining the surface quality of sapphire (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). — J. Electrochem. Soc.: Solid State Science and Technology, 1978, N 2, February, p. 299.
10. Влияние обработки поверхности сапфировой подложки на качество эпитаксиальных слоев кремния/В.С. Папков, А.Ю. Малинин Ю.М. Украинский и др. — Электронная техника, Сер.Материалы, 1970 вып. 4.
11. Применение ионно-плазменного травления для обработки и исследования поверхностных слоев кристаллов/О.Н. Григорьев, В.И.Карвань, А.Ф.Онишко, В.И.Трефинов. ФХОМ, 1979, № 3, с. 30.
12. D r u m i n s k i M., W i e c z o r e c C. L. Epitaxial silicon films on insulator using the system dichloro-silane-hydrogen. — Extended abstract, Spring 1975, — Meeting Electrochem. Soc., p. 366, Toronto, Canada, 1975, May 11–16.
13. M a n a s e v i t H. M. Heteroepitaxial silicon growth using SiH<sub>4</sub> in Helium-Hydrogen Atmospheres. — J. Electrochem. Soc., 1979, v. 126, N 10, p. 1785.
14. Исследование гетероэпитаксис кремния на сапфире из парогазовой смеси SiH<sub>4</sub>-SiCl<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>/В.Д.Чумак, А.А.Кузьмин, В.С. Папков, Б.В.Стрижков — Электронная техника, 1979. вып. 6, с. 51.

15. Папков В.С., Суровиков М.В., Маркова Т.И. Начальная стадия роста и морфология поверхности кремния при гетерозитаксии на сапфире. — Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы, 1971, т. VII, № 9, с. 1481.
16. Schlöfberger H. Interface properties of Si on sapphire and spinel. — J. Vac. Sci. Technol., 1976, v.13, N 1, p.29.
17. Чумак В.Д., Папков В.С., Аммосов Р.М. Изучение свойств тонких слоев кремния на сапфировых подложках. — Электронная техника, 1976, вып. 9, с. 72.
18. Cullen G.W. The preparation and properties of chemically vapor deposited silicon on sapphire and spinel. — J. Cryst. Growth, 1971, v. 9, p. 107.
19. Druminski M. Optimization of the deposition conditions for epitaxial silicon films on Czochralski sapphire in the silane-hydrogen-system. — J. Electrochem. Soc., 1980, v. 127, N 4, p. 957.
20. Cullen G.W., Corbov J.F., Smith R.T. The effect of rapid early growth on the physical and electrical properties of heteroepitaxial silicon. — J. Cryst. Growth, 1975, v.31, p. 274.
21. Получение термостабильных структур КНС для КМОП ИС/ В.Д.Чумак, Н.В.Николаева, А.А.Кузьмин, В.С.Папков. — Электронная техника, 1979, Сер. 6, вып. 6, с. 55.
22. Суровиков М.В., Чумак В.Д., Папков В.С. Влияние условий эпитаксиального роста на качество кремниевых слоев на изолирующих подложках. — Электронная техника. Сер. 6, 1972, вып. 5, с. 66.
23. Контроль параметров тонких эпитаксиальных слоев кремния/В.В.Батавин, Н.В.Жаворонок, Ю.Н.Кузнецов, В.В.Русаков. — Электронная промышленность, 1978, вып. 2, с. 65.
24. Abrahams M.S., Vucoschi C.J. Cross-sectional electron microscopy of silicon-on-sapphire. — Appl. Phys. Lett., 1975, v. 27, N 6, p. 325.
25. Borel I. Caracteristiques actuelles et evolution de la technologie silicium sur isolant "circuits integres", 1978, v. 58, N 12, p. 812.
26. Смотряков А.А., Солдатов В.С., Варлашов И.Б. Методика определения профиля примеси и подвижности носителей тока в полупроводниковых пленках на изолирующих подложках. — Труды МЭИ "Материалы и приборы электронной техники", 1978, вып. 372, с. 7.
27. Weitzel C.E., Smith R.T. Silicon-on-sapphire crystalline perfection and MOS Transistor Mobility. — J. Electrochem. Soc., 1978, v. 125, N 5, p. 792.
28. Bean J.C. Growth of thin silicon films on sapphire and spinel by molecular beam epitaxy. — Appl. Phys. Lett., 1980, v. 36, N 9, 1 May, p. 741.
29. Jaron G., Hess L.D. Application of laser annealing techniques to increase channel mobility in silicon on sapphire transistors, Appl. Phys. Lett., 1980, v. 36, N 3, p. 220.

Статья поступила 24 марта 1980 г.

УДК 621.315.592.2/3.536

В. И. Белоусов, Е. Н. Вигдорович,  
Б. А. Саламатин, В. А. Федоров

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Применение термодинамических методов анализа позволяет эффективно решать проблемы оптимизации технологических процессов получения материалов микроэлектроники.

Переход от дискретной электроники к микроэлектронике выдвигает новые научные проблемы в области современной химии в связи с тем, что

основные технологические операции микроэлектроники, от которых зависят параметры приборов, стабильность интегральных схем, надежность их работы, пока что являются практически целиком химическими. Это — окисление, эпитаксия, осаждение диэлектрика на поверхность полупроводника, травление, фотолитография. Даже диффузия в значительной степени является химическим процессом.

Определяющая роль химических процессов в технологии микроэлектроники обуславливает использование всего арсенала методов химии, в котором немаловажная роль принадлежит химической термодинамике.

В настоящее время трудно себе представить разработку и исследование процессов получения полупроводниковых материалов без термодинамического анализа. Термодинамическое исследование позволяет определять необходимые технологические режимы производства материалов и связанные с ними конструктивные особенности аппаратуры, дает возможность предсказывать некоторые свойства получаемых в реальных условиях материалов и способы управления этими свойствами. Термодинамическое изучение поведения примесей в технологических процессах может привести к улучшению показателей производства, например таких, как выход годных, воспроизводимость, однородность и т.д. В этой связи представляет несомненный интерес рассмотрение на конкретных примерах возможностей и роли термодинамических методов при разработке технологических процессов получения ряда материалов для микроэлектроники.

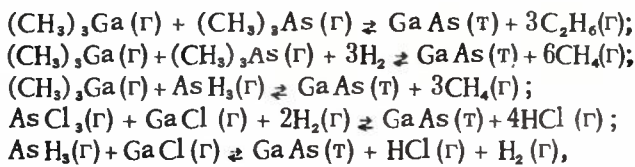
В хорошо известном двухстадийном хлоридном процессе эпитаксии арсенида галлия первой стадией является генерация исходного моноклорида галлия в системе жидкий галлий — твердая прослойка арсенида галлия — парогазовая смесь. Исследование системы, в которой жидкая фаза отделена от газообразной, показало [1], что она является стационарной и существует благодаря протеканию двух конкурирующих процессов: роста слоя арсенида галлия за счет поглощения мышьяка из газовой фазы и травления этого слоя хлористым водородом. Главной особенностью такой системы газ — твердое тело — жидкость является авторегулируемая толщина твердой прослойки. Стационарность процесса позволяет путем термодинамического расчета [2] определить состав парогазовой смеси в рассматриваемой системе. Поскольку необходимо учитывать, что твердая фаза арсенида галлия непрерывно возобновляется и перенос мышьяка из нее отсутствует, в расчете должно быть использовано то парциальное давление мышьяка, которое устанавливается в результате разложения хлорида мышьяка. В табл. 1 приведен расчетный состав газовой фазы у поверхности галлия с корочкой арсенида галлия в зависимости от

соотношения  $P_{H_2} / P_{AsCl_3}$  при  $850^\circ C$ . Из нее видно, что доля хлористого водорода в продуктах взаимодействия уменьшается с разбавлением исходной парогазовой смеси водородом. Однако отношение  $P_{HCl} / P_{GaCl}$  можно сохранить неизменным, если производить дополнительное разбавление смеси после источника галлия, когда взаимодействие смеси нового состава с арсенидом галлия исключено. Термодинамический расчет выходов арсенида галлия (рис. 1) для такого случая показывает, что кристаллизация арсенида галлия смещается в зону более низких, т.е. более оптимальных температур.

Таблица 1  
Состав газовой фазы у поверхности галлия с корочкой арсенида галлия в зависимости от  $P_{H_2} / P_{AsCl_3}$  при  $850^\circ C$

Исходное отношение $P_{H_2} / P_{AsCl_3}$	Парциальное давление, атм $\times 10^3$					$P_{HCl} / P_{GaCl}$
	HCl	As <sub>2</sub>	As <sub>4</sub>	GaCl	GaCl <sub>3</sub>	
100	3,78	2,14	0,87	27,1	$3,6 \cdot 10^{-2}$	0,143
500	0,50	0,34	0,35	5,86	$1,3 \cdot 10^{-4}$	0,085
900	0,24	0,16	0,24	3,09	$6,2 \cdot 10^{-6}$	0,078

Для технологии получения GaAs важно знать протяженность области осаждения арсенида галлия в зависимости от парциальных давлений входящих потоков газообразных галлий- и мышьяксодержащих компонентов. Термодинамическое описание процесса осаждения арсенида галлия из газовой фазы с помощью метода диаграмм парциальных давлений [3] позволило построить диаграммы парциальных давлений для пяти различных процессов осаждения:



и сопоставить величины полей осаждения арсенида галлия. На рис. 2 приведены сечения в координатах логарифмов давления исходных соединений для парциального давления продуктов реакции  $10^3$  Па при взаимодействии  $(CH_3)_3Ga$  с  $(CH_3)_3As$  при  $900^\circ K$  в присутствии водорода, для которого характерна наибольшая площадь поля конденсации чистого арсенида галлия и при взаимодействии GaCl с AsH<sub>3</sub> при  $1000^\circ K$ , для которого эта площадь минимальная.

Наряду с арсенидом галлия широкое применение в микроэлектронике находят твердые растворы на основе соединений  $A^{III}B^V$ . Термодинамический анализ фазового равновесия в системах Ga-Al-As, Ga-As-P, In-As-P и In-Ga-P позволил определить наличие и области метастабильного состояния. Наибольшая область неустойчивости оказалась у системы GaP-InP. Для системы GaAs-GaP, имеющей наибольшее применение, рассчитаны гра-

фики метастабильного состояния, и полученные результаты использованы для планирования и реализации технологических процессов эпитаксиального наращивания [4, 5].

Одним из основных способов легирования эпитаксиальных слоев GaAs, GaP и GaAsP является перенос примеси, например теллура, из легированного галлиевого источника. Анализ поведения теллура в реакционном пространстве может быть проведен на основе данных о фазовом равновесии в системе галлий-теллур. Такие данные имеются для бинарных соединений - GaTe, Ga<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, но в области малых концентраций теллура такие данные практически отсутствуют. Расчет парциального давления теллура в системе галлий-теллур при различных концентрациях последнего, проведенный с использованием термодинамических характеристик для бинарных соединений и приближений теории регулярных растворов, позволяет правильно выбрать исходный легирующий состав системы Ga-Te для получения заданной концентрации носителей в эпитаксиальных слоях.

Технологические процессы получения твердых

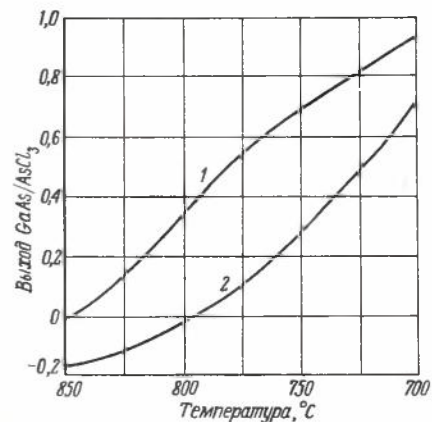


Рис. 1. Выход арсенида галлия в зависимости от температуры газовой смеси (температура источника галлия  $850^\circ C$ ): 1 - без разбавления; 2 - с вторичным разбавлением ПГС позади источника

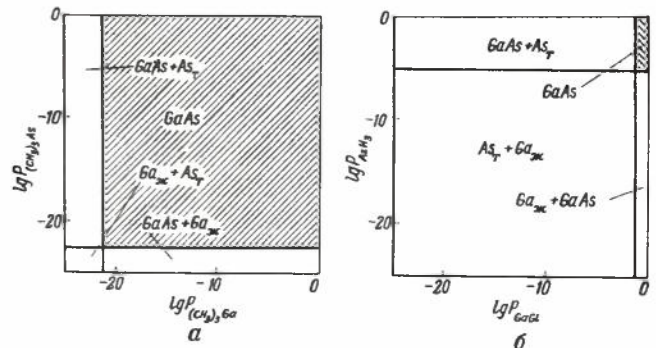
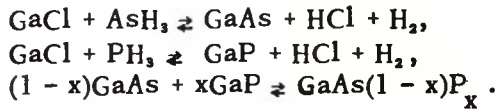
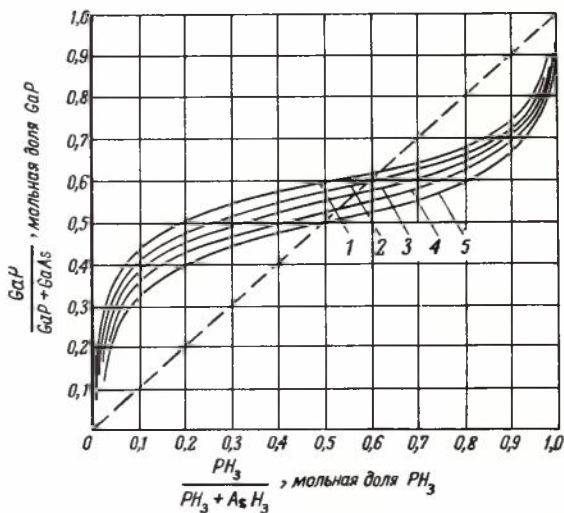


Рис. 2. Диаграмма парциальных давлений компонентов процесса получения GaAs: а - при взаимодействии  $(CH_3)_3Ga$  с  $(CH_3)_3As$  в атмосфере водорода при  $900^\circ K$  ( $lg P_{CH_4} = -2$ ), б - GaCl с AsH<sub>3</sub> при  $1000^\circ K$  ( $lg P_{HCl} = -2$ )

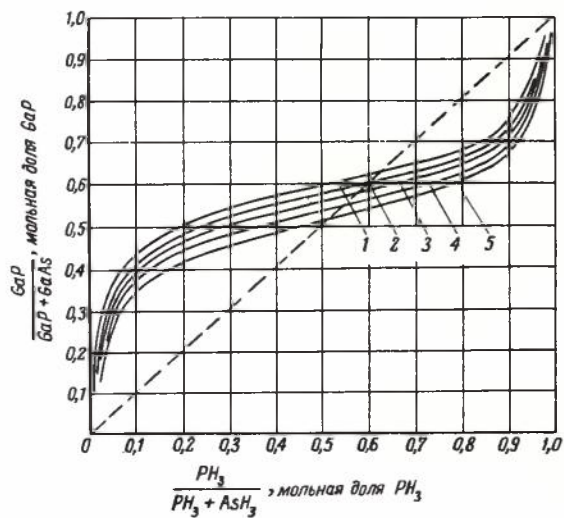
растворов GaAsP можно условно описать следующими химическими реакциями:



На основании общих термодинамических соотношений можно составить ряд уравнений, связывающих концентрации компонентов с константами равновесия реакций. Таким образом расчет выходов и состава твердых растворов сводится к решению системы нелинейных уравнений, количество которых соответствует числу рассматриваемых реакций. В работе [6] на основе справочных термодинамических данных рассчитаны зависимости состава твердых растворов (рис.3, а, б) от основных технологических параметров (температуры, соот-



а



б

Рис.3. Зависимость состава твердого раствора арсенид-фосфид галлия от мольной доли фосфина на входе в реактор: а - при постоянном отношении  $\text{H}_2/\text{GaCl}=510$  моль/моль и  $\text{As} + \text{P}/\text{GaCl} = 3$  моль/моль; б - при постоянном отношении  $\text{H}_2/\text{GaCl} = 170$  моль/моль и  $\text{As} + \text{P}/\text{GaCl} = 3$  моль/моль; 1 -  $T = 670^\circ\text{C}$ ; 2 -  $T = 700^\circ\text{C}$ ; 3 -  $T = 750^\circ\text{C}$ ; 4 -  $T = 800^\circ\text{C}$ ; 5 -  $T = 850^\circ\text{C}$

ношения  $\text{A}^{\text{III}}/\text{B}^{\text{V}}$  и парциальных давлений компонентов) и проведен анализ поведения некоторых примесей в процессе эпитаксии. Например, при легировании слоев GaAsP марганцем можно дополнительно написать еще две реакции:



Зависимость концентрации марганца ( $\text{MnAs} + \text{MnP}$ ) в слоях от соотношения  $\text{A}^{\text{III}}/\text{B}^{\text{V}}$  показывает (рис. 4), что снижение в реакторе парциального давления элемента III группы приводит к увеличению концентрации марганца. Изменение коэффициента распределения марганца между твердой и газовой фазами от  $3 \cdot 10^2$  до  $3 \cdot 10^3$  (рис. 5), определенное на основании термодинамического расчета, полностью подтверждается при экспериментальном исследовании [7].

Термодинамический анализ системы галлий-водород-кислородосодержащая лигатура позволил выбрать  $\text{CO}_2$  в качестве оптимального источника для насыщения раствора-расплава Ga-GaP кислородом при работе в восстановительной среде водорода. Принципиальная новизна и полезность использования для легирования  $\text{CO}_2$  заключается в возможности эффективного легирования фосфида галлия кислородом при температурах  $950^\circ\text{C}$  и ниже, при которых в нем достигается минимальная концентрация безызлучательных центров. Общепринятый способ легирования фосфида галлия кислородом с помощью  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  эффективен лишь при температурах  $950-1000^\circ\text{C}$  и выше.

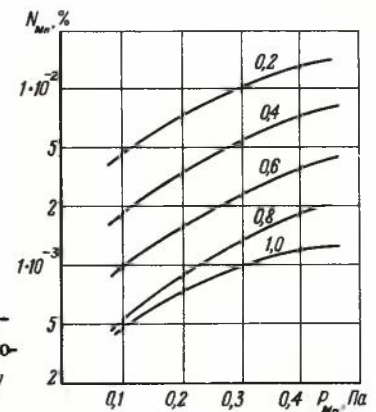


Рис. 4. Зависимость концентрации марганца в слоях от отношения  $\text{A}^{\text{III}}/\text{B}^{\text{V}}$

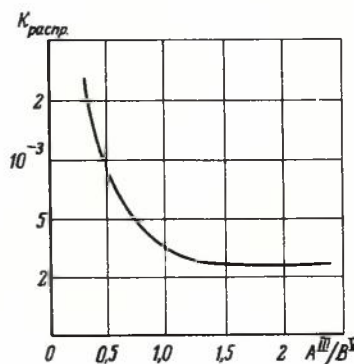


Рис. 5. Зависимость коэффициента распределения марганца от отношения  $\text{A}^{\text{III}}/\text{B}^{\text{V}}$



Из термодинамического анализа Р–Т–Х диаграммы для системы Ga–NH<sub>3</sub>–H<sub>2</sub> определены условия двух способов легирования фосфида галлия азотом. Первый заключается в увеличении парциального давления аммиака по мере снижения температуры эпитаксиального наращивания, а второй предусматривает проведение процесса при повышенном давлении (до 0,7 · 10<sup>5</sup> Па) газовой фазы для увеличения предельной растворимости азота в жидком галлии.

Все это послужило в конечном счете базой для создания унифицированного процесса производства светоизлучающих структур GaP с цветом свечения от красного до зеленого.

При разработке технологии получения соединений A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup> применение термодинамических методов является традиционным для решения следующих задач: определения давлений диссоциации соединений A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup>; расчета констант равновесия химических реакций соединений A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup> с контейнерными материалами (кварцем, графитом, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BN, AlN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO); расчета химических равновесий газотранспортных реакций, применяемых в эпитаксии соединений A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup>; определения состава паровой фазы над кристаллами твердых растворов; расчета диаграмм состояний твердых растворов

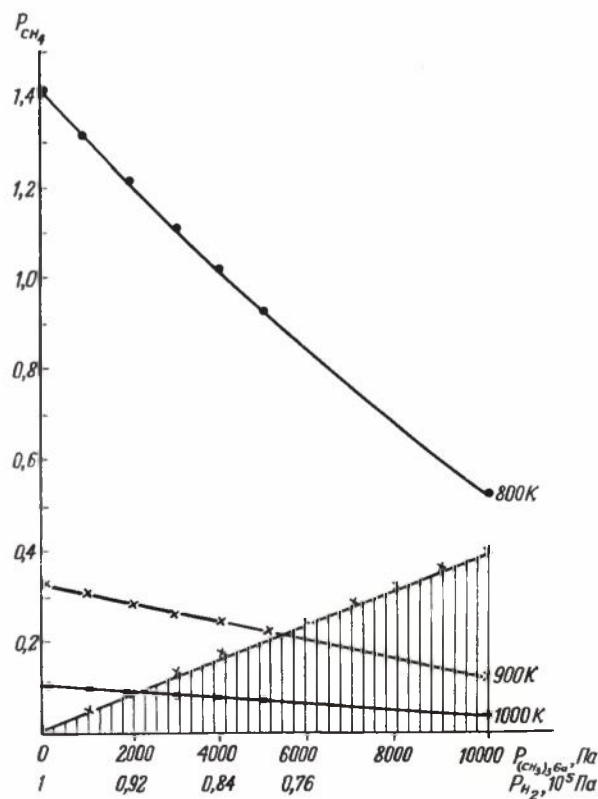


Рис. 6. Зависимость равновесного парциального давления CH<sub>4</sub> от давления триметилгаллия (водорода) в парогазовой смеси при различных температурах (заштрихованная область – термодинамически возможно выделение свободного углерода)

Однако наиболее перспективным направлением применения термодинамики в целях получения объемных монокристаллов и тонких слоев соединений

A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup> с заданными свойствами является, по-видимому, решение задачи управления стехиометрическим составом кристаллов. Если проблема получения кристаллов элементарных полупроводников с заданными свойствами, как правило, сводится к легированию кристаллов инородной примесью, то при получении кристаллов (и пленок) соединений A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup> легирование не дает воспроизводимых результатов вследствие взаимодействия легирующих примесей с собственными атомными точечными дефектами, что приводит к явлению самокомпенсации.

Для получения заданного стехиометрического состава кристаллов соединений A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup> обычно используется термообработка кристаллов. При этом основной проблемой при определении режимов термообработки является отсутствие удовлетворительных данных об энтальпиях и энтропиях собственных точечных дефектов – вакансий и междузельных атомов металла и халькогена, их электронных энергетических уровнях, коэффициентах диффузии, а также энергиях и энтропиях образования ассоциаций дефектов с примесями и друг с другом.

Управление концентрацией собственных атомных дефектов и ассоциаций их с примесями позволяет решить задачи получения фотопроводящих кристаллов CdS и CdSe с максимальной фоточувствительностью и минимальной инерционностью фотопроводимости; получения высокоомных кристаллов CdTe для электрооптических модуляторов лазерного излучения на λ = 10,6 мкм; получения низкоомных кристаллов ZnS и ZnSe для инжекционных светодиодов голубого цвета свечения.

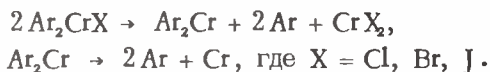
Следует отметить, что использование процесса точного управления концентрацией собственных дефектов и их ассоциаций с примесями является единственным путем решения этих задач [8]. Кроме того, изучение процессов изменения концентраций собственных дефектов и их ассоциаций с примесями при низких температурах (вблизи комнатной) дает ключ к решению проблемы временной и температурной стабильности свойств кристаллов

соединений A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup>. (Например, известно, что у высокочувствительных фотопроводящих кристаллов CdS и CdSe иногда наблюдается потеря фоточувствительности и повышение темнового удельного сопротивления при хранении, а у высокоомных кристаллов CdTe удельное сопротивление иногда снижается на два–четыре порядка).

Для определения режимов термообработки сделаны попытки проведения расчетов с использованием метода квазихимических реакций, но из-за отсутствия надежных исходных данных были получены лишь качественные и полуквантитативные

рекомендации по выбору режимов термообработки. Но даже эти рекомендации в значительной мере облегчили и ускорили экспериментальный поиск и выбор способов управления стехиометрией кристаллов и режимов проведения технологических операций.

В микроэлектронике широко используются МОС для осаждения из паровой фазы металлических, диэлектрических и полупроводниковых пленок и слоев, а также в качестве легирующих компонентов. Указанные процессы основаны на термическом разложении исходных соединений, а выбор оптимальных МОС и оптимальных условий их разложения обуславливается термической устойчивостью используемых органических веществ. Предварительный термодинамический анализ процессов термического разложения МОС позволяет не только проследить зависимость температуры испарения и разложения соединения, общего давления в зоне реакции, состава паровой фазы и других технологических параметров от особенностей состава, внутреннего строения и условий существования веществ, но и определить новые пути их синтеза и использования в полупроводниковой технологии. Например, термодинамический анализ при изучении процесса термораспада бисбензолхромгалогенидов показал, что разложение их наиболее вероятно может протекать в две стадии:



Этот вывод был затем подтвержден методом ДТА и прямым экспериментом с выделением промежуточного нейтрального соединения, что позволило разработать новый способ получения нейтральных производных хрома [9].

Термодинамический анализ протекания процесса синтеза арсенида галлия при взаимодействии  $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$  с  $\text{AsH}_3$  в токе водорода при различных условиях (парциальном давлении триметилгаллия и арсина, температуры, газовой среды, поведения образующихся газообразных продуктов) показал, что термодинамически невозможно разложение метана до углерода в широком интервале температур и парциального давления паров  $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$  в зоне реакции. Так, выделение элементного углерода за счет разложения метана становится термодинамически возможным при 900 К лишь при начальных давлениях  $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$  выше  $60 \cdot 10^2$  Па, а при 1000 К – выше  $25 \cdot 10^2$  Па (рис. 6). Проведение технологических процессов получения арсенида галлия в рекомендованных условиях подтвердило правильность выводов термодинамического анализа. Содержание углерода в пленках арсенида галлия, полученных из МОС, не превышает содержания углерода в арсениде галлия, полученном хлоридным способом (табл. 2). Это дает возможность утверждать, что в определенных условиях МОС не явля-

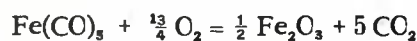
ются источниками дополнительного загрязнения пленок углеродом.

Таблица 2  
Содержание углерода в эпитаксиальных пленках арсенида галлия

Способ получения эпитаксиальных структур	Содержание углерода в GaAs, частей/млн.
$\text{AsCl}_3 + \text{Ga} + \text{H}_2$	100–569
$\text{Ga}(\text{CH}_3)_3 + \text{AsH}_3 + \text{H}_2$	26

Термодинамический анализ успешно был использован также при разработке технологии нанесения железистоокисных покрытий для изготовления фотошаблонных заготовок при разложении пентакарбонила железа в окислительной среде.

При наиболее вероятном протекании процесса окисления



ни добавление инертного газа, ни увеличение температуры до 1000 К, ни изменение давления от  $10$  до  $10^9$  Па не накладывает никаких термодинамических ограничений на протекание реакции до конца. Было также установлено, что окисление  $\text{Fe}(\text{CO})_5$  перекисью водорода или смесью  $\text{O}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}_2$  протекает в энергетически более выгодных условиях, чем при окислении сухим кислородом. Это позволило разработать новый способ получения железистоокисных маскирующих покрытий для фотошаблонных заготовок и внедрить его в производство.

Термодинамические методы эффективно использовались и при разработке технологии синтеза и очистки треххлористого мышьяка [10, 11]. Было показано, что при синтезе  $\text{AsCl}_3$  из элементов практически отсутствует селективное хлорирование примесей, присутствующих в мышьяке и хлоре. Этот вывод подтвержден прямым экспериментом. Анализ поведения широкого ряда органических примесей в треххлористом мышьяке при термообработке указал на возможность разложения многих из них при повышенных температурах, что (после практической проверки) послужило основанием введения в схему очистки стадии термообработки трихлорида мышьяка, полученного гидрохлорированием, предшествующей другим операциям очистки. В то же время термообработку треххлористого мышьяка, синтезированного при пониженных температурах, как оказалось, проводить нецелесообразно. Эти результаты позволили разработать промышленную технологию глубокой очистки треххлористого мышьяка, обеспечивающую получение продукта с суммарным массовым содержанием примесей не более  $10^{-5}$  % [12].

Приведенные примеры убедительно иллюстрируют возможности плодотворного использования термодинамических методов в полупроводниковом материаловедении. Однако термодинамические методы используются все еще недостаточно из-за

ряда серьезных причин. Не всегда термодинамические методы дают разработчику однозначный ответ в выборе того или иного пути исследования, а, с другой стороны, отсутствие термодинамических характеристик веществ и процессов не позволяет получить корректный ответ на поставленные вопросы.

Сейчас уровень технологических разработок в полупроводниковом материаловедении несравненно выше, чем он был лет 10–15 назад, но несмотря на значительные успехи технологии производства полупроводниковых материалов, проблема получения заданных электрофизических параметров и программированное управление технологическими процессами остаются в своей основе нерешенными. До настоящего времени, например, еще не разработана общая теория получения и легирования эпитаксиальных структур кремния, не говоря уже о полупроводниковых соединениях, когда трудности понимания процессов многократно усложняются. Многие технологические процессы до сих пор основаны на эмпирических закономерностях, которые, хотя и дают возможность практической реализации технологии того или иного материала, но далеки от совершенства. Теперь, когда масштабы микроэлектроники непрерывно расширяются, назрела настоятельная необходимость постановки термодинамических исследований, которые, в конечном счете, привели бы к созданию научно обоснованных путей для решения технологических задач получения полупроводниковых материалов с заданными свойствами.

Масштабы использования кремния в микроэлектронике хорошо известны. Казалось бы, об этом материале должна быть самая обширная информация, в частности о термодинамике примесей в нем. Однако до настоящего времени нет надежных данных по растворимости многих примесей в кремнии (табл.3) [13, 14].

Трудно решать задачу оптимизации технологии получения эпитаксиальных структур кремния, когда неизвестны их физико-химические характеристики. Эпитаксиальные слои – это, по сути дела, разбавленные растворы, но их термодинамические свойства не изучены, в частности, неизвестен коэффициент активности. Теоретическое описание процессов легирования, попытка их аппроксимации какой-либо математической моделью неизбежно связаны с использованием физико-химических свойств систем полупроводник – примесь, основной характеристикой которых является коэффициент активности. Их знание позволит количественно описать такие процессы, как автолегирование, испарение, диффузия, газовая эпитаксия и т.п. Если коэффициенты активности в жидкой фазе можно с достаточной точностью оценить на основе теории регулярных растворов, то с твердыми растворами полупроводников задача осложняется: во-первых, из-за отсутствия надежных данных по фазовым равновесиям, во-вторых, в связи с тем, что право-

мерность применения приближения регулярных растворов к твердым полупроводникам в ряде случаев оказывается сомнительной. На примере As дано сравнение результатов расчета с экспериментальными данными (рис. 7) [15]. Из него видно, что если в области предельной растворимости результаты сближаются, то по мере уменьшения концентрации примеси (область разбавленных растворов, к которой принадлежат эпитаксиальные структуры кремния) коэффициент активности зависит от кон-

Таблица 3

Максимальная растворимость легирующих элементов в кремнии [13]

Легирующая примесь	Предельная растворимость, см <sup>3</sup>	Коэффициент распределения	Методы построения солидуса	Примечание
Бор	6 · 10 <sup>-10</sup> (1400°С)	0,8	Диффузия	Требуется уточнения
Алюминий	5 · 10 <sup>-10</sup> 2 · 10 <sup>-10</sup> (1100°С)	0,002–0,004	Металлографические исследования Электрофизические измерения	Требуется уточнения
Галлий	4 · 10 <sup>-10</sup> (1200°С)	0,008	Спектрометрический анализ, диффузия	
Индий	6,7 · 10 <sup>-10</sup>	4 · 10 <sup>-4</sup>	–	Солидус не построен
Фосфор	1,1 · 10 <sup>-10</sup> (1150–1280°С)	0,35	Диффузия, радиоактивные изотопы	Требуется уточнения
Мышьяк	10 <sup>-10</sup> (1100–1200°С)	0,3	Диффузия	Требуется уточнения
Сурьма	6 · 10 <sup>-10</sup> (1300°С)	0,023	Радиоактивные изотопы, электрофизические измерения, спектрофотометрические измерения	
Серебро	2 · 10 <sup>-10</sup> (1350°С)		Диффузия, радиоактивные изотопы	
Олово	6 · 10 <sup>-10</sup> (1220°С)	0,015–0,002	Вытягивание из расплава, метод температурного градиента, спектрофотометрический анализ	
Кислород	10 <sup>-10</sup> (1400°С)	0,5	Инфракрасное поглощение	
Никель	–	–	–	Солидус не построен
Таллий	2–4 · 10 <sup>-10</sup> (1100–1300°С)			Солидус не построен
Бериллий	–	–	–	Солидус не построен
Кобальт	1 · 10 <sup>-10</sup> (1200°С)	8 · 10 <sup>-4</sup>	Диффузия	
Теллур	–	–	–	Солидус не построен
Сера	3,8 · 10 <sup>-10</sup> (1320°С)	10 <sup>-3</sup>	Диффузия	
Свинец	–	–	–	Солидус не построен
Висмут	7 · 10 <sup>-10</sup>	7 · 10 <sup>-4</sup>	Диффузия, исследование емкости р-п перехода	Требуется уточнения
Литий 6	6 · 10 <sup>-10</sup> (1150°С)	1 · 10 <sup>-3</sup>	Диффузия, пламенная спектрометрия	
Марганец	3,5 · 10 <sup>-10</sup> (1320°С)	10 <sup>-3</sup>	Радиоактивные изотопы	Требуется уточнения
Железо	3 · 10 <sup>-10</sup> (1320°С)	6 · 10 <sup>-3</sup>	Вытягивание из расплава, диффузия	
Медь	10 <sup>-10</sup> (1300°С)	4,5 · 10 <sup>-4</sup> 4 · 10 <sup>-4</sup>	Радиоактивные изотопы	Медь находится во внедренном состоянии
Цинк	6 · 10 <sup>-10</sup> (1300°С)	1 · 10 <sup>-3</sup>	Диффузия, радиоактивные изотопы	
Золото	1,2 · 10 <sup>-10</sup> (1300°С)	2,5 · 10 <sup>-3</sup> 3 · 10 <sup>-3</sup>	Диффузия, радиоактивные изотопы	

центрации, и расчеты не согласуются с экспериментом.

Не лучше положение и с другими полупроводниковыми материалами.

Отсутствие термодинамических данных по разбавленным растворам связано с экспериментальными трудностями определения парциальных давлений примесей, с необходимостью использования высокочувствительных методов ( $10^{-5}$ – $10^{-6}$ Па) и реализации измерений в равновесных условиях. Кроме того, при изучении свойств веществ с малым содержанием легирующих примесей, при определении растворимости легирующих компонентов возникают принципиальные трудности методического характера: требуются новые методы приготовления образцов и контроля их состава, развитие новых представлений о свойствах материалов с учетом микросостояний [14].

В заключение следует подчеркнуть, что необходима систематизация термодинамических характеристик полупроводников и других материалов, используемых в электронном материаловедении, развитие экспериментальных и теоретических методов определения термодинамических свойств полупроводников, более широкое использование машинных методов моделирования технологических процессов на основе термодинамических методов с целью прогнозирования оптимальных условий их проведения, необходимы широкие исследования фазовых микродиаграмм и термодинамических свойств твердых разбавленных растворов на основе полупроводников и развитие термодинамики поверхностных состояний полупроводников и дефектов полупроводниковых кристаллов.

Очевидно, что термодинамические исследования должны быть увязаны со специфическими вопросами электроники и ее технологии. Только в этом случае от термодинамических методов исследования можно ожидать максимального эффекта как для практики, так и для теории.

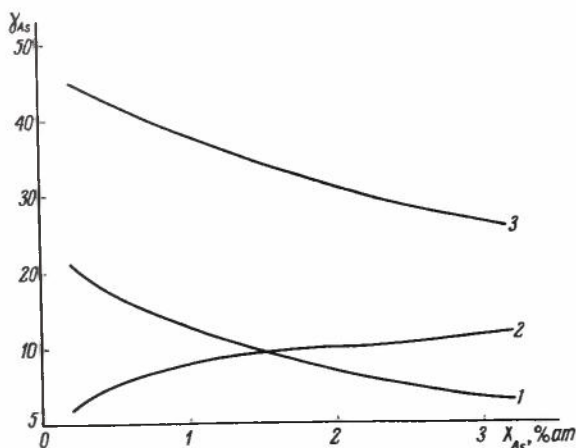


Рис. 7. Коэффициент активности мышьяка в кремнии ( $T = 1282$  К): 1 – эксперимент [15]; 2 – расчет по теории регулярных растворов; 3 – расчет по теории регулярных растворов с учетом ионизации

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В.М., Попов В.П., Рыбаков А.В. Динамическое равновесие в системе газ–твердое–жидкость на примере хлорирования галлия хлоридом мышьяка. *Электронная техника. Сер. Материалы*, 1976, вып. 6, с. 78–81.
2. Андреев В.М., Попов В.П., Рыбаков А.В. Состав газовой фазы при эпитаксиальном наращивании GaAs хлоридным методом. *Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы*, 1975, т. 11, № 3, с. 403–407.
3. Пашилкин А.С., Малкова А.С., Федоров В.А. и др. Термодинамическое описание процесса осаждения из газовой фазы с помощью метода диаграмм парциальных давлений. *Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы*, 1978, т. 14, № 1, с. 13–16.
4. Panish M.B., Ilegems M. *Phase Equilibria in Ternary III–V Systems.* – *Progress in Solid State Chemistry*, 1972, v. 7, p. 39–84, Pergamon Press.
5. Вигдорович Е.Н., Шаповалова Т.П. Исследование фазового равновесия в системе InAs–InP. *Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы*, 1978, т. 14, № 12, с. 2160–2164.
6. Плавич Л.Ф., Попов В.П., Вигдорович Е.Н., Андреев В.М. Термодинамический анализ эпитаксиального наращивания твердых растворов арсенид-фосфид галлия. *Сб. докладов III совещания по исследованию арсенида галлия*, Томск, 1974.
7. Горшков Ю.А., Вигдорович Е.Н., Федоров В.А. Термодинамический анализ системы GaAsP–Mn при осаждении из газовой фазы. *Электронная техника. Сер. Материалы*, 1978, вып. 10, с. 42–46.
8. Крeгер Ф. *Химия несовершенных кристаллов*, М., Мир, 1969, с. 366–420.
9. А.с. 270733. Способ получения нейтральных бисареновых соединений хрома / Б.Г. Грибов, Г.М. Табрина, Н.Н. Травкин и др. *Опубл. в Б.И.*, 1970, № 17.
10. Федоров В.А., Васильев В.И., Филиппов Э.П. и др. О поведении примесей при синтезе треххлористого мышьяка. *Прикладная химия*, 1973, вып. 4, с. 3.
11. Федоров В.А., Лебедева Р.Н., Пашилкин А.С. и др. О поведении примесей органических веществ в процессе термической обработки трихлорида мышьяка. *Прикладная химия*, 1974, № 8, с. 5.
12. *Обзоры по электронной технике: Получение треххлористого мышьяка особой чистоты* / В.А. Федоров, А.А. Ефремов, Э.П. Филиппов, Е.А. Ефремов. – М., 1976. – Вып. 4 (374). *Сер. Материалы*. 60 с.
13. Угай Я.А., Мирошниченко С.Н. Методы исследования диаграмм на основе кремния с малым содержанием легирующих компонентов. *Труды Воронежского ун-та*, 1971, т. 74, с. 54–61.
14. Глазов В.М., Земсков В.С. *Физико-химические основы легирования полупроводников*. М. Наука, 1967, с. 96–198.
15. Белоусов В.И. Расчет коэффициентов активности мышьяка в монокристаллическом кремнии. *Журнал физической химии*, 1979, т. 53, № 9, с. 2218–2220.

Статья поступила 3 апреля 1980 г.

УДК 620.193.2

Л.Г. Белоусова, М.Ф. Вальская, С.С. Веселова

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Использование комплексного метода ускоренных испытаний, воспроизводящего воздействие коррозионно-климатических факторов условий эксплуатации и хранения материалов и изделий электронной техники, позволяет прогнозировать их коррозионную стойкость.

Одним из путей повышения коррозионной стойкости изделий является создание совершенных

научно обоснованных методов ускоренных испытаний, в частности методов, позволяющих прогнозировать коррозионную стойкость конструкционных металлических материалов, покрытий и изделий электронной техники при длительном хранении в конкретном климатическом районе в течение заданного времени. Прогнозирование коррозионной стойкости позволяет осуществлять выбор и создание эффективных средств и методов защиты от коррозии (систем упаковки, ингибиторов коррозии и т.п.), принимать обоснованные решения по выбору конструкционных материалов и конструктивно-технологическому исполнению изделий.

Эффективность прогнозирования всецело зависит от того, насколько ускоренные испытания воспроизводят механизм коррозионных разрушений, имеющих место в реальных условиях хранения и эксплуатации изделий.

Основным испытанием на коррозионную стойкость является испытание на воздействие соляного тумана. Как показало изучение международной и отечественной научно-технической документации, имеются две категории этого испытания, отличающиеся механизмом коррозионного разрушения и целевым назначением.

Согласно большинству зарубежных стандартов (США, ФРГ, Франции) и МЭК [1] испытание на воздействие соляного тумана, предназначенное для сравнительной оценки качества металлических материалов и сплошности покрытий, предусматривает его непрерывное воздействие в течение всего времени испытания при температуре 35°C, что не соответствует механизму коррозионных процессов, протекающих в естественной атмосфере.

Метод британского стандарта [2] и его вариант [3], имеющие целью определение пригодности изделий к эксплуатации и хранению в условиях морского климата, предполагают последовательное воздействие соляного тумана в течение 2 ч (при температуре 20°C) и влажного тепла (35°C, относительная влажность 90–95%) в течение 22 ч или 7 суток. Экспериментальная проверка этого метода показала, что он обеспечивает лучшую воспроизводимость естественных процессов, чем названная выше методика, но все же не учитывает всего комплекса реально воздействующих факторов, в частности процессов высыхания и нарастания пленок электролита и наличия в атмосфере сернистых загрязнений.

Отечественный стандарт на испытания по воздействию соляного тумана [4] предусматривает его периодическую подачу. Однако в условиях закрытой камеры и при отсутствии перепадов температуры

пленки электролита на корродирующей поверхности практически не обновляются, вследствие чего этот метод по механизму и коррозионной агрессивности на 70–80% совпадает с методом непрерывной подачи тумана.

Сопоставление результатов многолетних испытаний материалов и ИЭТ на натуральных климатических испытательных станциях и результатов испытаний по указанному стандарту показало, что в естественных условиях появляются отказы, не наблюдаемые при камерных испытаниях, и, наоборот, при камерных испытаниях изделия бракуются по показателям, которые не являются критичными при натуральных испытаниях. Так, при камерных испытаниях большинства систем с катодными покрытиями коррозии подвергается преимущественно основной металл (отдельные очаги, возникающие по месту пор в покрытии). Сами покрытия (серебряные, хромовые, никелевые) при этом корродируют незначительно или не корродируют совсем. В натуральных условиях покрытия подвергаются значительному коррозионному разрушению, которое, как правило, предшествует разрушению основы (табл. 1). При этом роль исходной пористости покрытий в возникновении очагов коррозии основного материала заметно снижается. Или, например, образующиеся в естественных условиях сплошные (толщиной несколько микрон) пленки продуктов коррозии на контактных поверхностях надежно предохраняют контакт от коррозионного разрушения, но нарушают нормальное контактирование, тогда как при камерных испытаниях коррозия, сопровождающаяся большой потерей массы корродирующего металла и образованием толстого слоя солеобразных продуктов коррозии, обладающих хорошей электропроводностью, не препятствует контактированию вплоть до полного разрушения конструкции.

Таблица 1

Результаты испытаний материалов на коррозионную стойкость в натуральных условиях (районы А и Б) и в модельном режиме

Условия и продолжительность испытаний	Отношение показателей коррозии покрытия и основного металла для различных материалов		
	Латунь Л-62, Н6	Медь ММ1, 012	Ковар 29НК, Н20
Район А, 1 год Модельный режим А, 2 цикла	3,3	3,9	2,8
Район Б, 1 год Модельный режим, Б 1 цикл	3,4	3,6	3,2
ГОСТ 16962–71, исп. 215	2,2	3,0	2,1
	3,2	5,4	2,0
	0,6	0,2	0,5

Сложность прогнозирования коррозионной стойкости ИЭТ усугубляется тем, что степень корро-

зионного разрушения, выраженная посредством потери массы, и ухудшение функциональных свойств изделия не всегда прямо коррелируют между собой. Масса прокорродировавшего металла также не может быть критерием оценки деградации изделий. В данном случае наиболее важен качественный характер коррозионного воздействия.

Основными факторами, обуславливающими принципиальное расхождение результатов действующих ускоренных и натуральных испытаний, являются:

- наличие при камерных испытаниях на корродирующей поверхности постоянной пленки электролита толщиной до 100 мкм, что приближает камерный процесс по механизму к процессу при погружении в электролит [5]. При атмосферной коррозии пленка электролита на поверхности металла в большинстве случаев не превышает 40 мкм и не препятствует свободному доступу кислорода, который является основным участником коррозионного процесса;

- монотонность режимов камерных испытаний, исключая комплексное воздействие переменных коррозионных нагрузок и перепадов температуры и влажности окружающей среды. Перепады температур, особенно от положительных к отрицательным, имеют большое значение при испытаниях ИЭТ, характеризующихся сложным конструктивным исполнением, применением разнообразных конструкционных материалов, большим количеством соединений (паяных и сварных) разнородных материалов, которые являются одновременно и наиболее ответственными за работоспособность изделия и наиболее уязвимыми с точки зрения коррозионного разрушения. Различие коэффициентов расширения разнородных материалов (металлы, стекло, пластмассы и т.д.) приводит к внутренним напряжениям, неизбежно ведущим к усилению коррозии по месту спаев и (в совокупности с другими факторами) к разрушению конструкции изделий. Важно также и воздействие сухого тепла, т.е. периодов с относительной влажностью  $\phi < 70\%$  при положительных температурах, так как этот фактор ответственен за качественные показатели коррозии (защитные свойства, электропроводность, адгезию покрытий к основе) и за механизмы старения коррозионного объекта;

- присутствие в реальной атмосфере (практически во всех климатических районах) сернистого газа, который благодаря высокой коррозионной активности, а также хорошей растворимости в пленках влаги оказывает существенное влияние на скорость и характер коррозионного разрушения даже при незначительной концентрации (не более  $0.02 \text{ мг/м}^3$ ) [6].

В настоящее время при разработке документов, в которых классифицируется коррозионная агрессивность атмосферы, учитывается весь комплекс климатических и коррозионно-агрессивных факторов, в том числе и содержание сернистого газа в атмосфере [7].

С целью максимального приближения механизмов коррозионных процессов в камерных модельных условиях к натурным предлагается комплексный испытательный цикл. Он отражает воздействие коррозионно-климатических факторов реальных (моделируемых) условий и включает в себя следующие этапы:

- воздействие коррозионно-активных факторов;
- воздействие сухого тепла, соответствующее периодам с относительной влажностью  $\phi < 70\%$  при положительных температурах;
- воздействие влажного тепла, соответствующее периодам с  $\phi > 70\%$  при положительных температурах;
- воздействие холода, соответствующее периодам с температурой ниже  $0^\circ\text{C}$ .

Общую продолжительность испытательного цикла целесообразно выбирать эквивалентной испытаниям в реальных условиях в течение 0,5–1 года. При этом, чем более частыми и глубокими изменениями коррозионно-климатических факторов характеризуются моделируемые условия, тем больше скорость коррозионных, механических и других процессов деградации, тем более коротким должен быть испытательный цикл. Оптимальная продолжительность цикла от 2 до 10 дней.

Относительная продолжительность отдельных этапов цикла устанавливается пропорционально суммарной продолжительности воздействия соответствующего фактора в реальных условиях за моделируемый период (год, полгода).

Ускорение процессов коррозии при камерных испытаниях достигается за счет интенсификации реально воздействующих коррозионно-климатических факторов в пределах, исключая изменение механизма процесса [8]. Предельно допустимый уровень воздействующих факторов при ускоренных испытаниях устанавливается исходя из их уровня в моделируемых условиях и корректируется экспериментально на основе сопоставления качественных и количественных характеристик коррозионных процессов.

Воздействие коррозионно-активных факторов отражает влияние коррозионно-активных загрязнений моделируемых климатических условий на характер и скорость коррозионного разрушения. При этом должно быть учтено присутствие в атмосфере солей, в том числе морских солей в виде

аэрозолей (соляной туман) и сернистого газа. Солевые загрязнения сложного состава могут быть представлены эквивалентным количеством хлористого натрия. Сернистый газ вводится в состав испытательной атмосферы одновременно с соляным туманом путем добавления к раствору хлористого натрия сернистокислого натрия.

Концентрация хлористого натрия, равная  $33 \pm 3$  г/л, соответствует среднему содержанию солей в морской воде и рекомендуется в документах МЭК, СЭВ и некоторых зарубежных

стандартах для создания соляного тумана. При концентрации сернистокислого натрия от 1 до 10 г/л и поддержания рН расплываемого раствора в пределах 6,8–7,2 содержание газообразной двуокиси серы в испытательном объеме составляет от 0,1 до 40 мг/м<sup>3</sup>.

При воздействии сухого тепла температура повышается до 50–55 °С. При воздействии влажного тепла относительная влажность составляет 90–95%, температура достигает 40 °С [8].

В качестве конкретного примера предлагаются камерные модели климатических условий районов А и Б (табл. 2, 3), заметно отличающихся по коррозионно-климатическим характеристикам, что обуславливает различие в степени коррозионных разрушений в 1,5–3 раза.

Приемлемость модельных режимов в сравнении с натурными испытаниями устанавливалась по внешнему виду корродирующей системы, химическому и фазовому составу продуктов коррозии, их гигроскопичности, плотности и прочности сцепления с корродирующей поверхностью, функциональным свойствам поверхности (паяемость, переходное сопротивление) и изменению рабочих параметров ИЭТ.

Для оценки коррозионных разрушений может быть также использован ГОСТ 9.076–77, согласно которому принимаются во внимание не только величина, но и характер и виды коррозионного разрушения, определяемые фазовым химическим составом структурой продуктов коррозии.

Сопоставив результаты натуральных и камерных модельных испытаний (табл. 4) дает возможность заключить, что предлагаемая методика в удовлетворительной степени отражает коррозионное поведение металлов, сплавов, покрытий ИЭТ в реальных условиях и может быть использована для прогнозирования их коррозионной стойкости при длительной эксплуатации или хранения.

Таблица 2

Камерная модель коррозионно-климатических условий района А

Коррозионно-климатические параметры атмосферы	Время испытаний, %	Этапы модельного испытательного цикла	Время испытаний			
			ч	%		
Средний уровень загрязненности: хлориды – 2,1 г/м <sup>3</sup> ·год; сернистый газ – 880 мг/м <sup>3</sup> ·год  $\phi < 70\%$ $t_{\min} = 0^\circ\text{C}; t_{\text{сред}} = 19^\circ\text{C};$ $t_{\max} = 35^\circ\text{C}$	32	Воздействие коррозионно-агрессивных факторов: хлоридов – $1,8 \pm 0,2$ г/м <sup>3</sup> ·цикл; сернистого газа – $950 \pm 50$ мг/м <sup>3</sup> ·цикл	2			
		Воздействие сухого тепла ( $\phi < 50\%$ ; $t = 45 \pm 2^\circ\text{C}$ )			29	31
		Воздействие влажного тепла ( $\phi = 90 \pm 95\%$ ; $t = 35 \pm 2^\circ\text{C}$ )			53	58
$\phi \geq 70\%$ $t_{\min} = 0^\circ\text{C}; t_{\text{сред}} = 14,5^\circ\text{C};$ $t_{\max} = 30^\circ\text{C}$	58					
$t_{\min} = -20^\circ\text{C}; t_{\text{сред}} = -6,6^\circ\text{C};$ $t_{\max} = 0^\circ\text{C}$	10	Воздействие холода ( $\phi$ не контролируется; $t = -40 \pm 2^\circ\text{C}$ )	10	11		
		Выдержка в нормальных атмосферных условиях	2			

Примечание: 1 цикл ускоренных испытаний эквивалентен испытаниям в натуральных условиях в течение 0,5 года.

Таблица 3

Камерная модель коррозионно-климатических условий района Б

Коррозионно-климатические параметры атмосферы	Время испытаний, %	Этапы модельного испытательного цикла	Время испытаний			
			ч	%		
Средний уровень загрязненности: хлориды – 0,3 г/м <sup>3</sup> ·год; сернистый газ – 660 мг/м <sup>3</sup> ·год  $\phi < 70\%$ $t_{\min} = 0^\circ\text{C}; t_{\text{сред}} = 32,7^\circ\text{C};$ $t_{\max} = 40^\circ\text{C}$	23,5	Воздействие коррозионно-агрессивных факторов: хлоридов – $1,8 \pm 0,2$ г/м <sup>3</sup> ·цикл; сернистого газа $350 \pm 50$ мг/м <sup>3</sup> ·цикл	2			
		Воздействие сухого тепла ( $\phi < 50\%$ ; $t = 55 \pm 2^\circ\text{C}$ )			36	22
		Воздействие влажного тепла ( $\phi = 90 \pm 95\%$ ; $t = 40 \pm 2^\circ\text{C}$ )			116	71
$\phi \geq 70\%$ $t_{\min} = 0^\circ\text{C}; t_{\text{сред}} = 17,5^\circ\text{C};$ $t_{\max} = 35^\circ\text{C}$	76,3					
$t_{\min} = -5^\circ\text{C}; t_{\text{сред}} = -1,3^\circ\text{C};$ $t_{\max} = 0^\circ\text{C}$	0,2	Воздействие холода ( $\phi$ не контролируется; $t = -20 \pm 2^\circ\text{C}$ )	12	7		
		Выдержка в нормальных атмосферных условиях	2			

Примечание: 1 цикл ускоренных испытаний эквивалентен 1 году испытаний в натуральных условиях.

Таблица 4

Отношение средних значений коррозионной стойкости, рабочих параметров ИЭТ и коэффициента эффективности упаковки, полученных в натуральных условиях, к соответствующим значениям в камерных модельных установках

Объект испытаний	Коррозионная стойкость		Рабочие параметры		Эффективность упаковки			
	А	Б	А	Б	полиэтилен в картоне		картон	
					А	Б	А	Б
Модуляторные лампы средней мощности	–	0,9	–	1	–	0,8	–	1,1
Приемно-усилительные лампы	1,1	1,2	–	–	–	–	0,9	0,9
Резисторы постоянные, непроволочные	0,8	1,3	1	1	–	–	–	–
Коммутационные изделия	0,9	0,7	–	–	–	–	1,1	1,1
Конденсаторы электролитные	1,1	1,2	0,9	0,9	–	–	–	–

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендация МЭК. Публикация 68-2-11, 1966.
2. Испытание на соляной туман. Британский стандарт BS2011.
3. Документ ИСО/ТК-20/ПК5 (Великобритания-26) № 82.
4. ГОСТ 16962-71 исп. 215.
5. Беруштитс Г.К., Кларк Г.Б. Коррозионная устойчивость металлов и механических покрытий в атмосферных условиях. — М., 1971.
6. Розенфельд И.Л. Атмосферная коррозия металлов—М.: Изд-во АН СССР, 1960.
7. Коррозия металлов. Коррозионная агрессивность атмосферы. Классификация. Стандарт СЭВ. СТ СЭВ 991-78.
8. Розенфельд И.Л., Жигалова К.А. Ускоренные методы коррозионных испытаний металлов. — М., 1966.

Статья поступила 21 апреля 1980 г.

УДК 621.3.049.77.002:[621.315.5:001.18]

В.И. Иванов, Н.Ф. Терехин, Г.В. Туев

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБНОСТИ МАТЕРИАЛОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Предлагаемая методика прогнозирования норм расхода материалов при изготовлении интегральных микросхем основана на экспоненциальном характере изменения средневзвешенных технико-экономических показателей во времени.

Себестоимость изделий электронной техники в значительной мере определяется стоимостью используемых материалов. Высокие темпы обновления номенклатуры, частое внедрение новых прогрессивных технологических приемов, применение более высококачественных материалов, быстрая сменяемость технологического оборудования приводят к скачкообразному изменению норм расхода материалов. Поэтому традиционные методы расчета потребности материалов для каждого изделия, основанные на планировании норм расхода от достигнутого уровня, не обеспечивают необходимой точности в электронной промышленности.

К числу важнейших технико-экономических показателей, оказывающих наибольшее влияние на расход материалов, относятся выход годных и степень интеграции микросхем. Для конкретных изделий характер изменения показателей под действием вышеперечисленных факторов научно-технического прогресса нельзя предсказать. Однако, благодаря действию закона больших чисел, средневзвешенные показатели для целого ряда микросхем, изготавливаемых с применением общих технологических приемов, обнаруживают тенденцию к экспоненциальному изменению во времени. К их числу относятся, например, биполярные микросхемы с изоляцией  $p-n$  переходом,

микросхемы с диэлектрической изоляцией элементов, МОП-интегральные микросхемы, ЗУ на ЦМД и т.д. Можно применить и другую классификацию, при этом необходимо, чтобы каждый класс содержал достаточное число типов микросхем.

Определим понятие средневзвешенного показателя для данного класса микросхем за анализируемый период времени (лучше всего за один год):

$$A_t = \frac{\sum_{i=1}^i A_{i,t} V_{i,t}}{\sum_{i=1}^i V_{i,t}},$$

где  $A_{i,t}$  — значение параметра для  $i$ -й микросхемы в анализируемый период времени  $t$ :

$V_{i,t}$  — объем производства  $i$ -й микросхемы за тот же период.

Получение ретроспективного ряда средневзвешенных показателей основывается на обсчете реальных показателей, достигнутых за данный период времени.

Средневзвешенная степень интеграции конкретного класса микросхем за период времени  $t$

$$N_t = \frac{\sum_{i=1}^i N_{i,t} V_{i,t}}{\sum_{i=1}^i V_{i,t}}.$$

Известно, что степень интеграции растет за счет двух факторов: повышения плотности элементов на кристалле при уменьшении их геометрических размеров и увеличения площади кристалла микросхемы. Для конкретной микросхемы действие этих факторов нельзя предсказать. Однако на средневзвешенные параметры, найденные для всех микросхем данного класса, оба фактора будут действовать в одинаковой степени и можно предположить, что площадь кристалла и степень интеграции связаны квадратичной зависимостью:

$$S_t / S_0 = \sqrt{N_t} / \sqrt{N_0},$$

где индексами "t" и "0" обозначены средневзвешенные величины за разные периоды времени.

Эта взаимосвязь учитывает не только рост степени интеграции микросхем, но и увеличение доли этих микросхем в общем объеме производства данного класса микросхем.

Введем понятие условной площади кристалла:

$$\sigma = S_0 / \sqrt{N_0} = S_t / \sqrt{N_t}$$

Величина  $\sigma$ , рассчитанная для годных микросхем каждого класса, остается постоянной в течение достаточно длительного периода времени и может быть использована для прогнозирования потребности в материалах.



Для оценки изменения выхода годных микросхем введем понятие относительного брака, как отношение числа бракованных микросхем к числу годных:

$$\theta_i = (1 - \eta_i) / \eta_i,$$

где  $\eta_i$  — выход годных в относительных единицах для конкретной микросхемы.

К относительному браку также может быть применено понятие средневзвешенной величины.

Средневзвешенное значение относительного брака для всего класса микросхем должно уменьшаться с течением времени по экспоненциальному закону вследствие того, что факторы научно-технического прогресса по разному действуют на различных технологических участках, совершенствование технологии при малом браке требует больших затрат времени:

$$\theta_t = \theta_0 e^{-\alpha t}$$

Параметры экспоненты могут быть определены на основании анализа ретроспективных показателей о производстве микросхем данного класса. Одновременно определяется период времени, в течение которого соблюдается экспоненциальная зависимость снижения относительного брака, и, следовательно, период возможного прогнозирования расхода материалов. Средневзвешенное значение выхода годных данного класса микросхем может быть найдено из спрогнозированного относительного брака.

Введем теперь понятие расчетной площади кристалла на прогнозируемый период времени, учитывающее увеличение расхода материалов за счет появления брака:

$$\sigma_t = \sigma / \eta_t; \quad \sigma_0 = \sigma / \eta_0.$$

Норма расхода материалов, приходящаяся на расчетную площадь кристалла, должна оставаться постоянной на прогнозируемый период, составляющий от одной пятой до одной трети того периода ретроспективного анализа, за который сохраняется экспоненциальная зависимость изменения относительного брака:

$$A_0 / \sigma_0 = A_t / \sigma_t = a = \text{const},$$

где  $A_0$  — норма расхода материала за ретроспективный период;  $a$  — условная норма расхода материала.

Условная норма расхода материала определяется за ретроспективный период и используется для расчета прогнозируемых норм расхода материала  $A_t = a \sigma / \eta_t$  по найденным значениям  $a$  и  $\sigma$  и спрогнозированному средневзвешенному значению выхода годных данного класса микросхем. Потребность в материалах определяется как произведение найденных норм расхода на потребность в микросхемах данного класса.

Статья поступила 2 апреля 1980 г.

## РЕКЛАМА · ЭП · РЕКЛАМА

КДК 621.378.301.1

### ОДНОЧАСТОТНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ ЛГ-77 и ЛГ-149-1

Предназначены для использования в качестве источника когерентного излучения в интерферометрических измерительных устройствах в точном машиностроении (для линейной калибровки металлорежущих станков, контроля качества нарезки, штриховых мер, контроля ходовых винтов) и в микроэлектронике (при производстве и контроле оборудования для изготовления интегральных микросхем), а также для решения широкого круга научно-технических задач, связанных с измерением деформаций, скоростей, ускорений, расшифровкой фотোগрафий и др.

В конструкцию гелий-неоновых лазеров входят излучатель и источник питания. Излучатель содержит активный элемент, зеркала оптического резонатора, а также фотоприемник и предусилитель системы стабилизации частоты излучения. Система стабилизации частоты обеспечивает «привязку» частоты к воспроизводимой с высокой точностью реперной точке (в ЛГ-77 — это центр провала Лэмба, а в ЛГ-149-1 — центр контура поглощения неоновой ячейки).

В источнике питания удачно совмещены схема возбуждения разряда в активном элементе, система стабилизации частоты излучения и сигнальные цепи с индикацией отказов, позволяющие быстро определять работоспособность прибора.

ЛГ-77 обеспечивает особо прецизионные измерения благодаря низкой мощности теплового рассеяния и возможности удаления (до 10 м) от источника питания. Характеризуется малыми габаритами и малым временем готовности к работе. ЛГ-149-1, обладающий узкой технической шириной линии и достаточно высокой мощностью излучения, незаменим при измерениях расстояний с большой базой, а также при одновременных измерениях по нескольким координатам. Прибору присвоен государственный Знак качества.

Технические характеристики

	ЛГ-77	ЛГ-149-1
Длина волны излучения, мкм	0,63	0,63
Мощность излучения, мВт	0,26	0,5
Относительная нестабильность частоты излучения за 8 ч непрерывной работы	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$
Средний расход, ч	4000	8000
Напряжение источника питания, В	220 ± 10%	(50 Гц)
Габариты, мм		
излучателя лазера	300x95x126	370x160x120
источника питания	480x380x120	480x380x120
Масса, кг		
излучателя лазера	≤ 5	≤ 10
источника питания	≤ 12	≤ 12

Заказ и приобретение направлять в магистральные салоны "Электроника" по адресу: 196221, г. Ленинград, проспект Гагарина, 12; 394030, г. Воронеж, ул. Кольцовская, 46.

Г. П. БОРИСОВСКИЙ, Е. Г. ЧУЛЫБЕВА, Ю. М. ЯКОВЛЕВ

УДК 621.316.543-181.48

И. С. Болгов, Ю. Л. Бормотов, А. Т. Бурков,  
Л. Е. Гришмановский, А. Д. Орлов, В. С. Хозиков

## ПРИМЕНЕНИЕ БИМЕТАЛЛОВ С ПОЛОСЧАТЫМИ ПОКРЫТИЯМИ В ПРОИЗВОДСТВЕ МИКРОПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Применение биметаллической ленты на основе меди с полосчатым плакированием серебром позволяет автоматизировать сборку унифицированных микропереключателей, повысить их качество и сэкономить значительное количество серебра.

Микропереключатели, выпускаемые промышленностью и предназначенные для использования в современной радиоэлектронной аппаратуре, обеспечивают коммутацию токов от  $1 \cdot 10^{-6}$  до 8 А при напряжении от  $1 \cdot 10^{-4}$  до 250 В. Износоустойчивость таких микропереключателей составляет от  $10^4$  до  $10^6$  циклов переключений.

Большое значение для надежной работы микропереключателей имеет выбор материала контактов и контактодержателей. Материалы контактов должны обладать хорошей тепло- и электропроводностью, иметь высокую температуру плавления, обладать высокой коррозионной стойкостью, хорошей пластичностью, стойкостью против потускнения и образования пленок. Хотя контактодержатели не подвергаются отрицательному воздействию электрической дуги при коммутации, к ним также предъявляются высокие требования по тепло-, электропроводности и по пластичности [1, 2].

Анализ материалов, используемых в настоящее время в микропереключателях, показывает, что для изготовления контактов применяется широкая номенклатура металлов и сплавов, преимущественно на основе драгоценных металлов, что ведет к удорожанию контактов. Причем, часть из этих материалов не всегда обеспечивает необходимую стабильность электросопротивления контактов.

Конструкция некоторых типов микропереключателей (МП9, ПМ15) предусматривает использование сварных контактов, что требует покрытия контактодержателей серебром толщиной 5–7 мкм. Расход серебра еще более повышается в результате операций зачистки, калибровки контактов и повторного нанесения серебряного слоя. Кроме того, сварка приводит к переносу материала электрода на контакт, что ухудшает переходное сопротивление

при коммутации, и уменьшению срока службы изделия.

Изготовление контактов и выводов целиком из драгоценных металлов (как, например, в микропереключателях типа МП12 и ПМ19, определяемое конструктивными характеристиками изделий) приводит к нерациональному использованию серебра и его сплавов, так как толщина металла на контакте (0,4–0,7 мм) необходима лишь для сохранения его формоустойчивости при периодическом длительном замыкании и размыкании цепи.

Использование вместо сварки операции клепки, когда значительная часть металла заклепки (до 50%) расходуется для обеспечения надежного соединения контактного элемента с контактодержателем, также нерационально.

Все это заставляет искать более экономичные материалы и конструкции, обеспечивающие высокую надежность работы микропереключателей.

Одним из наиболее эффективных направлений в этом отношении является применение биметаллических материалов со сплошным или полосчатым плакированием контактируемых поверхностей драгоценными металлами или сплавами, что обуславливает снижение расхода этих металлов на 90% [3]. Толщина полосчатого покрытия драгоценным металлом для обеспечения надежной работы микропереключателей должна составлять 0,15–0,25 мм, т. е. до 30–50% от общей толщины биметалла.

Существующая технология производства биметаллов, которая заключается во фрезеровании пазов на материале подложки, сборке пакета и чередовании холодной прокатки с промежуточными отжигами, довольно трудоемка. При этом, поскольку длина исходного пакета из-за условий фрезерования не может превышать 200–250 см, конечная максимальная длина биметаллической ленты составляет 3–3,5 м, что явно недостаточно для механизации и автоматизации процесса производства контактов для микропереключателей. Кроме того, наличие вертикальной границы в сечении материала покрытия ухудшает качество сцепления компонентов, что при штамповке ленты может привести к расслоению биметалла.

Избежать указанных недостатков позволяет технология изготовления многослойного материала с односторонним двухрядным плакированием (30–35% от толщины биметалла). Применяемый при этом способ холодного плакирования характеризуется низкой трудоемкостью и дает возможность изготавливать рулонный материал (длина рулона в стадии поставки не менее 10 м) удобный для процесса автоматизации производства контактов микропереключателей.

В качестве материала основы применяется бес-

кислородная медь марки МОб, свойства которой наиболее полно отвечают требованиям, предъявляемым к контактодержателям. Теплопроводность меди в 4 раза выше теплопроводности латуни Л68 [4], наиболее широко используемой в качестве материала контактодержателя. Кроме того, высокие пластические свойства меди обеспечивают требуемое качество сцепления и соотношение компонентов биметалла при его изготовлении. В качестве материала плакирующего слоя выбрано серебро марки Ср999,9, которое имеет лучшие показатели с точки зрения низкого и стабильного во времени переходного сопротивления контактов, что очень важно при коммутации токов менее 5 А. Так, например, удельное сопротивление серебра этой марки в 20 с лишним раз меньше, чем у сплава СрПд20 [5]. Применение проволоки в качестве исходной заготовки материала покрытия позволяет обеспечить его требуемую толщину, а также более целесообразно с точки зрения экономии серебра (из-за сегментовидной формы сечения плакирующего слоя).

Основные характеристики биметаллической ленты медь-серебро приведены в табл. 1.

Испытания на работоспособность микропереключателя типа ПМ25, контакты которого изготовлены из биметалла медь-серебро и покрыты золотом Зл5тв с добавкой никеля (0,2–0,3%) показали следующее (табл. 2). Наибольшим износом плаки-

рующего слоя серебра характеризуются микропереключатели, испытывавшиеся в режиме постоянного тока (36 В и 2 А) при активной нагрузке с регламентированной полярностью.

Сопротивление электрического контакта микропереключателей после 25 тысяч циклов переключений не превышает 0,05 Ом. Причем износ серебра при положительной полярности на подвижном контакте составляет 110–115 мкм. У микропереключателей после 50 тыс. циклов переключений износ плакирующего слоя составляет 170 мкм, сопротивление электрического контакта не более 0,08 Ом. Контактное взаимодействие при этом осуществляется поверхностью серебряного конуса 1, образующегося на подвижном контакте 2 за счет "мостикового" переноса материала, и кратера, возникающего на серебряном покрытии 3 неподвижного контакта 4 (см. рисунок). У микропереключателей, имеющих отрицательную полярность, наблюдается обратный перенос материала, и кратеры образуются на подвижном контакте.

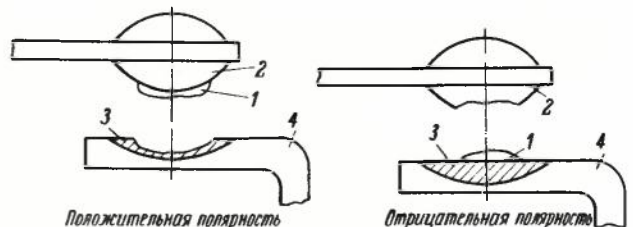


Схема "мостикового" переноса серебра в процессе работы микропереключателей: 1 – поверхность серебряного конуса; 2 – подвижный контакт; 3 – серебряное покрытие; 4 – неподвижный контакт

Таблица 1  
Основные характеристики биметаллической ленты

Размеры биметаллической ленты медь-серебро, мм		Размеры покрытия серебра, мм		Степень нагартовки биметалла, %	Микротвердость (Р = 0,2 Н), Н/мм²		Количество гибов до разрушения
Толщина	Ширина	Толщина	Ширина		меди	серебра	
0,4 <sup>-0,04</sup>	44 <sup>-0,1</sup>	0,12 <sup>-0,04</sup>	2,0 <sup>+0,3</sup> <sup>-0,2</sup>	20–25	980–1029	686–882	17–18
0,6 <sup>-0,04</sup>	44 <sup>-0,1</sup>	0,22 <sup>-0,04</sup>	3,0 <sup>+0,3</sup> <sup>-0,2</sup>	15–20	882–1029	588–784	13–14
0,6 <sup>-0,04</sup>	51 <sup>-0,1</sup>						

Таблица 2

Результаты испытаний биметалла медь-серебро в микропереключателях ПМ25

I, А	U, В	Режимы работы		Количество циклов переключений, тыс.	Сопротивление электрического контакта, Ом	Износ плакирующего слоя, мкм	Условия испытаний
		Ток	Нагрузка				
1,2	250	Переменный	Индуктивная	30	≤ 0,13	50	Т = 125°С
1,2	250	Переменный	Индуктивная	100		50	
1,0	36	Постоянный	Индуктивная	100		Незначителен	Пониженное атмосферное давление
2,0	36	Постоянный	Активная	25	≤ 0,05		
2,0	36	Постоянный	Активная	50	≤ 0,08	170	
1,6	127	Переменный	Активная	100		30–50	
4,0	18	Постоянный	Активная	100		Незначителен	

Следует отметить, что электрические параметры микропереключателей с контактами из биметаллических лент с полосчатым плакированием при приемке и поставке, а также в процессе испытаний под электрическими нагрузками находятся на том же уровне, что у микропереключателей с контактами, изготовленными целиком из серебра, что делает перспективным широкое использование биметалла в производстве указанных изделий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тодоров Р.П. и др. Биметаллические контакты. – М.: Металлургия. 1967.
2. Малышев В.М., Румянцев Д.В. Серебро. – М.: Металлургия. 1976.
3. Мастеров В.А., Саксонов Ю.В. Серебро, сплавы и биметаллы на его основе, Справочник. – М.: Металлургия, 1979.
4. Смирягин А.П. и др. Промышленные цветные металлы и сплавы, Справочник. – М.: Металлургия, 1974.
5. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. Т. 1. – М.: Металлургия. 1962.

Статья поступила 1 апреля 1980 г.

УДК 621.778.6.06

И. С. Болгов, В. Д. Мутовин,  
В. И. Нефедов, О. В. Трахониотовская

## ПОЛУЧЕНИЕ ПРЕЦИЗИОННОЙ ПЛЮЩЕНОЙ ЛЕНТЫ ИЗ ВОЛЬФРАМА

В последнее время большое внимание уделяется проблеме получения бездефектных полуфабрикатов из вольфрама (проволоки, плющеной ленты). Применение разработанной технологии и нового оборудования позволяет получать вольфрамовую плющеную ленту без расслоений и с запасом пластичности, пригодную для изготовления деталей спиральной конструкции.

В большинстве приборов СВЧ для изготовления деталей спиральной конструкции применяется молибденовая и вольфрамовая круглая проволока. В настоящее время общепризнано, что использование для этих целей плющеной ленты наиболее целесообразно с точки зрения теплоотвода, так как благодаря этому в несколько раз увеличивается площадь контакта спирали с сопрягаемыми деталями.

Существующий способ плющения, применяемый для молибдена, — прокатка проволоки без подогрева или с предварительным электронагревом — не позволяет изготавливать вольфрамовую плющеную ленту без расслоений. Получение плющеной ленты из вольфрама, например марки ВА, который наиболее полно из серийно выпускаемых промышленностью марок вольфрама отвечает требованиям, предъявляемым к материалу спиральных структур, осложняется также тем, что на стадии высокотемпературного спекания пресованных заготовок вольфрама присадки (кремнещелочная и алюминии-

евая) почти полностью испаряются. Структура с образовавшимися микропустотами, которые вытягиваются в направлении обработки (ковки, волочения) заготовок [1], обеспечивая формуустойчивость деталей при высоких температурах, в то же время осложняет обрабатываемость материала. Расслой в такой проволоке может достигать 50% и более. Наибольшая чувствительность к расслою наблюдается при переходе от волочения к плющению: под влиянием растягивающих напряжений, направленных поперек волокнистой структуры, происходит развитие расслоя, особенно на кромках лент.

Для получения прецизионной плющеной ленты из вольфрама марки ВА толщиной 0,15–0,30 мм и шириной 0,3–2,0 мм, обладающей запасом пластичности, необходимым для изготовления спиральных структур без образования видимых (при увеличении 12,5) расслоений, разработаны метод и промышленная установка плющения, обеспечивающие прокатку вольфрамовой проволоки диаметром 0,3–0,8 мм с высокими единичными обжатиями. При использовании разработанного оборудования прокатки на изолированные рабочие валки подается постоянный электрический ток величиной 400–700 А, напряжением 2–3 В. Перед прокаткой на участке рабочий валок — токопроводящее устройство осуществляется предварительный нагрев проволоки с пределами регулировки тока 0–30 А. Такая комбинированная система нагрева позволяет поддерживать в очаге деформации стабильный температурный режим [2], а также получать сравнительно высокое для вольфрама марки ВА обжатие (15–30% за проход). Плотность тока в очаге деформации при изготовлении вольфрамовой плющенки составляет 200–900 А/мм<sup>2</sup> при скорости прокатки 1–2 м/мин. Временное сопротивление разрыву плющенки при таких режимах прокатки несколько снижается по сравнению с исходным (рис. 1), относительное удлинение достигает 5–10%.

В связи с тем, что расслоение вольфрама обусловлено формированием слоистой ячеистой структуры, эффективной мерой предотвращения расслоя является дорекристаллизационный отжиг, который препятствует перерождению дислокационных скоплений в ориентированную слоистую субструктуру и во время которого образуется равноосная ячеистая структура [3]. Для проведения такого отжига перед процессом плющения установка оборудована проходной водородной печью с максимальной рабочей температурой 1300°С. Хотя при прокатке с промежуточным дорекристаллизационным отжигом происходит большее снижение временного сопротивления разрыву (см. рис. 1, кривая 2), однако резко улучшается технологичность при изготовлении спиральных деталей.

Для получения вольфрамовой плющеной ленты необходимо обеспечить определенные исходные свойства проволоки и состояние ее поверхности. Так, вольфрамовая проволока диаметром 0,3–0,8 мм должна иметь временное сопротивление разрыву в пределах 2350–1960 МН/м<sup>2</sup> и длину дефектных участков не более 10% от общей длины проволоки на катушке или в бухте. Этим требова-

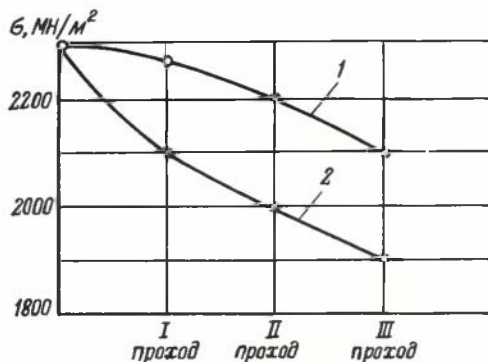


Рис. 1. Изменение временного сопротивления разрыву плющеной ленты из вольфрама марки ВА диаметром 0,56 мм (после прокатки первого прохода 0,45 × 0,62 мм  $\epsilon = 19,6\%$ ; второго прохода 0,35 × 0,72 мм  $\epsilon = 37,5\%$ , третьего прохода 0,3 × 0,8 мм  $\epsilon = 46,5\%$ ); 1 — прокатка без промежуточных отжигов; 2 — прокатка с промежуточными отжигами (перед каждым плющением).

ниям удовлетворяет вольфрамовая проволока, изготовленная по способу, указанному в работе [4]. Однако обрабатываемость при плюшении такой проволоки сильно зависит от режимов ее обработки. Даже отклонения параметров волочения в пределах допустимых вызывают значительные изменения в напряженном состоянии поверхностного слоя проволоки и обуславливают в дальнейшем расслоение. При занижении температуры волочения поверхность проволоки нагартовывается (рис. 2, кривая 1), при завышении — резко разупрочняется (кривая 2). В последнем случае образуются расслоения, способствующие высокому градиент остаточных напряжений по сечению проволоки. Нормальную обрабатываемость (без расслоений) имеет проволока, характеризующаяся кривыми 2, 3.

В этой связи в технологический процесс получения плюшевой ленты были введены операции электролитического травления и полировки исходной проволоки с общим съемом металла на диаметр 7–10%. Последнее позволяет удалить дефектный слой материала или снизить градиент остаточных напряжений в проволоке.

Разработка технологического процесса получения вольфрамовой плюшевой ленты, пригодной для изготовления деталей спиральной конструкции, показала, что каждая технологическая операция имеет "жесткие" режимы и в равной степени влияет на качество готовой продукции.

Только применение специального способа прокатки, введение дорекристаллизационных отжигов на переходах и отжиг плюшевой ленты перед изготовлением спирали, соблюдение установленных требований к качеству исходной проволоки и ее подготовка перед плюшением позволили получить материал, способный выдерживать спирализацию на керн, диаметр которого равен шести толщинам плюшевой ленты, без расслоений, видимых при увеличении 12,5. На фрактограмме поверхности разрыва вольфрамовой плюшевой ленты, изготовленной по разработанной технологии (рис. 3, а), отсутствуют нарушения сплошности (продольные трещины), что свидетельствует о высоком качестве плюшевой ленты.

В таблице приведены характеристики плюшевой ленты из вольфрама марки ВА.

Размеры, мм		Предельные отклонения, мм		Временное сопротивление разрыву, МН/м <sup>2</sup> (кгс./мм <sup>2</sup> )	Относительное удлинение, %	Число гибов	Радиус губок, мм	Нагрузка, Н
площевой ленты	исходной проволоки	по толщине	по ширине					
0,2×0,3	0,27	±0,005	±0,005	1960–2260(200–230)	4–5	4–5	0,5	10
0,35×0,6	0,50	±0,005	±0,005	1760–1960(180–200)	5–8	5–8	1,5	40
0,3×0,8	0,56	±0,005	±0,008	1660–1860(170–190)	5–10	3–5	2,5	40

Уровень пластичности вольфрамовой плюшевой ленты характеризует номограмма, представленная на рис. 4. Увеличение минимального радиуса инструмента для испытаний объясняется возрастающей суммарной деформацией.

Разработанный технологический процесс позволил получить прецизионную вольфрамовую плю-

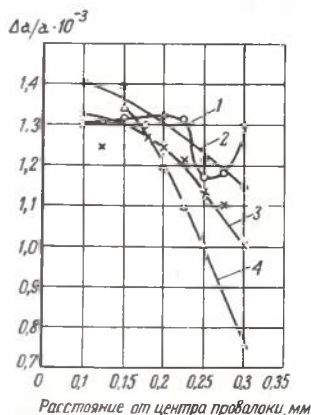


Рис. 2. Изменение параметра решетки  $\Delta\sigma/\sigma$  по сечению проволоки диаметром 0,6 мм из вольфрама марки ВА: 1,4 — проволока, расслаивающаяся при плюшении; 2,3 — проволока с нормальной обрабатываемостью при плюшении.

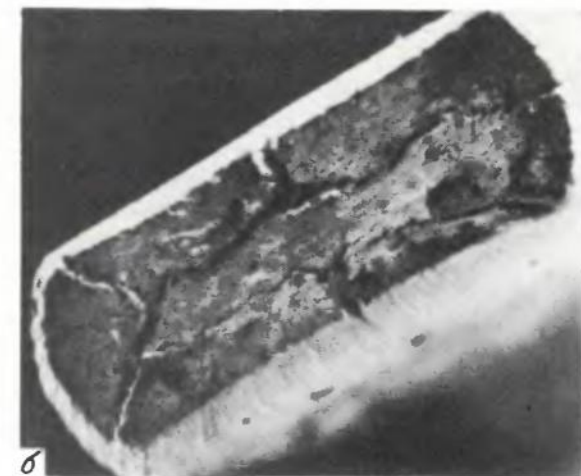
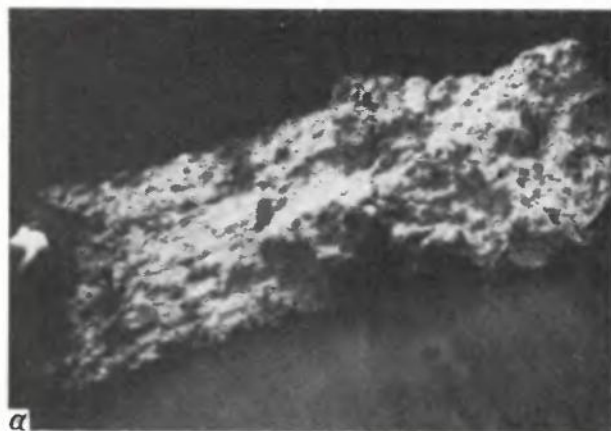


Рис. 3. Фрактограммы поверхностей разрыва вольфрамовой плюшевой ленты 0,3×0,8 мм, изготовленной при строгом соблюдении режимов (а) и с отклонением от них (б) × 150

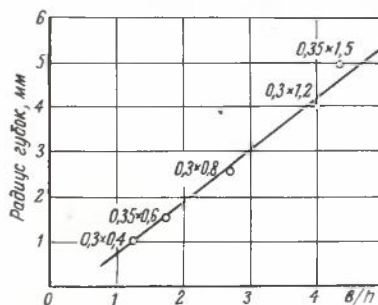


Рис. 4. Номограмма для определения минимального радиуса губок при испытании вольфрамовой плюшевой ленты на перегиб в зависимости от отношения ширины ленты к толщине

шеную ленту со специальными свойствами, имеющую минимальное количество расслоя, а также организовать производство ленты и серийных приборов с ее использованием.

Технологические методы и оборудование могут быть использованы для изготовления прецизионных плюшевых лент из труднодеформируемых металлов и сплавов, например, вольфраморениевых, резистивных и других.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Савицкий Е.М., Поварова К.Б., Макаров П.В. Металловедение вольфрама.-М: Металлургия, с. 100, 1978.
2. Способ изготовления тончайшей ленты из тугоплавких и труднодеформируемых металлов и сплавов / В.Д.Мутовин, Ю.Л.Зарапин, О.В.Трахониотовская, В.И.Нефедов, К.М.Климов. А.с.610596 опубл. в Б.И., 1978, № 22, с. 27.
3. Трефилов В.И., Мильман Ю.В., Фирстов С.А. Физические основы прочности тугоплавких металлов.-Киев.: Наукова думка, 1975, с. 191.
4. Способ изготовления проволоки из спеченных материалов на основе вольфрама / Н.В. Андреева, Э.А. Гродский, В.И. Каравайцев, В.И. Тираспольский. А.с. 553045. Опубл. в Б.И., 1977, № 13 с. 39.

*Статья поступила 1 апреля 1980 г.*

УДК 621.315.55-426-181.48

И.С.Болгов, Ф.И.Бусол,  
А.В.Волков, В.Д.Мутовин

## ПРОВОЛОКА ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ВНУТРЕННИХ СОЕДИНЕНИЙ В ИЗДЕЛИЯХ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Разработка микропроволоки из специальных алюминиевых сплавов позволила предприятиям-потребителям освоить массовое производство микросхем и транзисторов повышенной надежности, сократить расход золота в производстве, резко снизить число отказов приборов и на один-два порядка повысить их надежность.

Надежная работа интегральных микросхем и транзисторов — важнейших элементов современных радиоэлектронных устройств — связана с обеспечением устойчивого электрического соединения контактных площадок полупроводниковых кристаллов и выводов корпуса. Существует несколько способов соединения выводов с полупроводниковым кристаллом, однако наиболее массовыми были и остаются ультразвуковая или термокомпрессионная сварка золотой либо алюминиевой микропроволокой диаметром 20—50 мкм. Использование проволочной разводки обусловлено простотой исполнения, гибкостью технологического процесса и возможностью

его автоматизации, легкостью контроля и достаточно высокой надежностью получаемых контактов.

Еще до недавнего времени разварка выводов осуществлялась практически только микропроволокой из золота марки Зл999,9. Однако большой удельный вес золота снижает стойкость приборов к вибрационным и ударным нагрузкам с большими ускорениями, а его ограниченные запасы затрудняют освоение массового производства приборов. Кроме того, возможность образования химических соединений типа  $Al_n Au_m$  и возникновения микропористости в месте сварки золотой микропроволоки с контактными площадками из алюминия, особенно в присутствии различных металлических примесей [1] и фтор- или углеводородов типа фреона [2], приводит к отказам приборов в процессе их эксплуатации. Эти факторы, а также широкое внедрение в практику сборки полупроводниковых приборов и микросхем многослойных лент с плакированием алюминием выдвинули в качестве одной из мер по повышению их надежности использование для разварки выводов микропроволоки из алюминиевых сплавов.

Получение алюминиевой микропроволоки с необходимыми для микроэлектроники свойствами достаточно сложно и обусловлено необходимостью обеспечения хорошей свариваемости проволоки с материалом токоведущих дорожек при использовании ультра звуковой и термокомпрессионной сварки; высокой стойкости ее к химическому воздействию окружающей среды при работе в реальных условиях; устойчивости к старению; устойчивости к температурным и механическим перегрузкам в процессе изготовления, испытаний и эксплуатации приборов; электрического и механического контакта в течение всего срока службы приборов. Кроме того, к проводниковой микропроволоке из алюминиевых сплавов предъявляются дополнительные требования в отношении содержания основного легирующего компонента ( $1 \pm 0,1\%$  по массе) и примесей (не более 0,05% по массе), предельных отклонений диаметра ( $\pm 1-2$  мкм) и высокой чистоты поверхности. Механические свойства микропроволоки должны быть воспроизводимы в пределах партии по всей длине. Для стабилизации процесса микросварки необходимы также соблюдение определенного натяжения проволоки при намотке ее на катушки в один слой без ослабления витков и отсутствие петель при свободной размотке проволоки с катушек.

С учетом указанных требований разработаны и освоены в серийном производстве две марки микропроволоки из алюминиевых сплавов: из алюминий-кремниевый (А999К09, АК09П) и алюминий-магниевого (АМг08), изготавливаемых из особо чистых компонентов. Микропроволока марки А999К09 имеет двухфазную мелкодисперсную структуру, а АМг08 — структуру однородного твердого раствора. В их производстве применен процесс волочения в медной оболочке с последующим ее стравливанием в концентрированной азотной кислоте. Использование волочения позволило уменьшить чувствительность состава проволоки А999К09 к изменениям технологии производства и обеспечить суммарную вытяжку порядка 100000 сильно упрочняющейся при холодной деформации микропроволоки из сплава АМг08 [3] без промежуточных отжигов. Указанный процесс имеет и некоторые другие преимущества, в том числе получение микропроволоки с равномерным распределением твердости по сечению [4]. В то же время недостаточно высокое качество поверхности, необходимость обеспечения равномерности механических свойств по длине

проволоки обусловили проведение дополнительных исследований механических свойств и микроструктуры полуфабрикатов микропровода из алюминий-кремниевый сплав после различных термических обработок, а также теплой и холодной деформации. Они показали что использование определенной схемы термомеханической обработки позволяет в значительной степени снизить разброс прочностных свойств по длине микропровода. Изучение микроструктуры полуфабрикатов после термической обработки в различных режимах свидетельствуют о том, что проволока, полученная из закаленных, а также закаленных и отожженных при температуре 230°C полуфабрикатов, имеет значительный прирост прочности при суммарных вытяжках до 100000 (при этом предел прочности достигает 450 МПа. в то время как проволока, полученная из полуфабрикатов, отожженных при более высоких температурах, характеризуются сравнительно низким приростом прочности (предел прочности такой микропровода не превышает 300 МПа) (рис. 1). Важно отметить, что повышенной технологичностью обладают только полуфабрикаты, прошедшие закалку при условии их холодной обработки с небольшими частными обжатиями и хорошим теплоотводом.

Полученные данные положены в основу технологии производства прецизионной микропровода марки АК09П из алюминий-кремниевый сплав. При этом проволока, полученная по технологическому процессу волочения без оболочки, имеет поверхность очень высокой степени чистоты и допуск на диаметр  $\pm 1$  мкм при его величине 27—35 мкм. Используемые технологические режимы обработки алюминий-кремниевый сплав, высококачественное оборудование и высококачественные алмазные волюки обеспечили получение микропровода с повышенной равномерностью механических свойств. Применение прецизионных проходных печей для окончательной термообработки дало возможность ввести в технические условия на микропровода два состояния её поставки: твердое и мягкое. Механические свойства разработанных проводниковых материалов из алюминиевых сплавов приведены в таблице.

	A999K09		AMr08		AK09П	
	мягкое	твердое	мягкое	твердое	мягкое	твердое
Предел прочности, МПа	—	280-450	$\geq 200$	—	200-300	300-400
Относительное удлинение, %	—	$\geq 0,8$	$\geq 1$	—	$\geq 2-4$	$\geq 1-2$
Номинальный диаметр, мкм	27-50		30-35		27-50	

Выбор оптимальных режимов отжига микропровода можно произвести на основе анализа рис.2, на котором представлены зависимости предела прочности на разрыв и относительного удлинения для различных марок материалов от температуры отжига в садке с изохронной выдержкой в течение 15 мин. Видно, что рост относительного удлинения микропровода марок АК09П и AMr08 происходит при температурах 150—250°C, а для A999K09 пика пластичности не наблюдается и пластические свойства данного материала в диапазоне температур от комнатной до 350—400°C практически не изменяются.

Автоматизация процесса ультразвуковой сварки алюминиевых проводников с использованием

установок автоматизированной сварки определила дальнейшее повышение требований к уровню и равномерности механических свойств микропровода. Требования по стабильности прочностных характеристик и качеству намотки повысились настолько, что микропровода марок A999K09 и AMr08 оказывается неперспективной в производстве, а для микропровода марки АК09П необходимо сужение допустимого разброса предела прочности не менее, чем в 1,5 раза, проведение намотки проводников на катушки для непосредственной установки

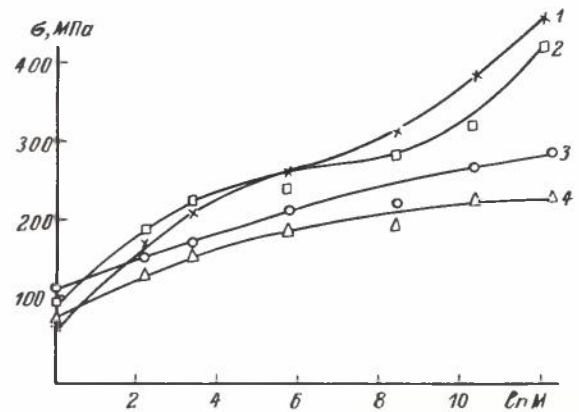


Рис. 1. Зависимость предела прочности проволоки из сплава Al+1%Si от степени ее деформации при волочении:

1 — нагрев до 560°C и закалка в воду; 2 — нагрев до 560°C, закалка в воду и отжиг при 230°C в течение 30 мин; 3 — нагрев до 560°C, закалка в воду и отжиг при 400°C в течение 30 мин; 4 — без предварительной термообработки

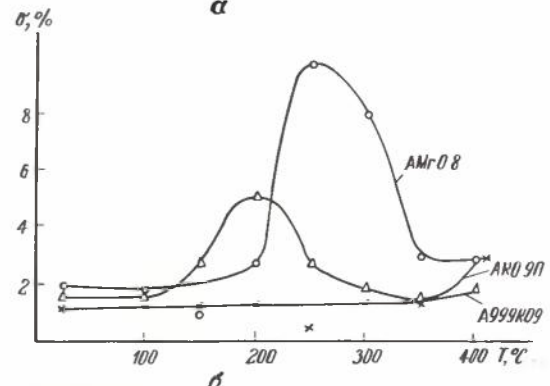
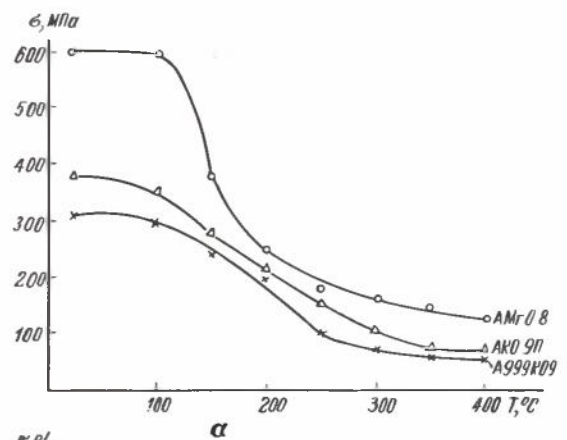


Рис. 2. Зависимости прочности на разрыв (а) и относительного удлинения (б) от температуры отжига для различных марок микропровода

на полуавтоматы типа АУС-05М и обеспечение высококачественной раскладки в один слой. Проведение этих работ позволит практически полностью решить вопрос обеспечения отрасли микропроволокой из алюминиевых сплавов для всех видов проволочной разводки внутренних соединений применительно к данному этапу развития микроэлектроники.

Следует отметить, что непрерывное совершенствование конструкции приборов ведет к установлению новых требований к микропроволоке по расширению сортамента, повышению термостойкости, коррозионной стойкости и других характеристик, что нашло отражение в «Общих технических требованиях к микропроволоке для интегральных микросхем и полупроводниковых приборов».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Stein S.J., Spadalford L., Huang C. New developments in thick film conductors. — Solid State Technology, 1979, January, p. 74–79.

2. Nařman G.G. Metallurgical failure modes of wire bonds. — 12th Ann. Proc. Reliability Phys., 1974, p. 131–141.

3. Особенности получения полуфабрикатов для изготовления алюминиево-магниево-проволоки микронных размеров/Л.Я.Белешкий, В.Д. Муговин, А.В. Волков и др. — Электронная техника. Сер. 7, 1977, вып. 11, с. 19–23.

4. Оно К., Мисихата М., Кобаяси Я. Сверхтонкая алюминиевая проволока для выводов транзисторов японского производства. — Киндзоку, 1967, т. 37, № 4, с. 50–53.

Статья поступила 10 июня 1980 г.

УДК 785. 019: 621.382

А. Ф. Волков, В. К. Куценко, В. В. Новиков,  
Н. С. Папков, С. В. Петров, В. М. Суворов

## МЯГКИЕ РЕЖИМЫ ТЕРМООБРАБОТКИ — ОСНОВА БЕЗДЕФКТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОСХЕМ

Разработка и внедрение мягких режимов, при которых отсутствует пластическая деформация пластин на операциях окисления, диффузии и эпитаксии, позволяет резко снизить плотность структурных дефектов, уменьшить ошибки совмещения и увеличить выход годных ИМС.

Проблема структурного совершенства кремния на всех этапах производства ИМС в настоящее время становится одной из ведущих с точки зрения повышения выхода годных ИМС, их надежности, степени интеграции и плотности монтажа. Если кремниевые ИМС первого поколения имели достаточно высокий выход годных при плотности дислокаций  $N_g = 10^6 \text{ см}^{-2}$  и более, то

в настоящее время производство большинства БИС и СБИС экономически целесообразно при снижении плотности дислокаций до уровня  $N_g < 10^3 \text{ см}^{-2}$ .

Исходные пластины кремния для производства ИМС получают из бездислокационных монокристаллов ( $N_g < 1 \text{ см}^{-2}$ ), а современная механическая обработка позволяет получать пластины с плотностью дефектов не более  $10 \text{ см}^{-2}$ . Применение же термических процессов (окисление, диффузия, эпитаксия) приводит к генерации в пластинах полос скольжения, в результате чего средняя плотность дислокаций достигает уровня  $10^3 - 10^6 \text{ см}^{-2}$ . Коэффициент заполнения поверхности пластины линиями скольжения  $K_{л.с}$  составляет 0,5–0,7 для КЭСС и 0,6–0,9 для ИМС. Переход производства ИМС на пластины большого диаметра и увеличение степени интеграции повышают требования к геометрическим параметрам пластин (прогиб и коробление), так как ошибка при совмещении пропорциональна увеличению линейных размеров пластин. С увеличением диаметра возрастает вероятность возникновения пластических деформаций, которые сопровождаются изменением геометрических параметров пластин (рис. 1) и образованием дислокаций (рис. 2). Однако с ростом степени интеграции допустимая плотность опасных дефектов должна уменьшаться. Так, если для схем с плотностью 100 элементов/см<sup>2</sup> допустимая плотность,

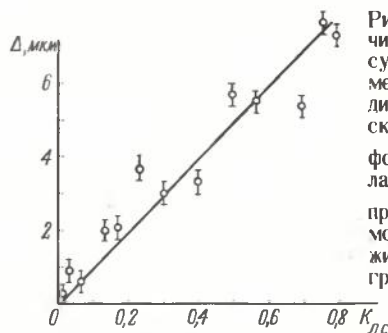


Рис. 1. Зависимость величины несовместимости рисунка на пластинах диаметром 76 мм от площади, занятой полосами скольжения  $K_{л.с}$  (первая фотолитография проводилась при  $K_{л.с} = 0$ , затем проведена двукратная термообработка в жестких режимах и вторая фотолитография с того же шаблона)

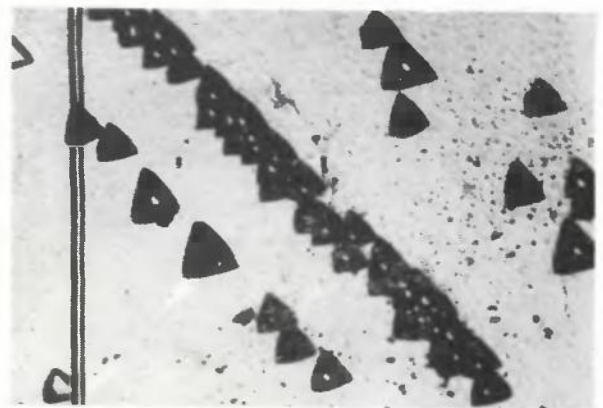


Рис. 2. Микрофотография дислокаций и дефектов упаковки вдоль полос скольжения, выявленных травителем Сиртла ( $\times 1000$ )



приводящих к катастрофическим отказам дефектов равна  $10^3 \text{ см}^{-2}$ , то для схем с плотностью  $10^5$  элементов/ $\text{см}^2$  она составляет менее  $1 \text{ см}^2$ .

Электрическая активность структурных дефектов зависит от типа ИМС и главным образом от конструкции активных элементов. В ряде случаев эти дефекты становятся опасными. Поэтому очень важно усовершенствовать технологический процесс производства ИМС (снизить температуру и количество термообработок) с целью уменьшения плотности структурных дефектов. Поскольку полностью избежать термических процессов, по-видимому не удастся, и они будут продолжать оставаться базовыми в технологии производства ИМС, то усовершенствование режимов термообработки пластин должно идти по пути снижения генерации дефектов [1].

Изучение генерации структурных дефектов кремния на этапах изготовления кремниевых эпитаксиальных структур со скрытым слоем и ИМС показало, что определяющим фактором в их возникновении является пластическая деформация из-за термоупругих напряжений [2]. При этом подавляющее (более 98%) число дислокаций расположено в полосах скольжения (рис. 2 и 3).

Основными причинами образования полос скольжения являются: величина радиального температурного градиента (РТГ) по пластине в переходных (из-за взаимного экранирования пластин в диффузионных печах) или стационарных (для эпитаксиального оборудования) режимах; температура термообработки; механическая прочность пластин при высокой температуре; механические напряжения в пластинах при высокой температуре в местах закрепления на технологической оснастке.

В диффузионных трубчатых печах пластины кремния нагреваются за счет теплоизлучения от внутренних стенок печи. Причем из всех пластин, находящихся в лодочке, равномерно освещены только две, расположенные в ее торцах. Остальные пластины освещаются и благодаря этому нагреваются (после термообработки остывают) только с периферии из-за экранирования соседними пластинами. На величину возникающего при этом в пластинах РТГ влияет отношение расстояния между пластинами к их диаметру и общая скорость нагрева или охлаждения пластин.

С целью предупреждения возникновения опасного РТГ при термообработке в трубчатых печах разработаны режимы с ограниченными скоростями нагрева и охлаждения (мягкие режимы), которые исключают пластическую деформацию пластин и появление полос скольжения. Допустимая скорость нагрева и охлаждения уменьшается с ростом диаметра пластин, уменьшением расстояния между пластинами (рис. 4) и их механической прочности (отношение толщины пластин к ее диаметру), а также при наличии нарушений на периферии и на обратной стороне пластины. Пределом безопасной температуры, при которой еще не обнаруживается генерация в пластинах полос скольжения даже при самых неблагоприятных прочих условиях, является  $800^\circ\text{C}$  для пластин диаметром

до 76 мм (см. рис. 4) и  $700\text{--}750^\circ\text{C}$  для пластин диаметром 100 мм. Режимы выбирают с учетом упругих деформаций.

Разработаны два варианта мягких режимов термообработки пластин в диффузионных печах:

- введение пластин с контролируемой скоростью в печь при рабочей температуре процесса (скорость выбирается в зависимости от диаметра и типа загрузки обрабатываемых пластин);
- быстрая (в течение 30 с) загрузка пластин в печь (или выгрузка из печи) при температуре, не превышающей безопасного предела, и их нагрев до рабочего уровня (или охлаждение) температуры.

Во втором варианте обеспечивается более однородная температурно-временная обработка пластин по всей длине печи. Однако производительность оборудования несколько снижается из-за больших затрат времени на нагрев и охлаждение печи. Поэтому в ряде случаев целесообразно одновременное применение обоих вариантов. В таком случае при выборе режима рекомендуется:



Рис. 3. Полосы скольжения на пластине после жесткого режима термообработки

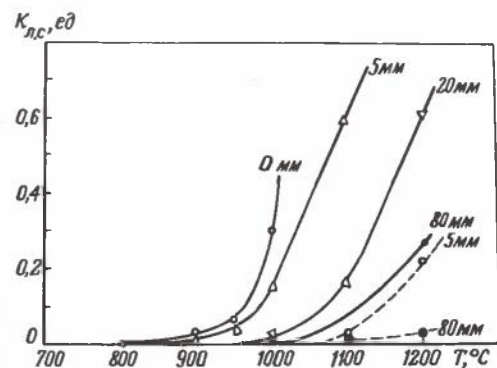


Рис. 4. Зависимость  $K_{лс}$  от температуры обработки  $T$  в трубчатых печах пластин диаметром 76 мм при различных расстояниях между пластинами (— время загрузки 10 с; --- время загрузки 30 мин)

– температуру нижнего уровня печи подобрать с таким расчетом, чтобы при загрузке и выгрузке пластин не возникало полос скольжения;

– время выдержки пластин на нижнем уровне печи должно быть таким, чтобы достигалась однородность нагрева пластин;

– подобрать режимы нагрева и охлаждения печи между нижним и рабочим температурными уровнями, с тем чтобы не происходило значительных перепадов температуры вдоль рабочей зоны. С этой целью можно использовать один или несколько промежуточных уровней температуры.

Реализуемые на печах типа СД0-125/3 скорости нагрева и охлаждения, как правило, не превышают указанных выше допустимых значений. Однако при использовании других печей, обладающих меньшей тепловой инерцией, или при переходе на пластины диаметром более 100 мм следует уточнять, является ли эта скорость допустимой.

Для некоторых процессов, таких как диффузия золота, требуется быстрое охлаждение пластин от более высокой, чем 700–850°C, температуры. При этом пластины в печи должны находиться на таком расстоянии друг от друга, чтобы обес-

печить более однородное их прогревание и охлаждение. Так, при расстоянии 20–25 мм между пластинами диаметром 76 мм и ручной загрузке (выгрузке) температура предварительного уровня может быть повышена до 950–1050°C (см.рис. 4).

Наиболее надежным способом проверки выбранных режимов является проведение технологической пробы. Для этого в лодочку последовательно загружаются с заданным шагом 4–5 пластин-экранов, 4–5 пластин кремния, применяемых для изготовления ИМС данного типа и не подвергнутых термической обработке, затем еще 4–5 экранов. Расстояние между пластинами и экранами должно быть минимальным из тех, какие используются в рабочих процессах. После проведения полного цикла термообработки, который имитирует рабочий процесс, пластины травятся в свежеприготовленном селективном травителе Сиртла в течение 10 мин. Режим процесса считается удовлетворительным, если полосы скольжения длиной не более 5 мм наблюдаются только в области сколов и в местах касания пластин с лодочкой, а величина прогиба пластин изменяется незначительно.

Более сложной является проблема разработки режимов эпитаксии, исключающих генерацию линейного скольжения. При эпитаксии взаимного экранирования пластин не происходит. Следовательно, реально достижимые скорости нагрева и охлаждения на современном эпитаксиальном оборудовании не оказывают заметного влияния. С другой стороны, характер наблюдаемых зависимостей коэффициента заполнения линиями скольжения  $K_{л.с}$  от температуры эпитаксии (рис. 5) и диаметра пластин (рис. 6), а также характер расположения полос скольжения однозначно указывают на наличие значительного радиального температурного градиента [3–5]. Изучение тепловых полей в эпитаксиальных установках с горизонтальным реактором и индукционным нагревом показало, что в центральной области подложек температура на несколько десятков градусов выше, чем на периферии [5].

Для точного определения истинного теплового поля подложек в эпитаксиальном реакторе вертикального типа сейчас используется метод измерения температуры, основанный на сильной зависимости от температуры коэффициента диффузии электрически активной примеси (As, Sb и др.) в кремнии [6, 7]. На рис. 7 приведены неоднородные тепловые поля подложек диаметром 40, 60 и 76 мм, построенные с помощью этого метода, в виде разности  $\delta T = T - T_K$ , где  $T_K$  – температура края подложки. Эти зависимости показали, что перегрев центральной области подложек является типичным. Значительные изменения температуры происходят в кольцевой периферийной зоне шириной около 15–20 мм. Для подложек диаметром 40 мм плоская центральная область отсутствует, и характер изменения температуры близок к параболическому. В работах [3–5] перегрев центральной области подложек связывался с осевым (т.е. по толщине подложки) температурным градиентом, когда нерабочая сторона подложки,

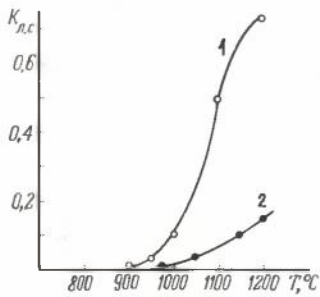


Рис. 5. Зависимость  $K_{л.с}$  от температуры эпитаксии при высокочастотном (1) и лучистом (2) нагреве

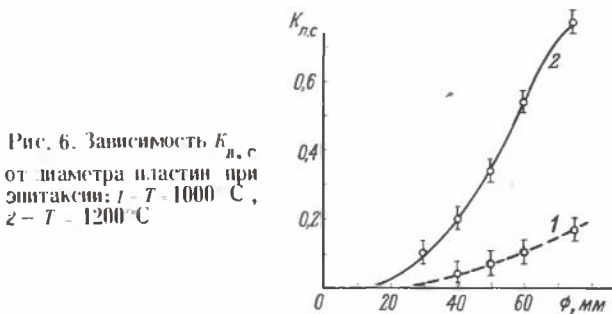


Рис. 6. Зависимость  $K_{л.с}$  от диаметра пластин при эпитаксии: 1 –  $T = 1000^\circ\text{C}$ , 2 –  $T = 1200^\circ\text{C}$

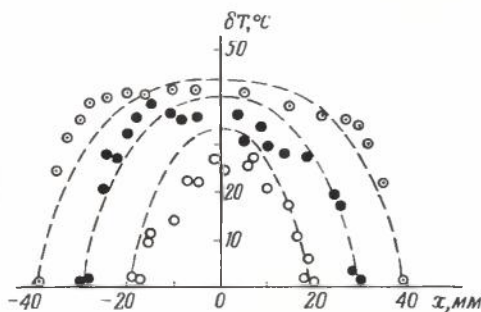


Рис. 7. Экспериментально измеренные неоднородности тепловых полей пластин диаметром 40 мм (○○○), 60 мм (●●●) и 76 мм (○○●); пунктиром обозначены расчетные кривые

обращенная к нагревателю, нагревается на несколько градусов выше, чем ее рабочая сторона. Однако расчетная оценка по этой модели величины  $\delta T \approx 1,5^\circ$  не соответствует экспериментально наблюдаемой неоднородности  $\delta T = 30 \div 40^\circ\text{C}$ ; кроме того, для данной модели должен наблюдаться параболический закон распределения температуры независимо от диаметра подложки, что также не подтверждается экспериментами. Можно предположить, что неоднородность теплового поля обусловлена различием коэффициентов излучательной способности подложки  $\epsilon_s$  и нагревателя  $\epsilon_h$ . Так как  $\epsilon_s < \epsilon_h$ , потери тепла нагревателем через излучение со стороны подложки оказываются меньше, чем с открытой поверхности нагревателя. Поглощаемая же нагревателем мощность высокочастотного нагрева не зависит от состояния его поверхности. В результате под подложкой температура нагревателя становится выше, чем на открытой поверхности. Расчеты показывают, что при  $T = 1200^\circ\text{C}$  этот перепад температур достигает  $\delta T = 40 \div 50^\circ\text{C}$ . Область перепада прилегает к краю подложки и по ширине составляет около 2 см. На рис. 7 пунктиром показаны рассчитанные на основе данной модели тепловые поля подложек разных размеров. Из рисунка видно, что расчетные и экспериментальные кривые количественно хорошо согласуются.

Устранение различия в излучательных способностях подложки и нагревателя с помощью кремниевых экранов снижает неоднородность нагрева подложки до  $7-10^\circ\text{C}$ . Однако для установок с вертикальным реактором этот способ технически сложен. Значительно проще регулировать тепловое поле подложки с помощью профилированного гнезда. Этим способом удалось снизить неоднородность нагрева подложки до  $10^\circ\text{C}$  и существенно уменьшить в ней уровень генерации полос скольжения.

Таким образом, разработанные способы снижения неоднородности теплового поля на пластинах при диффузии и эпитаксии позволили значительно снизить генерацию полос скольжения (см. таблицу) при изготовлении КЭСС. Как видно из таблицы, в трубчатых печах можно практически полностью избежать генерации полос скольжения. Для процесса эпитаксии необходимо дальнейшее совершенствование технологии на базе лучистого

нагрева и снижения температуры как самой эпитаксии, так и температуры предэпитаксиального отжига и НСI-травления.

Внедрение мягких режимов уже сейчас позволило изменить характер распределения дислокаций в КЭСС (рис. 8) и резко поднять выход годных ИМС (рис. 9).

Эффективность использования мягких режимов зависит от их соблюдения и во всех дальнейших термических процессах, так как пластическая деформация и генерация дислокаций происходит на всех операциях, проводимых при температурах выше  $800-850^\circ\text{C}$  (см. таблицу и рис. 10). Внедрение таких режимов в технологию изготовления

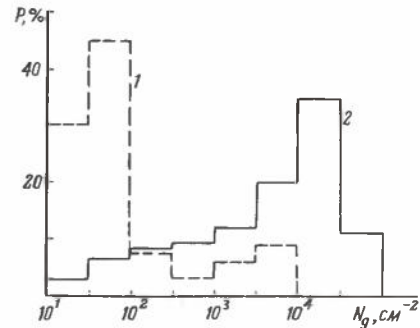


Рис. 8. Распределение КЭСС по плотности дислокаций для мягкого (1) и жесткого (2) режимов

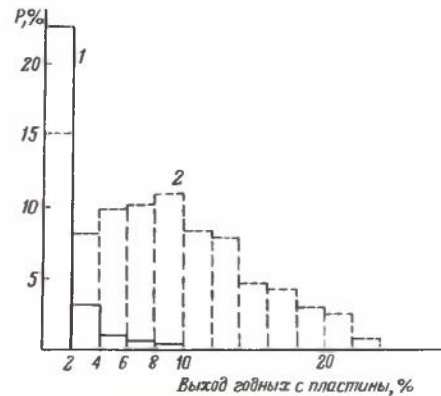


Рис. 9. Гистограммы распределения пластин по выходу годных ИМС в жестком режиме (1) и в мягком режиме (2)

Коэффициенты заполнения линиями скольжения пластин диаметром 76 мм на различных стадиях изготовления КЭСС и ИМС при использовании жестких и мягких режимов

Коэффициент заполнения линиями скольжения	Стадии изготовления КЭСС и ИМС					
	Окисление	Диффузия скрытого слоя	Эпитаксия	Разделительная диффузия	Диффузия базы	Диффузия эмиттера
На данной операции						
мягкий режим	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,03
жесткий режим	0,15	0,40	0,60	0,40	0,30	0,40
Накопленный, с учетом предыдущих операций						
мягкий режим	0,00	0,03	0,20	0,20	0,20	0,20
жесткий режим	0,15	0,50	0,60	0,80	0,87	0,95

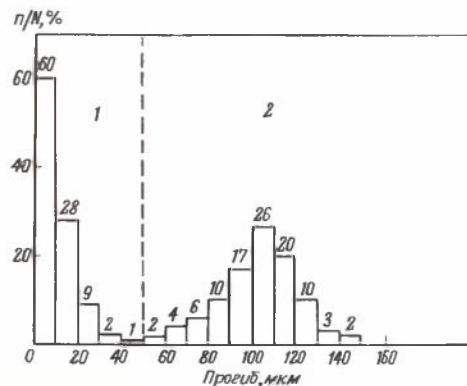


Рис. 10. Распределение пластин диаметром 76 мм по величине прогиба после их термообработки в мягком (1) и жестком (2) режимах

ИМС в масштабах отрасли сулит огромный экономический эффект за счет увеличения выхода годных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Muraoko H., Yamamoto S., Watanabe M. Perfect of crystal technology. — Japan Electron. Engineer, 1971, Febr., p. 31.
2. Hu S. M. Temperature distribution and stresses in circular wafers in a row during radiative cooling. — J. Appl. Phys., 1969, v. 40, N 11, p. 4413.
3. Huff H. R., Brackeen R. C., Rea S. N. Influence of silicon slice curvatur on themally induced stresses.— J. Electrochem. Soc., 1971, v. 118, N , p. 143.
4. Bloem I., Goemans A. H. Slip in silicon epitaxy.— J. Appl. Phys. 1972, v. 43, N , p. 1281.
5. Goemans A. H., Van Rugven L. G. Control of slip in horizontal silicon epitaxy with profiled susceptors.— J. Crystal Growth, 1975, N , v. 31, p. 308.
6. Папков Н. С., Волков А. Ф., Папков В. С. Измерение неоднородности тепловых полей подложек в эпитаксиальном реакторе. — Электронная техника, Сер. Материалы, 1978, вып. 10, с. 83.
7. Белоусов В. С., Зотов В. В., Сидоров А. И. Измерение температурного поля на пластинах кремния с использованием имплантированных скрытых слоев, легированных сурьмой. — Электронная техника, Сер. Материалы, 1979, вып. 12, с. 49.

Статья поступила 3 апреля 1980 г.

УДК 001.18.621 382

Г. А. Дмитриева, К. Г. Марин,  
И. А. Свердлин, А. В. Чамов

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Метод электрохимического полирования благодаря равномерной обработке и обеспечению высокого качества поверхности пластин кремния, а также благодаря возможности автоматизации управления процессом перспективен для широкого применения в промышленности.

Финишная обработка полупроводниковых пластин кремния и полупроводниковых соединений группы АIIIВV в своем развитии прошла следующие основные этапы: алмазное полирование, полирование субмикронными частицами, химико-механическое полирование, химико-механическое полирование при форсированных режимах. Прогрессивными процессами финишной безабразивной обработки кремниевых пластин являются электрохимическое полирование (которое в отличие от химического легче поддается управлению), очистка и консервация их в едином цикле.

Анодные процессы, протекающие при полировании, разделяются на коррозионные (без наложения тока) — травление полупроводников и их химико-механическое полирование [1] — и электролиз [2, 3]. Наиболее перспективным является нестационарный электролиз, так как позволяет снижать рабочее напряжение с 200–400 В до 30–50 В [3] и уп-

равлять процессом только за счет изменения величины и формы тока. Периодический ток по сравнению с постоянным имеет преимущества благодаря лучшему условию его прохождения через области двойного электрического слоя и пространственного заряда, а также вследствие релаксации диффузионной области во время паузы.

Анодное растворение кремния при постоянном и периодическом токах, различных режимах электролиза (температуре, плотности тока) и типах проводимости кремния целесообразно выполнять в 2,5 Н растворе HF, так как скорость процесса в таком электролите практически не зависит от концентрации ионов фтора. В случае использования периодического тока скорость процесса более высокая, но выход по току несколько меньше во всем интервале концентраций плавиковой кислоты. Это связано, во-первых, с тем, что при средней плотности периодического тока, равной плотности постоянного тока, амплитудное значение тока достигает больших значений, а с увеличением плотности тока выход по току падает. Во-вторых, в паузе между импульсами растворения кремния либо не происходит, либо оно резко замедляется. При этом продолжается выделение кислорода (так как потенциал не достигает равновесного значения), что способствует некоторой пассивации поверхности.

Изменение температуры электролита в пределах 25–60°C не сказывается на скорости растворения кремния и выходе по току. Скорость растворения кремния *p*-типа (КДБ-10) ниже, чем *n*-типа (КЭС-0,01). Это объясняется тем, что КДБ-10 обеднен дырочными зарядами и область пространственного заряда у него велика. У КЭС-0,01 дырочные носители заряда практически отсутствуют, но так как область пространственного заряда невелика, электроны проскакивают через нее.

При периодическом токе с обратной составляющей импульса наблюдались значительные скорости растворения кремния даже при относительно низких (средних за период) плотностях тока. Так, для пластин КЭС-0,01 при комнатной температуре и периодическом токе с длительностью прямой и обратной составляющих соответственно 5 и 10 мс, при среднем значении плотности тока 43,5 мА/см<sup>2</sup>, амплитудной величине плотности в прямом и обратном направлении 378 и 151 мА/см<sup>2</sup> соответственно скорость растворения материала в 2,5 Н растворе HF достигала 2,33 мг/см<sup>2</sup>·с, а выход по току — 98%. Для постоянного тока при тех же внешних условиях электролиза и равенстве средних плотностей тока скорость растворения того же материала составляла около 0,28 мг/см<sup>2</sup>·с, а выход по току — менее 5%.

Применение периодического тока позволяет исключить нанесение металлов на нерабочую сторону, а токоподвод может быть реализован вакуумным прижимом, как это выполняется в установке НЭХОП-12. С использованием периодического тока, особенно на повышенных частотах, улучшается равномерность его распределения по поверхности пластины, в результате чего достигается равномерность обработки.

При электрохимическом полировании полупроводников наибольшая скорость процесса обеспечивается на краях пластины вследствие лучших условий диффузии электролита. На расстоянии 1,5–2 мм от края скорость процесса имеет постоянное для данных условий значение. Поэтому по краям пластины образуются так называемые завалы, которые могут выполнять функции фаски: повышать жесткость пластин, понижать эпитаксиальную "корону". Таким образом, применение периодического тока позволяет получать в едином процессе полированную поверхность, проводить очистку и консервацию ее окислом (при изменении параметров тока) и получать по образующей пластин фаску.

Несмотря на перспективность, метод электрохимического полирования в настоящее время используется только применительно к кремнию, а для полупроводниковых соединений используется химическое полирование. Травители для осуществления этого процесса подбираются с учетом химических свойств материалов. Для получения полированной поверхности скорость химического полирования должна составлять 5–10 мкм/мин. Использование скоростей травления более 10 мкм/мин приводит к бурному и малоконтролируемому процессу с большим выделением газообразных продуктов реакции, что ведет к возникновению на поверхности рельефного слоя.

В состав травителя обычно входят окисляющий и растворяющий окислы компоненты (комплексобразователь), а в отдельных случаях ингибитор. Компоненты травителя не должны реагировать между собой и выделять газообразные продукты при смешивании. Для процесса химического полирования лучше использовать неокрашенные травители. Изменение их окраски в процессе полирования, свидетельствующее об истощении раствора, может быть использовано в качестве индикатора при дальнейшем применении.

Разные материалы требуют соответствующих составов травителя и режимов травления. Более того, изменение режимов должно обеспечивать управление процессом полирования по глубине обрабатываемого слоя, а для получения хорошего качества поверхности скорость полирования должна быть постоянной во времени. Наилучшим составом травителя можно считать бром метанольный, но из-за высокой токсичности и непригодности для групповой обработки он не нашел широкого применения в промышленности. Использование гипохлорита натрия тоже нецелесообразно из-за нестабильности состава и необходимости специальных полировальников. Для антимонида индия наиболее подходящим окислителем является  $H_2O_2$ , в качестве комплексобразователя можно использовать органические кислоты и оксикислоты, например молочную. Более сильные окислители, такие как  $HNO_3$ , способствуют интенсивному травлению поверхности. Для фосфида индия целесообразно применять сильные окислители (например,  $HNO_3$ ) и неорганические комплексобразователи (например,  $HCl$ ). Нагревание травителя способствует химическому полированию, но оно не дол-

жно превышать определенного уровня, при котором возможен распад компонентов раствора. Для полирования фосфида галлия можно рекомендовать травители, содержащие ферроцианид калия в щелочи, при температуре 60–80°C.

Весьма перспективно при химическом и химико-механическом полировании введение в раствор (суспензию) солей металлов высшей валентности (например, трехвалентного железа). Так как при полировании поверхность обрабатываемых пластин всегда заряжается отрицательно, металлы высшей валентности разряжают ее, восстанавливаясь до состояния низшей валентности (например, трехвалентное железо переходит в двухвалентное), что облегчает диффузионные процессы.

Описанные выше процессы при создании соответствующего оборудования несомненно найдут широкое применение в промышленности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование процесса химико-механического полирования кремниевых подложек/П.Н. Орлов, К.Г. Марин, И.А. Свердлин, А.В. Чамов. — Электронная техника. Сер. Материалы: 1979, вып. 3, с. 80, ч. 1; 1979, вып. 7, с. 50, ч. 2; 1980, вып. 1, с. 63, ч. 3.
2. Нестационарный электролиз/А.М. Озеров, В.В. Саманов, А.К. Кривцов и др. — Волгоград, Нижне-Волжское изд-во, 1972, 160 с.
3. Свердлина О.А., Кузнецов Ю.Н., Кузовлев И.А. Применение электрохимического растворения примесей при атомно-адсорбционном анализе поверхностных загрязнений пластин Si. — Электронная техника. Сер. Материалы, 1975, вып. 3, с. 45.

Статья поступила 2 апреля 1980 г.

УДК 548.5.002.5

Г. Ф. Алексахин, И. В. Алябьев, С. Ю. Макаров

## МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КРИСТАЛЛОВ САПФИРА

Резка кристаллов сапфира алмазными дисками является наиболее перспективным способом. Использование переменной скорости подачи диска позволяет уменьшить время отрезания пластин на 50%.

Сапфир является превосходным диэлектриком и изолятором, поэтому основное применение в электронной технике он нашел в качестве материала подложки для создания КМОП схем по КНС-технологии. Приборы, созданные по этой технологии, имеют улучшенные (в 4–5 раз) рабочие характеристики по сравнению с приборами, изготовленными другими методами [1]. Однако сложность механической обработки сапфира, твердость которого по шкале Мооса равна 9 (алмаза — 10), а также его высокая стоимость обуславливает высокую стоимость подложек, что сдерживает развитие КНС-технологии [2]. Одним из наиболее эффективных путей снижения цен на подложки сапфира является увеличение выхода годных и повышение производительности на операциях резки, шлифовки, полировки.

Наиболее распространенным и экономичным способом резки кристаллов сапфира является резка алмазными дисками с внутренней режущей кромкой. В процессе резки этим способом кристалл может находиться в одном из трех состояний: неподвижен [3], совершает колебательные движения [4], вращается [5, 6].

В первом случае кристаллы сапфира диаметром более 60 мм разрезать практически невозможно, так как с увеличением диаметра кристалла ухудшается подвод смазочно-охлаждающей жидкости к зоне резания и отвод продуктов резания, падает стойкость дисков, резко возрастает время отрезания пластины. При резке кристалла, совершающего колебательные движения, как и в первом случае, время отрезания пластины также велико, а стойкость дисков мала. Метод, предусматривающий вращение кристалла в процессе резки, обеспечивает сокращение времени отрезания пластины примерно вдвое, улучшение подвода смазочно-охлаждающей жидкости и отвода продуктов резания благодаря наличию щели по периферии кристалла, уменьшение глубины прохода диска в кристалл до полного отрезания пластины, что позволяет на одном и том же оборудовании разрезать кристаллы большого диаметра и повысить стойкости дисков примерно в 3–7 раз [7].

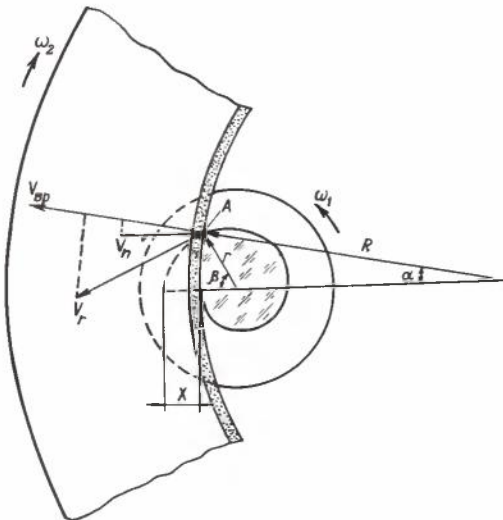


Рис. 1. Схема резки вращающегося кристалла алмазным диском с внутренней режущей кромкой

Повышение стойкости алмазных дисков является чрезвычайно важным фактором, так как стоимость их велика, а быстрое ухудшение режущих свойств приводит к большим потерям на резке. Исследования показали, что для кристалла сапфира диаметром 60 мм стойкость дисков составляет 15–25 резов при резке неподвижного кристалла и 120–150 резов при вращении кристалла со скоростью 1 об/мин. Высокая стойкость дисков во втором случае объясняется улучшением условий подвода смазочно-охлаждающей жидкости. Кроме того, режущие свойства дисков зависят от скорости вращения кристаллов. При исследовании этой зависимости на станке с постоянным усилением подачи диска [8] в качестве критерия оценки режущих свойств диска было принято изменение времени отрезания пластины с увеличением числа резов. Эксперименты показали, что стойкость дисков повышается с увеличением скорости вращения кристалла. Это объясняется, по-видимому, изменением силовых зависимостей. Если при разрезании неподвижного кристалла суммарная нагрузка на диск (сила резания) пропорциональна длине зоны резания, а удельные нагрузки остаются постоянными, то в случае резки вращающегося кристалла изменение сил резания должно подчиняться другим закономерностям.

При вращении кристалла скорость врезания кромки диска в кристалл неравномерна по длине реза. Максимальная скорость врезания достигается в точке А (рис. 1) и может превышать скорость подачи более чем на порядок.

Зависимости приведенных сил резания, рассчитанных из предположения, что суммарная нагрузка на диск пропорциональна сумме скоростей врезания в каждой точке зоны резания, от скорости вращения кристалла и расстояния между зоной резания и осью вращения, представлены на рис. 2, а, б, (кривая 1). На рис. 2 приведены также результаты измерения тангенциальной составляющей силы резания  $P_T$  (кривая 2), которая определяется из соотношения

$$P_T = W/v, \quad (5)$$

где  $v$  — линейная скорость врезания диска,  $W$  — мощность, выделяемая при резке. Скорость врезания возрастает с увеличением скорости вращения кристалла, а одновременное уменьшение длины

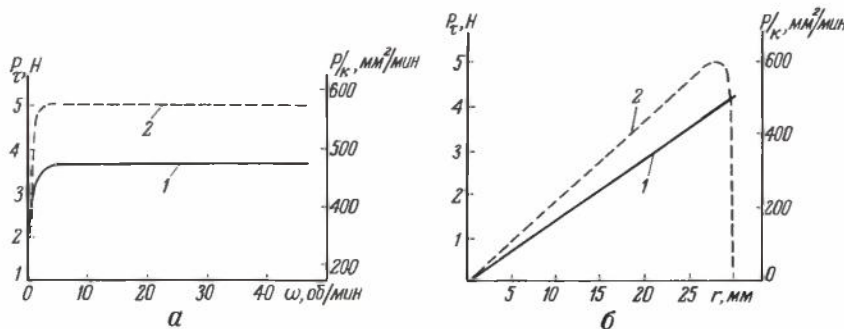


Рис. 2. Зависимость приведенной силы резания (1) и тангенциальной составляющей силы резания (2): а — от скорости вращения кристалла; б — от расстояния между зоной резания и осью вращения кристалла

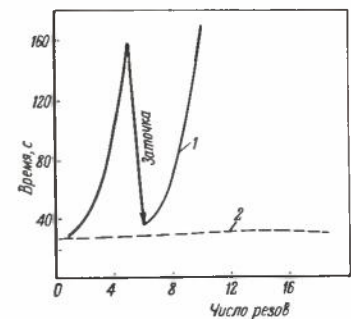


Рис. 3. Зависимость времени отрезания пластины от числа резов: 1 — в случае заточки диска камнем; 2 — при непрерывной заточке электролитическим путем

зоны резания приводит к тому, что суммарная нагрузка на диск или сила резания остается постоянной, при этом с увеличением угловой скорости вращения кристалла удельные нагрузки резко возрастают, что приводит к улучшению режущих свойств дисков, повышению их стойкости.

Правильный подбор режимов резания и смазочно-охлаждающей жидкости замедляет процесс потери режущих свойств дисков, увеличивая их стойкость. Периодически (через определенные промежутки времени или определенное число резов) режущие свойства дисков восстанавливают заточкой о наждачный камень, при этом на станках с постоянной скоростью подачи с увеличением числа резов после заточки ухудшается геометрия пластин, а при резке на станках с постоянным усилием подачи увеличивается время отрезания пластины. Для улучшения геометрии пластин, уменьшения брака на операции резки и увеличения производительности была опробована на станках с постоянным усилием подачи непрерывная заточка диска, которая заключалась в удалении материала основы диска путем электролиза. В качестве одного из электродов служил диск, в качестве другого — трубка подачи смазочно-охлаждающей жидкости (10%-ного водного раствора  $H_2SO_4$ ). Время отрезания пластины оставалось постоянным на протяжении всего процесса резки (рис.3). Данный метод является весьма перспективным, но требует создания специальных станков, изготовленных из кислотостойких материалов.

С увеличением диаметра разрезаемого кристалла значительно возрастает время отрезания пластины. Оптимизация процесса резки по времени может быть достигнута путем автоматического линейного увеличения скорости подачи диска с уменьшением радиуса разрезаемого кристалла (см. рис.2, б). Замена режима с постоянной скоростью подачи диска режимом с ускорением подачи в процессе резки пластин дает выигрыш во времени не менее 50%.

Нарушение геометрической формы пластины объясняется выработкой кристалла диском. Исследования показали, что величина выработки пластин, отрезанных от вращающегося кристалла, меньше, чем пластин, отрезанных от неподвижного кристалла, и не зависит от скорости вращения.

Измерения шероховатости пластин позволили выявить, что микрогеометрия улучшается с увеличением скорости вращения кристалла. Так, шероховатость поверхности пластин, отрезанных при скорости вращения кристалла 1 об/мин, составляет 2,3 мкм, а при скорости вращения 25 об/мин — 1,15 мкм.

Поскольку монокристаллы сапфира характеризуются анизотропией механических свойств в различных кристаллографических направлениях, исследовали зависимость величины выработки пластин от их ориентации. С этой целью изучались пластины, отрезанные от кристаллов сапфира с ориентацией (0001) и (1012). Минимальная величина выработки (25,0 мкм) наблюдается в пластинах с ориентацией (0001), в пластинах с ориентацией (1012) она увеличивается до 55 мкм.

Искривление поверхности пластин с ориентацией

(0001) симметрично относительно центра пластин, с ориентацией (1012) — асимметрично, причем направление максимальной выработки совпадает с проекцией нормали к плоскости (0001) на плоскость (1012).

Результаты исследования геометрии пластин сапфира после резки свидетельствуют о том, что основным фактором нарушения равномерности их профиля является анизотропия механических свойств в монокристалле сапфира. Известно, что микротвердость сапфира на плоскости (0001) составляет 19,4 ГПа, тогда как на плоскости (1012) — 23,15 ГПа [9].

В процессе разрезания вращающегося кристалла ориентации (1012) угол между проекцией нормали к плоскости (0001) на плоскость (1012) и направлением подачи диска меняется от 0 до  $180^\circ$ . В те моменты, когда этот угол близок к 0 или  $180^\circ$ , алмазный диск отклоняется в направлении плоскости (0001) т.е. в сторону минимального сопротивления реза, когда угол равен  $0^\circ$  — в сторону кристалла, и при угле  $180^\circ$  — в сторону отрезаемой пластины.

При разрезании кристаллов с ориентацией (0001) эта плоскость не изменяет своего положения относительно плоскости реза. Так как сопротивление резу с поворотом кристалла не изменяется, отклонение диска и соответствующая величина выработки минимальны.

Дальнейшие операции шлифовки и полировки имеют своей целью исключить отклонения от правильной геометрической формы пластин, которые образовались в процессе резки, а также уменьшить величину нарушенного слоя. Однако применение "приклеичной" технологии шлифовки и полировки ведет к дополнительному браку при переклейке пластин, а также к загрязнению поверхности. Кроме того, шлифовка пластин связанным абразивом, полировка алмазной пастой 10/7 и финишная полировка составом на основе двуокиси кремния и окиси алюминия не обеспечивают хорошего качества поверхности. Так, после финишной полировки на поверхности обнаруживаются остатки алмазного фона — алмазные риски глубиной 0,3 мкм. Скорость операции не превышает 0,5–1 мкм/ч. Хорошее качество поверхности пластин можно получить при двухсторонней шлифовке и полировке на высокопроизводительных и прецизионных станках. Использование такого метода на операции финишной полировки коллоидальной окисью кремния позволяет достичь скорости съема не менее 25 мкм/ч [10]. Нарушенный слой после такой обработки практически отсутствует, что подтверждается электронно-скопическими и рентгеноструктурными исследованиями. Однако наиболее совершенную поверхность монокристаллов  $\alpha-Al_2O_3$  получают путем высокотемпературного отжига в вакууме при  $T \approx 1800-1900^\circ C$  [11], который приводит к рекристаллизации нарушенных слоев и является конечной операцией подготовки подложек к эпитаксии.

Таким образом, наиболее перспективным способом резки кристаллов сапфира является резка алмазными дисками с внутренней режущей кромкой,

предусматривающая вращение кристалла. Для увеличения производительности оборудования и улучшения геометрии пластин на станках резки должна быть предусмотрена возможность автоматического увеличения скорости подачи диска и непрерывной заточки дисков в процессе резки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ronen S., Michelette B. Recent SOS technology advances and applications. – Electronic Equipment News, 1976, May, p. 14–15.
2. Berg. Interconnection system sews up the electronics in the athena 2000 machine by singer. – Electronic Pack. and Prod., 1977, vol. 17, p. 25–26.
3. Пат. 957159 (Великобритания).
4. Пат. 2967381 (США).
5. Пат. 48-23585 (Япония).
6. Пат. 48-23586 (Япония).
7. Grandia J., Hill J. Improved slicing and orientation technique for I.D. Sawing. – Solid State Technology, 1978, N 2, p. 40–42.
8. Büttner A., Winter E. Cutting sapphire with annular saw blades. – Industrial Diamond Review, 1977, N 2, p. 41–43.
9. Рубин и сапфир. Под ред. М.В. Классен-Неклюдовой, Х.Ф. Багдасарова. – М.: Наука, 1974, 236 с.
10. Gutsche W., Moody J. Polishing sapphire with colloidal silica. – J. Electrochem. Soc., 1978, vol. 125, N 1, p. 136–138.
11. Папков В.С., Малинин А.Ю., Украинский Ю.М. и др. Влияние обработки поверхности сапфировых подложек на качество эпитаксиальных слоев кремния. – Электронная техника. Сер. Материалы, 1970, № 8, с. 45.

Статья поступила 2 апреля 1980 г.

УДК 628.5

В. Н. Пинчук, Г. К. Рыбина,  
Д. Т. Стефанов, Н. И. Терехов

## ЛИНИЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ МЫШЬЯКА

Предназначена для обезвреживания сточных вод, образующихся при производстве полупроводниковых структур, от соединений мышьяка.

Увеличение объемов производства полупроводниковых материалов ведет к повышению концентрации мышьяка в промышленных стоках, что ставит задачу обезвреживания сточных вод, особенно если они не вовлекаются в замкнутый цикл производства. Схема работы линии показана на рисунке. На линию поступают как кислые, так и щелочные стоки, содержащие трехвалентный и пятивалентный мышьяк с концентрацией 30–100 мг/л. Осаждение мышьяка производится в следующем порядке:

- доведение рН сточных вод до 5–12 путем добавления едкого натра или соляной кислоты;
- окисление трехвалентного мышьяка в пятивалентный с помощью хлорной извести, характеризующейся окислительными свойствами в широком интервале рН;

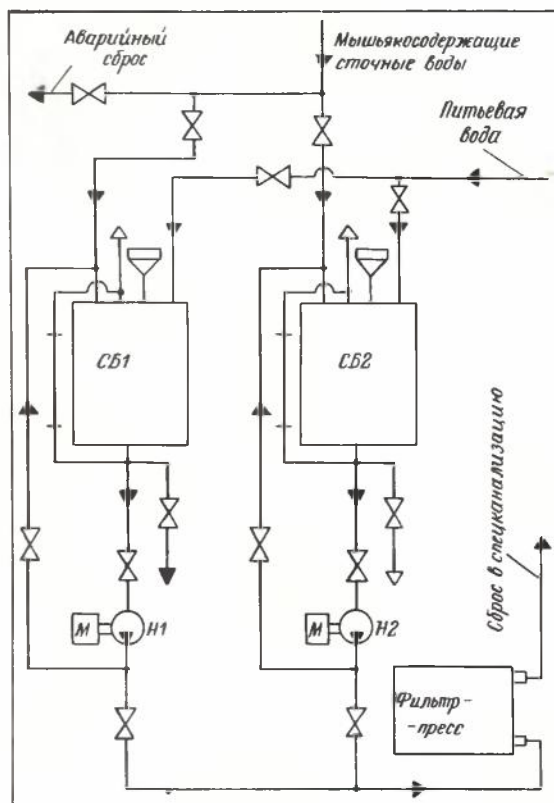
– перевод мышьяка в нерастворимое состояние путем обработки сточных вод известью и фосфорной кислотой.

В результате проведенных исследований установлены оптимальные концентрации реагентов: хлорной извести в реакторе 1,0 г/л (перемешивание 15 мин при ее введении), извести 10 г/л (перемешивание 15 мин) и фосфорной кислоты 1,5 г/л (перемешивание 2 ч). Все процессы проводятся при комнатной температуре и завершаются фильтрованием после нейтрализации стоков.

Реагенты подаются в сборники СБ1 и СБ2 через воронки. Сточные воды, содержащие мышьяк, поступают с участков и попеременно заполняют один из указанных сборников. В то время как один сборник наполняется, в другом происходит нейтрализация. Перемешивание стоков в сборниках после введения реагентов и подача их на фильтр-пресс осуществляется насосами Н1 и Н2. Периодическая промывка сборников осуществляется технической водой. Включение и выключение насосов производится с пульта управления, который снабжен необходимыми элементами сигнализации. Контроль содержания мышьяка в стоках осуществляется химическим анализом. Осадок снимается с фильтровальной ткани, упаковывается в полиэтиленовые мешки и подвергается утилизации.

### Техническая характеристика

Производительность, м <sup>3</sup> /сут. . . . .	4
Концентрация мышьяка, мг/л	
начальная . . . . .	100
конечная . . . . .	0,05
Число обслуживающего персонала, чел. . . . .	3



Гидравлическая схема линии нейтрализации



## ЛИТЕРАТУРА

1. Милованов Л.В., Краснов Б.П. Методы химической очистки сточных вод. — М.: Недра, 1967.
2. Романов М.М., Семина А.А. Очистка от мышьяка сточных вод, получаемых при переработке концентрата коксохимических заводов. — Сборник научных трудов (Гиредмет), М.: Металлургия, т.21, с.195.
3. Ахмадеев В.А., Савина Н.В. Физико-химические методы очистки сточных вод от мышьяка и извлечение редких и рассеянных металлов из растворов, М.: 1975.
4. Захарова Н.С., Козьмина Л.Д. и др. Исследование возможности применения реагентных способов для очистки сточных вод от мышьяка и сопутствующих элементов. — Электронная техника, Сер. Материалы, 1976, вып. 9, с.106.

Статья поступила 1 апреля 1980 г.

УДК 620.179:11.621.382

В. Ф. Буряченко, А. Ф. Нелюбин, Е. А. Тишин

## НАДЕЖНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Отсутствие контроля качества поверхности деталей полупроводниковых приборов на ряде промежуточных операций, несмотря на строгое соблюдение технологических режимов, приводит к браку, который зачастую выявляется лишь в готовой продукции. Оценка смачиваемости золоченых молибденовых кристаллодержателей припоем, проводимая с помощью измерения контактной разности потенциалов, позволяет выявить непригодные для пайки детали.

Эксплуатационные характеристики мощных транзисторов, например КТ-803, в значительной степени определяются качеством пайки кристалла на кристаллодержатель, которое зависит от смачиваемости припоем кристаллодержателя. Последний представляет собой молибденовый диск толщиной 0,6 мм, диаметром 10 мм, гальванически покрытый слоями никеля и золота. В процессе гальванического покрытия качество поверхности этих дисков контролируется визуально, что, очевидно, не гарантирует поддержание ее физико-химических свойств в пределах, обеспечивающих высокое качество пайки.

Контроль качества поверхности может быть эффективнее при измерении такой зависящей от химического состава и кристаллической структуры поверхности физической характеристики, как работа выхода электронов. Однако на практике удобно измерять не работу выхода электронов, а контактную разность потенциалов, т.е. разность работы выхода электронов исследуемого и эталонного образцов. Для этого предназначена установка, показанная на рис.1, в которой контактная разность потенциалов измеряется методом динамического

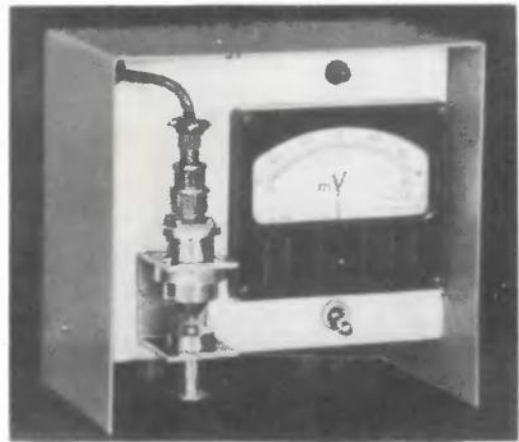


Рис. 1. Установка для измерения контактной разности потенциалов

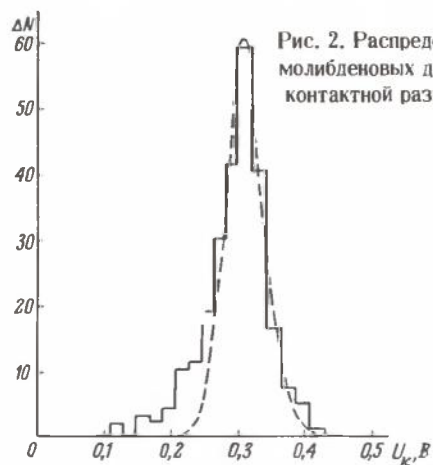


Рис. 2. Распределение золоченных молибденовых дисков по величине контактной разности потенциалов

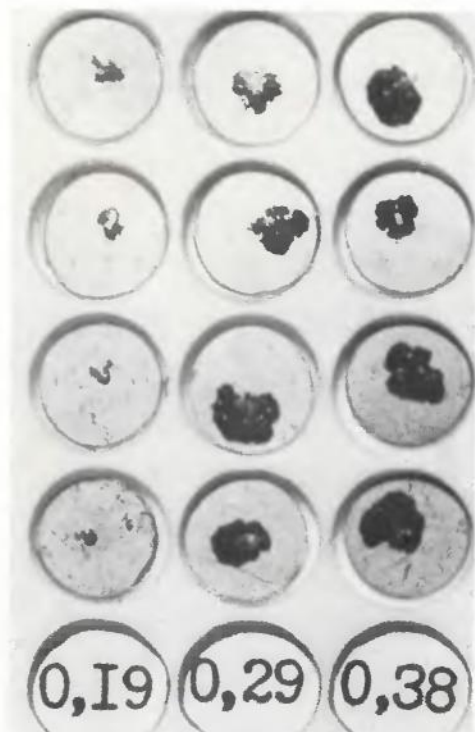


Рис. 3. Растекание припоя на поверхности золоченных молибденовых дисков при различных значениях контактной разности потенциалов

конденсатора с автоматической регистрацией результатов. Точность отсчета составляет 0,01 В при времени его проведения 2–3 с.

Результаты измерения контактной разности потенциалов партии серийно выпускаемых дисков (рис.2) свидетельствует о том, что максимальный разброс по работе выхода электронов достигает 0,3 эВ. Кривая распределения несколько асимметрична и сдвинута в сторону меньших значений работы выхода электронов, что соответствует гауссовому распределению (штриховая кривая). Можно предположить, что эта асимметрия вызвана отклонением технологического режима изготовления дисков от оптимального и указывает на возможность появления брака на операции напайки кристалла.

Для выявления связи между контактной разностью потенциалов и смачиваемостью золоченых молибденовых дисков (3 группы дисков с контактной разностью потенциалов  $0,19 \pm 0,03$ ;  $0,29 \pm 0,01$  и  $0,38 \pm 0,01$  В) исследовалась растекаемость на них припоя при температуре 380–400°C. При этом использовался припой на основе эвтектического сплава золото–германий. Анализ картины растекания припоя (рис.3) убеждает в том, что поверхность дисков, характеризующихся более низким значением контактной разности потенциалов, плохо смачивается припоем, т.е. не обеспечивает хорошего качества пайки.

Таким образом, измерение контактной разности потенциалов является достаточным критерием для количественной оценки качества поверхности деталей перед их пайкой, позволяя легко выявить детали, не отбракованные в результате обычного визуального контроля.

Статья поступила 18 июня 1980 г.

УДК 621.3.049.77.002:54/32

А. А. Родионова, В. С. Яснев

## МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ И ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН

В технологии изготовления полупроводниковых интегральных микросхем качество, надежность работы изделий и эффективность их изготовления зависят от материалов, применяемых для химической и фотолитографической обработки кремниевых пластин. В настоящее время известен довольно широкий ассортимент используемых материалов. Сравнительный анализ этих материалов и определение их влияния на качество обработки изделий дает возможность выявить наиболее перспективные материалы и уменьшить их ассортимент.

Применение *серной кислоты* способствует адсорбции металлических примесей на поверхности полупроводника в виде сернокислых солей бария, серебра, стронция, свинца и теллура (произведения растворимости которых  $10^{-10} - 10^{-3}$ ), а органических микропримесей – в виде обугленных частичек фоторезиста и других органических остатков.

*Фосфорсодержащие материалы* при гидролизе образуют фосфат-ионы, которые взаимодействуют с катионами металлов (циркония, цинка, железа, бария, алюминия, хрома и магния), образуя фосфорнокислые соли, произведения растворимости которых  $10^{-132} - 10^{-13}$ . Так как фосфаты указанных металлов являются менее растворимыми соединениями, чем сульфаты, то применение фосфорсодержащих материалов еще более нежелательно, чем серосодержащих.

*Азотная кислота* способствует адсорбции на поверхности полупроводника микропримесей тяжелых металлов, таких как золото, а также десорбции примесей меди, цинка, никеля, кадмия и серебра. Поскольку азотная кислота, так же как и серная, довольно дорога, и при их применении оборудование подвергается коррозионному разрушению, то использование этих кислот, серо- и фосфорсодержащих соединений для химической обработки полупроводниковых пластин нецелесообразно. Однако они могут с успехом применяться для травления металлов и окисла кремния в процессах фотолитографии.

*Перекисно-аммиачный раствор* десорбирует с поверхности примеси никеля, меди, кадмия, цинка, серебра и органические примеси, а *перекисно-солянокислый* – примеси тяжелых металлов. Учитывая, что тип микропримесей, десорбируемых азотной кислотой и перекисно-аммиачным раствором, одинаков, а химическая агрессивность последнего меньше, при химической обработке предпочтение следует отдавать перекисно-аммиачному раствору. В то же время в производстве сверхбыстродействующих больших интегральных схем, характеризующимся значительным числом проводимых процессов, а соответственно и большими материальными и трудовыми затратами, целесообразней применять *буферно-перекисный* раствор, обеспечивающий десорбцию микропримесей широкого класса элементов Периодической системы в одном химическом процессе. Трудовые затраты при использовании буферно-перекисного раствора вдвое меньше по сравнению с использованием указанных выше перекисных растворов.

Следует отметить, что буферно-перекисный раствор обладает скрытыми возможностями по дальнейшему усовершенствованию технологического процесса и уменьшению трудовых, материальных и экономических затрат.

Статья поступила 15 августа 1980 г.

## ЭП СООБЩЕНИЯ ЭП

## НОВОСТИ ЗАРУБЕЖНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

**СВЧ техника.** В последнее время все большее внимание при разработке полупроводниковых СВЧ приборов уделяется полевым транзисторам из арсенида галлия.

По оценке специалистов фирмы Hewlett-Packard (США), технология изготовления полевых СВЧ транзисторов из арсенида галлия в настоящее время достаточно отработана и начато их промышленное освоение.

В 1980 г. считается реальным появление промышленных образцов приборов с коэффициентом шума менее 1 дБ на частоте 4 ГГц, менее 2 дБ на частоте 10 ГГц и менее 3 дБ на частоте 18 ГГц.

В 1980—1981 гг. ожидается создание лабораторных образцов приборов с коэффициентом шума 0,5 дБ на частоте 4 ГГц, 1 дБ на частоте 10 ГГц при длине затвора 0,5 мкм и 1,5 дБ на частоте 18 ГГц.

Считается также реальной разработка усилителей на полевых транзисторах из арсенида галлия с коэффициентом шума менее 1 дБ на частотах ниже 6 ГГц.

По мнению специалистов, для дальнейшего снижения коэффициента шума полевых транзисторов и улучшения их характеристик в коротковолновой области СВЧ диапазона необходимо:

- уменьшить длину затвора до 0,1 мкм;
- снизить контактное сопротивление и паразитное сопротивление области затвор-исток путем использования  $p^+$ -слоев, полученных методом эпитаксиального выращивания или ионного внедрения;
- оптимизировать профиль распределения легирующей примеси;
- улучшить качество используемых материалов (повысить равномерность легирования активного слоя, чистоту и удельное сопротивление буферного слоя и подложки);
- рассчитать оптимальную геометрию области затвор-сток.

Предполагается также сосредоточить усилия разработчиков на создании приборов, работающих в диапазоне частот 18—26 ГГц и на более высоких частотах. Уже созданы приборы, работающие на частоте 30 ГГц (фирма Hughes), а это открывает перспективы разработки транзисторов миллиметрового диапазона [1].

Специалистами фирмы Raytheon Co. (США) созданы экспериментальные образцы аналогов интегральных схем мощных однокаскадных СВЧ усилителей на параллельно включенных полевых транзисторах из арсенида галлия.

Схемы этих усилителей изготовлены на полупроводниковых подложках из арсенида галлия. Для работы в 3-см диапазоне были выбраны подложки с площадью поверхности 8 см<sup>2</sup>, на которой

размещалось 50—60 элементов. Применение подложек большей площади (~36 см<sup>2</sup>) ограничивалось низким выходом годных и трудностью выращивания однородных эпитаксиальных слоев методом ионного внедрения.

При проектировании усилителей основное внимание уделялось проблемам изготовления согласующих схем на кристалле, исключения проволочных соединений в ИС, обеспечения низкого теплового сопротивления подложки, снижению потерь в соединительных линиях и индуктивности заземляющих проводников, а также уменьшению размеров схемы.

Согласующее устройство и устройство сложения мощностей с высоким КПД изготавливались методом печатной технологии. Специалисты считают, что применение такой технологии позволяет изготавливать ИС с воспроизводимыми характеристиками с достаточной экономической эффективностью, так как она исключает возможность использования внешней настройки схемы, а особое внимание уделяется точности ее изготовления. В связи с этим отмечается необходимость применения методов машинного проектирования.

Была создана ИС СВЧ усилителя на двух параллельно включенных транзисторах размером 2,5х3,75 мм. На частоте 9,5 ГГц в режиме малого сигнала прибор обеспечивает коэффициент усиления 6,2 дБ. При большом входном сигнале выходная мощность составляла 1 Вт (в два раза больше, чем для ИС усилителя с одним транзистором). При насыщении коэффициент усиления составляет 4 дБ, а полоса пропускания (по уровню 1 дБ) — 1,9 ГГц (~20%).

При охлаждении прибора можно получить выходную мощность более 1,5 Вт.

Изготовлена ИС усилителя на четырех транзисторах размером 4,75х6,12 мм. На частоте 9,5 ГГц выходная мощность прибора превышала 2 Вт при коэффициенте усиления 4 дБ и полосе пропускания 1,5 ГГц (по уровню 1 дБ). При малом входном сигнале коэффициент усиления равен 5 дБ.

По оценке специалистов, существуют оптимальные число и размеры ячеек для каждой частоты, полосы пропускания и выходной мощности транзистора. При меньшем числе ячеек уменьшается коэффициент усиления, а при большем — усложняется схема, увеличиваются размеры подложки и уменьшается полоса пропускания. Были проведены теоретические исследования оптимальных размеров ячейки с целью получения максимальных значений коэффициента усиления и полосы пропускания [2].

Однако зарубежные изготовители считают, что СВЧ приборы применяются недостаточно широко. Поэтому постоянно проводится поиск новых возможностей применения существующих СВЧ приборов и разработанных СВЧ устройств. Наиболее интенсивные исследования ведутся в области устройств миллиметрового диапазона, которые могут использоваться в системах для осуществления скрытой связи на короткие расстояния. В результате исследований специалистами фирмы TRW создан радиобинокль миллиметрового диапазона, который обеспечивает устойчивую связь на расстоянии более 1 км при угле поля зрения 7,5°. Прибор представляет собой бинокль модифицированной конструкции: оптические

элементы на одной стороне заменены антенной и приемопередающим устройством; оставшаяся оптическая система обеспечивает прямую видимость между двумя приемопередатчиками. Направленная линзовая антенна в радиобинокле сконструирована так, чтобы непосредственно монтироваться в корпусе бинокля. Большая толщина линзы обеспечивает прочность конструкции антенны. Антенна позволяет получить ширину луча 6,2°. Все схемы встроены в бинокль и соединяются с блоком генератора гибкими коаксиальными кабелями [3]. Прибор укомплектован микрофоном, наушниками и батареей питания. Простая конструкция прибора с минимальным числом деталей обеспечивает малую стоимость и быстрый промышленный выпуск. Используемый во входном модуле генератор на диоде Ганна в интегральном исполнении может работать как генератор передатчика и как смеситель приемника. Переключение режимов передача-прием осуществляется простым нажатием кнопки.

Применяемые диоды Ганна мощностью 100 мВт на частоте 50 ГГц выпускаются фирмой Microwave Associates (США). В схеме генератора используется диэлектрический зеркальный волновод из нитрида бора с диэлектрической проницаемостью [4].

Потери в волноводе на частоте 70 ГГц, обусловленные в основном омическими потерями в металлической пластине, составляют 6·10<sup>-3</sup> дБ на расстоянии одной длины волны. Максимальный сдвиг частоты генератора на диоде Ганна при изменении температуры окружающей среды составляет 6 МГц/°С, а максимальное изменение мощности — менее 0,06 дБ/°С.

Смеситель на диоде Ганна работает в широкой полосе промежуточных частот (25—450 МГц). Сигнал от гетеродина, обеспечивающего поиск в широком диапазоне частот (125—350 МГц), поступает ко второму преобразователю, имеющему среднюю промежуточную частоту 100 МГц. Третий преобразователь, работающий на фиксированной частоте, преобразует частоту сигнала в 10,7 МГц (обычную частоту телефонных систем). В случае, когда генераторы на диодах Ганна в двух отдельных блоках работают на одной и той же частоте, приемник отстраивается от средней частоты на ±25 МГц.

Усиление сигнала в процессе преобразования осуществляется в диапазоне перестраиваемых частот 100 МГц. Минимальный коэффициент шума смесителя равен 15 дБ при максимальном усилении преобразования 4,3 дБ. Отмечается, что радиобинокль является первым шагом к конструированию практических систем связи, в которых используется смеситель на диоде Ганна, работающий в режиме свободных колебаний.

В последнее время усилился интерес к использованию спутников, введенных на стационарные орбиты, для прямой трансляции телевизионных программ. Благодаря этому может установиться стабильный рынок мощных СВЧ ламп для спутниковой аппаратуры. Прочные позиции на этом рынке занимает фирма Thomson-CSF — ведущий изготовитель космических электронных систем. Расходы фирмы на разработку мощных ЛБВ для спутников прямого телевизионного вещания оцениваются в 12 млн. долл.

В 1979 г. специалистами фирмы Thomson-CSF изготовлен опытный образец ЛБВ типа ТН3619 с выходной непрерывной мощностью 200–230 Вт в диапазоне частот от 11,7 до 12,5 ГГц. Лампа входит в серию ЛБВ для телевизионных спутников, которые фирма начала разрабатывать четыре года назад.

Лампа имеет спиральную замедляющую систему. Этой системе отдано предпочтение перед замедляющей системой типа цепочки связанных резонаторов ввиду снижения веса лампы (ЛБВ типа ТН3619 весит около 3 кг, а лампа с замедляющей системой типа цепочки связанных резонаторов при той же выходной мощности весила бы 7–8 кг). При изготовлении ЛБВ была использована оригинальная технология крепления спирали. Медная спираль припаивалась к опорам из окиси бериллия, которые в свою очередь припаивались к медной оболочке лампы. Такой способ крепления позволил увеличить теплоотвод более чем в 10 раз по сравнению с теплоотводом при использовании механического крепления спирали.

Электроды коллектора ЛБВ изготовлены из пиролитического графита. Охлаждение лампы осуществляется путем прямого теплового излучения в космическое пространство, так что уровень тепловой энергии внутри сохраняется в допустимых пределах даже при большом значении СВЧ мощности. Использование империрированного катода из пористого вольфрама, пропитанного алюминатами бария и кальция, увеличивает срок службы лампы [4, 5].

**Микроэлектроника.** В наиболее быстро развивающемся направлении электроники — микроэлектронике — усилия зарубежных разработчиков направлены в первую очередь на разработку СБИС, увеличение плотности элементов в ИС, дальнейшее совершенствование ИС на арсениде галлия, а также на разработку все более универсального и совершенного технологического оборудования.

Благодаря увеличению сложности ИС при одновременном снижении стоимости элементов схем доля полупроводниковых приборов в общем объеме продаж радиоэлектронного оборудования на мировом рынке за прошедшие десятилетия увеличилась в два раза и достигла к 1980 г. 7% (10,4 млрд. долл.). Ожидается, что к 1990 г. эта доля возрастет до 10% (более 45 млрд. долл.).

Современная полупроводниковая технология позволяет изготавливать СБИС с  $10^5$  активных элементных групп (один логический вентиль или базовая ячейка памяти) на кристалле. Ширина линий в этих приборах равна 3 мкм. С уменьшением ширины до величин менее 1 мкм число активных элементов на кристалле достигнет  $10^6$ . Увеличение сложности при уменьшении стоимости активной элементной группы приводит к значительному расширению областей их применения (см. таблицу).

С увеличением сложности ИС число приборов, требуемых для реализации радиоэлектронной аппаратуры, уменьшается. Одновременно уменьшается и число систем, в которых может использоваться данная схема, т.е. практически для каждой системы требуется новая схема частного применения. Высокая стоимость и длительность этапа разработки схем частного применения может привести к тому, что СБИС смогут использоваться лишь в системах массового производства. Эта проблема может быть решена путем применения нового класса компонентов, так называемых программируемых системных компонентов, к числу которых относятся современные однокристалльные схемы микро-ЭВМ, схемы вентиляльных матриц и цифровых схем обработки сигнала.

Примером однокристалльной схемы микро-ЭВМ является семейство однокристалльных четырехразрядных устройств типа TMS 1000 фирмы Texas Instruments. Архитектура всех схем этого семейства одинакова. Специфические функции схемы записываются в память микро-ЭВМ на последнем этапе обработки пластины с помощью шаблона с соответствующим рисунком. С помощью этого шаблона также программируется декодирующее устройство команд и выходное кодирующее устройство. В настоящее время в семейство схем TMS 1000 входят 20 базовых наборов, включающих ПЗУ емкостью от 500 байт до 4Кбит, различные конфигурации устройств ввода/вывода и выходных элементов, обеспечивающих на выходе низкое или высокое напряжение и подключение к различным устройствам отображения информации. На основе этих базовых наборов можно изготовить более 400 схем, удовлетворяющих различным требованиям заказчика. При этом, поскольку на разработку системы на базе программируемых устройств затрачивается 30 человеко-лет, экономия трудозатрат составляет 670 человеко-лет. Следует

отметить, что ни одна фирма не располагает достаточными ресурсами для разработки 400 БИС частного назначения за такой короткий срок.

Хотя начальная стоимость производства схем частного назначения ниже, чем у программируемых устройств, стоимость последних снижается в соответствии с "кривой обучения", поскольку для всех вариантов схем изготавливается одно и то же базовое устройство (с другой стороны, для каждой новой системы требуется освоение новой "кривой обучения" производства схемы частного применения). При освоении производства значительно увеличивается и надежность программируемых ИС. Вторым типом программируемых системных элементов являются схемы вентиляльных матриц, в которых объединяются логические вентиля для выполнения требуемой логической функции. Схемы весьма перспективны для создания устройств с малым объемом производства при использовании методов машинного проектирования для получения рисунка соединительных линий.

Преимуществом схем программируемых вентиляльных матриц перед логическими ИС частного назначения является уменьшение на 16% сроков внедрения разработки и на 1–30% стоимости разработки. Отмечается, что в дальнейшем время цикла создания опытного образца будет сведено к минимуму за счет применения метода электронолитографии для непосредственного нанесения рисунка металлизации.

К третьему типу программируемых системных компонентов относят цифровые схемы обработки сигнала, которые заменят однофункциональные линейные и аналоговые схемы. Объединение мультиплексора, аналого-цифрового преобразователя, быстродействующего программируемого векторного процессора и цифроаналогового преобразователя позволит создать гибкую и эффективную систему обработки сигнала. Примером такой системы является процессор Micro-Vector фирмы Texas Instruments, выполненный по И<sup>2</sup>Л технологии и предназначенный для военных применений. Разработанные схемы использовались также при создании систем обработки различных сигналов (сейсмологических, акустических, телеметрических и др.) в реальном масштабе времени.

Следует учитывать, что при разработке СБИС, как программируемых, так и однофункциональных, растет потребность в средствах программного обеспечения для ЭВМ большой емкости, поэтому роль заказчика при определении функций схем будет возрастать [6].

Зарубежные специалисты продолжают совершенствовать МОП транзисторы с вертикальной структурой. Специалистами фирмы Siemens AG (ФРГ) разработаны транзисторы с диффузионным каналом (ДМОП прибор) с малым значением управляющего тока: ток переключения транзисторов типа BUZ10 (значения выходных токов и напряжения 12 А и 50 В соответственно) и типа BUZ 20 (8 А и 100 В) составляет менее 1 мА при напряжении на затворе 5 В. Это позволяет использовать многие современные БИС и СБИС для управления работой этих транзисторов.

Новые ДМОП транзисторы, изготавливаемые по Sipmos технологии, по-

Снижение стоимости радиоэлектронного оборудования за счет появления новых ИС

Тип радиоэлектронной аппаратуры	Число монтируемых элементов, шт.	Стоимость компонентов сборки аппаратуры*, долл.	Уменьшение стоимости аппаратуры
На дискретных компонентах	2 · 10 <sup>4</sup> – 3 · 10 <sup>4</sup>	6–9 тыс.	–
На МИС (менее 10 логических вентилях или базовых ячеек памяти на кристалле)	350–500	600–900	10 : 1
На СИС (100 вентилях или базовых ячеек памяти на кристалле)	125–150	250–450	20 : 1
На БИС (более 100 вентилях или базовых ячеек памяти)	7–10	100–200	50 : 1
СБИС однокристалльной микро-ЭВМ	1	5–10	1000 : 1

\* Без учета стоимости соединительных плат, кабелей, коужа.

мимо малого тока переключения, характеризуются также и очень низким сопротивлением во включенном состоянии: 0,01 Ом для прибора типа ВU210 и 0,2 Ом для прибора типа ВU220. Такие параметры достигнуты благодаря изготовлению транзисторов на кремниевых пластинах высокой степени чистоты, полученных из слитков, выращенных методом зонной плавки.

Вертикальная структура ДМОП транзистора изготавливается путем осаждения кремниевое эпитаксиальное слоя p-типа, в котором методом ионного внедрения создаются барьерная зона p<sup>+</sup>-типа и область истока n<sup>+</sup>-типа. На эту пленку осаждают слой поликристаллического кремния p<sup>+</sup>-типа, в котором создается сетка затворов, образующих отдельные ячейки транзистора (на кристалле со стороной квадрата 4 мм размещается сетка из 3000 ДМОП ячеек).

Новые транзисторы монтируются в пластмассовый корпус ТО-220. Специалистами фирмы Texas Instruments созданы новые МОП-транзисторы с V-образным каналом (на значения выходного напряжения 40, 60 и 80 В), характеризующиеся высоким входным сопротивлением и малым временем переключения (время включения 10 нс, время выключения — 15 нс).

Ведется также разработка приборов на величину напряжения сток-исток до 1000 В, а также быстродействующих тиристоров и триаков средней мощности, изготавливаемых по Sipmos технологии.

Специалистами Центральной национальной лаборатории средств дальней связи Франции предложена ИС на базе МОП транзистора с несколькими стоками, служащими выходами прибора, общим входом которого является затвор. К достоинствам нового транзистора с несколькими стоками относят возможность использования методов машинного проектирования при конструировании МОП схем на его основе, высокие плотность размещения элементов (теоретически до 250 логических элементов на пластине площадью 1 мм при ширине затвора 8 мкм) и быстродействие (время задержки распространения сигнала 4 нс).

Утверждается, что новый МОП элемент по своим параметрам и плотности размещения элементов сопоставим с И<sup>2</sup>Л приборами в биполярных ИС. Однако мощность, потребляемая МОП элементом, больше, чем у И<sup>2</sup>Л устройств, поскольку вход вентиля нового элемента управляется p-канальным транзистором, работающим в режиме объединения. Кроме того, из-за использования в качестве затвора пленки поликристаллического кремния малой толщины емкость между затвором и истоком примерно в три раза больше входной емкости И<sup>2</sup>Л приборов. Величина произведения мощности на быстродействие для МОП элемента с несколькими стоками равна 1 пДж (при напряжении 5 В), что значительно больше, чем у И<sup>2</sup>Л вентиля аналогичных размеров [8, 9].

По мнению зарубежных экспертов, уменьшение габаритов и веса, повышение надежности и уменьшение чувствительности к колебаниям сети у ключевых стабилизаторов возможно путем применения мощных МОП транзисторов. Первый шаг в этом направлении

сделан фирмой Hewlett-Packard, выпустившей серию ключевых стабилизаторов на полевых транзисторах, работающих на частоте 200 кГц (что на порядок больше частоты лучших современных стабилизаторов на мощных переключаемых биполярных транзисторах). Стоимость новых приборов выше ключевых стабилизаторов на биполярных транзисторах (154 долл. против 50—90 долл.), но несмотря на это ожидается, что через три—пять лет они появятся на коммерческом рынке, так как обладают высокой надежностью.

Фирма Hewlett-Packard в технических спецификациях на новую серию стабилизаторов гарантирует среднее время наработки на отказ 100 тыс.ч (для стабилизаторов на биполярных транзисторах среднее время наработки на отказ равно ~ 60 тыс.ч). Это достигается в основном благодаря уменьшению числа компонентов стабилизатора: в ключевом устройстве на биполярных транзисторах с одним выходом используется в среднем 100—120 компонентов, тогда как в новой серии число их уменьшено на 20% [10].

Согласно прогнозам фирмы Lockheed, к 1985 г. частота логических ИС на арсениде галлия превысит 4 ГГц, что почти на порядок лучше планируемых значений быстродействия ЭСЛ и КМОП/КНС схем. Аналогичная ситуация ожидается и для дискретных полевых транзисторов на арсениде галлия, частота которых будет равна 40 ГГц. Этот прогноз основан на успехах в создании ИС с временем задержки сигнала порядка нескольких десятков пикосекунд, уже достигнутых специалистами фирм Lockheed, "Ниппон дэнва дэнсин кося" и Rockwell International. Работы по созданию быстродействующих схем на арсениде галлия стимулируются необходимостью обеспечения высокой скорости передачи данных будущих космических систем связи, объем обрабатываемых данных которых к концу этого десятилетия увеличится более чем в 10 тыс. раз в сравнении с современным уровнем (10<sup>15</sup> бит/год). В настоящее время специалистами фирмы Lockheed Missile and Space Co уже создана опытная схема статического ЗУПВ, работающая от источника питания на напряжении ±0,5 В, с временем задержки сигнала в вентиле 100 нс. В схеме используются триггеры с перекрестной связью и с нагрузочными транзисторами, работающими в режиме обеднения (такая структура обычно используется в МОП схемах статических ЗУПВ). Выбор в качестве нагрузки транзисторов, работающих в режиме обеднения, обусловлен лучшими характеристиками и менее жесткими требованиями, предъявляемыми к напряжению отсечки, в сравнении с транзисторами, работающими в режиме обогащения. Объединение в одной схеме двух типов транзисторов позволяет получить высокую плотность размещения элементов (размер базовой ячейки 57х40 мкм при ширине линий 1 мкм) и низкую потребляемую мощность (0,5 мВт на вентиль). Вся схема размещается на кристалле размером 508х254 мкм.

В будущем специалисты фирмы планируют освоить производство схем ЗУ на арсениде галлия с быстродействием в три—пять раз большим, чем у кремниевых приборов. По мнению разработ-

чиков, время выборки промышленных вариантов схем с линиями шириной 2 мкм должно лежать в пределах от 5 до 10 нс, схем с линиями шириной 1 мкм — от 2 до 4 нс. Время задержки распространения сигнала в вентиле опытной логической схемы на арсениде галлия равно 50 нс, что соответствует тактовой частоте 2 ГГц. В наиболее быстродействующих современных ИС (ЭСЛ схемах) время задержки сигнала в вентиле лежит в диапазоне 700 пс — 2 нс.

На следующем этапе предполагается создать схему предварительного счетчика импульсов с делителями на два (для этой схемы уже разработан набор фотомаскиров). Кроме того, планируется разработать двухразрядный сумматор и схему ЗУ емкостью 16 бит, а также провести испытание различных буферных и декодирующих логических устройств.

Специалистами фирмы "Ниппон дэнва дэнсин кося" созданы опытная ИС на арсениде галлия, содержащая 15-каскадный кольцевой генератор с временем задержки сигнала в вентиле 30 пс, и предварительные счетчики импульсов с делителями на два и восемь, работающие на частоте 3 ГГц. Отмечается, что схема изготавливалась с помощью метода непосредственной электролитографии. Длина затворов в схеме равна 0,5 мкм. В схемах на приборах Джозефсона, разработанных на фирме IBM, время задержки сигнала в вентиле равно 13 пс. Однако эти схемы работают только при криогенных температурах.

Усилия специалистов фирмы Rockwell International Corp. направлены на создание ИС с малой рассеиваемой мощностью, содержащих полевые транзисторы с затвором на основе барьера Шоттки и изготавливаемых по методу многократного ионного внедрения. На фирме уже разработана схема кольцевого генератора с временем задержки 62 пс, а также схема параллельного умножителя 5х5, содержащего 260 вентилях с временем задержки сигнала в каждом 150 пс. Ширина линий в схемах, изготавливаемых с помощью фотолитографии с мультипликацией изображения, равна 1 мкм. В 1980 г. специалисты фирмы намерены приступить к разработке схемы статического ЗУПВ емкостью 4К бит с временем выборки 1—2 нс [11].

Специалистами Бюро научных исследований ВМС США предложен метод улучшения рабочих характеристик и надежности приборов на арсениде галлия за счет легирования исходного материала примесью, образующими большие, немигрирующие в решетке комплексы.

Исследования показали, что основным фактором, влияющим на распределение примесей, являются механические нагрузки. Так, например, кремний в арсениде галлия остается подвижным в решетке и после отжига кристалла. Однако внедрение еще серы или селена в арсенид галлия приводит к образованию больших комплексов, не способных перемещаться в кристаллической решетке, при этом кремний занимает положение галлия в решетке, а сера или селен — положение мышьяка.

Эти теоретические исследования подтверждены экспериментально работами, проведенными на фирме Varian, где с помощью новой технологии изго-

товлены полевые транзисторы на арсениде галлия X-диапазона (8,2–12,4 ГГц) с коэффициентом шума и усиления на частоте 8 ГГц, равным соответственно 1,19 и 14 дБ при размерах затвора 0,2х5 мкм [12].

**Квантовая электроника.** В области квантовой электроники усилия зарубежных специалистов в настоящее время сосредоточены на расширении сферы применения лазеров — в технологическом оборудовании, локационных системах, устройствах военного назначения и т. д.

Специалисты фирмы Apollo Lasers Inc., которые уже восемь лет выступают в роли поставщика промышленных CO<sub>2</sub> лазеров, утверждают, что для скрайбирования гибридных схем наиболее подходящим является импульсный CO<sub>2</sub> лазер средней мощности (непрерывные лазеры мощностью 150–200 Вт отличаются более высокой стоимостью из-за сложных оптических компонентов и схем питания).

Специалистами этой фирмы разработана установка лазерного скрайбирования керамических подложек, которая программируется с помощью контроллера на базе микропроцессора фирмы Automation Unlimited Inc. Установка управляется вручную или автоматически в соответствии с программой, хранимой на магнитной ленте. Стоимость установки составляет 49 тыс. долл., что в два раза меньше стоимости существующих устройств.

По мнению разработчиков, важным достоинством новой установки является конструкция, предохраняющая оператора от прямого воздействия лазерного излучения. Рабочее место заключено в защитный кожух с окнами, снабженными блокировкой. Это позволяет также уберечь дорогие гибридные компоненты от повреждения и повысить процент выхода годных подложек [14].

В настоящее время при изготовлении СБИС все шире начинают использоваться методы обработки пластин лазерным излучением или электронным пучком. Лазерный отжиг пластин применяется после ионного внедрения с целью восстановления дефектов кристаллической решетки. Проведенные специалистами фирмы Hughes исследования показали возможность применения лазерной обработки для улучшения слоя металлизации, осаждаемого на ступеньки окисла при изготовлении схем по технологии "кремний на сапфире", для улучшения условий осаждения окисла в многослойной поликристаллической структуре и для уменьшения чувствительности поликристаллических резисторов к дозе внедряемых ионов. По мнению специалистов фирмы Quantronix Corp., весьма перспективно применение лазерного излучения для геттерирования (уменьшения концентрации подвижных дефектов и определенных примесей в кристаллической решетке, внесенных в результате ее нарушения, или при химической обработке).

Во второй половине 80-х годов можно ожидать радикальных изменений процессов изготовления ИС. Так, на фирме Hughes создана система, в вакуумной камере которой установлены устройства электронно-лучевого испарения и ионного внедрения. Окно в

стенке камеры позволяет использовать и лазерное излучение. Возможно, в будущем один или более ионных пучков в одной вакуумной камере смогут использоваться для осаждения, экспонирования, удаления и травления пластин [15].

Специалистами фирмы IBM создана экспериментальная установка для проведения процесса гальваностегии с использованием лазерного излучения.

В установке использовались катоды из вольфрама, молибдена или никеля в виде пленок толщиной ~0,1 мкм, напыленных на стеклянные подложки, и аноды из платины или из металла, осаждение которого производят. Процесс гальваностегии проводился при напряжении 1,5 В в растворах солей золота, никеля или меди. В установке использовалось излучение генерируемых в непрерывном режиме аргонового (выходная мощность 1,5 Вт) или криптонового (выходная мощность ~0,1 Вт) лазеров с механическим модулятором света, дающим миллисекундные оптические импульсы. Новая технология, по сравнению со стандартными методами, позволила значительно увеличить скорость проведения процесса гальваностегии (в 600–1000 раз) и уменьшить области осаждения (до 4 мкм в диаметре) [16].

Это достигается благодаря большим температурным градиентам, возникающим под действием направленного лазерного пучка. Хотя абсолютная разность температур невелика (50°C для лазерного пучка диаметром 300 мкм и мощностью 500 мВт), это температурное изменение происходит на весьма малом расстоянии, в результате чего возникает эффект конвекции.

Установка может использоваться и для проведения обратного процесса — электротравления, при этом скорость процесса увеличивается в 10 тыс. раз. В этом случае материал на подложке обладает положительным зарядом и конвекционные токи, вызванные действием сфокусированного лазерного пучка, приводят к снятию вещества с областей, подвергающихся действию лазерного излучения.

Специалистами фирмы Westinghouse Hanford Co. (США) разработана лазерная установка для испытаний образцов различных сплавов, из которых изготавливаются контакты термоядерного реактора.

В используемых до последнего времени методах испытаний таких сплавов параметры образца (длина и диаметр) измеряются непосредственно, что является довольно длительным процессом. В новой установке измерения проводятся путем использования отраженного лазерного излучения, что в шесть–семь раз сокращает время испытания одного образца до 45 с (против 6 мин для методов непосредственного измерения параметров образца).

В связи с созданием лазеров с дифракционно-ограниченным пучком и стабилизированной частотой появилась возможность создания оптических локационных систем (ОЛС) промышленного и военного назначения. По мнению промышленных экспертов, в ближайшее десятилетие в Австралии будет освоено серийное производство современных ОЛС. Специалистами стран Общего рынка проводятся совместные исследования в области разработки методов контроля и измерения загрязне-

ния окружающей среды с использованием ОЛС.

В когерентной оптической локационной системе используется излучение двух лазеров: источника сигнала и гетеродина. Информацию получают путем смешения отраженного излучения и излучения лазера гетеродина. Согласно мнению специалистов, наиболее подходящим для ОЛС является CO<sub>2</sub> лазер атмосферного давления с поперечной накачкой, излучающий импульсы с высокими значениями энергии и частоты повторения.

Специалисты Аделиадской лаборатории группы Quantron (в которую входит несколько австралийских фирм и Исследовательский центр обороны) работают над созданием коммерческого образца модульной ОЛС. В настоящее время же созданы и запатентованы четыре модуля. Конструкция модульной ОЛС позволяет использовать практически любой тип лазера независимо от мощности излучения и частоты повторения импульсов. Состоящий из трех зеркал модуль управления лучом обеспечивает качание луча от -10° до +130° в вертикальном направлении и до 40° — в азимутальном [18–20]. Следящие зеркала систем отличаются сложной структурой. Центральная часть зеркал покрыта устойчивым к интенсивному выходному излучению и хорошо отражающим слоем. Для повышения вероятности улавливания отраженного излучения внешний кольцевой слой зеркала имеет большую площадь и достаточно высокий коэффициент отражения.

По мнению американских специалистов, к 1990 г. АИГ лазеры, используемые в настоящее время в дальных номерах, будут заменены лазерами на углекислом газе.

Однако дымовые завесы на основе белого и красного фосфора, а также гексахлорэтана лучше пропускают излучение CO<sub>2</sub> лазера с длиной волны 10,6 мкм, чем излучение АИГ лазера с длиной волны 1,06 мкм. Так, для фосфорного дыма в диапазоне длин волн от 8 до 12 мкм коэффициент поглощения составляет 0,36 м<sup>2</sup>/г и 1,1 м<sup>2</sup>/г для дымовых смесей на основе гексахлорэтана, тогда как в нижнем инфракрасном диапазоне коэффициент поглощения равен 2,30 м<sup>2</sup>/г и 3,0 м<sup>2</sup>/г соответственно. К достоинствам дальномеров на основе CO<sub>2</sub> лазеров относятся возможность использования их совместно с инфракрасными приборами ночного видения, которые обладают высокой чувствительностью в диапазоне длин волн от 8 до 14 мкм.

Согласно мнению специалистов, дальномер на CO<sub>2</sub> лазере безопасен для человека на расстоянии 30 см от апертуры, тогда как дальномер на АИГ лазере представляет опасность на расстоянии более 1 км. Это преимущество обусловлено тем, что излучение CO<sub>2</sub> лазера поглощается в верхнем слое роговой оболочки, а не фокусируется хрусталиком как излучение АИГ лазера, поэтому резко снижается вероятность повреждения сетчатки глаза человека, находящегося, в радиусе действия дальномеров. Кроме того, важным преимуществом CO<sub>2</sub> лазера по сравнению с АИГ лазером является более высокий КПД, а также малая расходимость и высокая однородность пучка.

В настоящее время уже проводятся испытания устройств, которые совмещают в себе дальномер на CO<sub>2</sub> лазере и инфракрасный прибор ночного видения.

Предпочтение в таких устройствах отдано компактным маломощным CO<sub>2</sub> лазерам атмосферного давления с поперечной накачкой. Благодаря резкому переднему фронту импульса (время нарастания менее 20 нс) обеспечивается достаточно высокая точность определения расстояния до цели. Возможность перестройки длины волны излучения в диапазоне от 9 до 11 мкм позволяет преодолевать РПД.

Американскими специалистами исследуются возможности применения маломощных лазеров на CO<sub>2</sub> и в других приборах (датчиках бокового ветра, лазерных измерителях скорости), однако для большинства из них требуются лазеры с частотной стабилизацией [21].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Microwaves*, 1980, v.19, N 2, pp.67-69.
2. *Microwave Journal*, 1980, v.23, N 3, pp.51-54, 56.
3. *Microwave Journal*, 1980, v.23, N 3, pp.31-34.
4. *Electronics*, 1980, v.53, N 12, pp.82, 83.
5. *Microwaves*, 1980, v.19, N 2, p.26.
6. *Electronics*, 1980, v.53, N 13, pp.138-142.
7. *Electronic Design*, 1980, v.28, N 7, pp.27, 28.
8. *Electronics*, 1980, v.53, N 13, pp.73, 74.
9. *Inter Electronique*, 1980, N 308, pp.24, 25.
10. *Electronics*, 1980, v.53, N 15, pp.46, 48.
11. *Electronics*, 1980, v.53, N 16, pp.40, 41.
12. *EDN*, 1980, v.28, N 10, pp.37,38.
13. *Electronics*, q 1980, v.53, N 17, pp.82-84.
14. *Electronics*, 1980, v.53, N 14, p.216.
15. *Electronics*, 1980, v.53, pp.122-124.
16. *Solid State Technology*, v. 23, N 2, p.76.
17. *Industrial Research/Development*, 1980, v.22, N 2, pp.94, 95.
18. *Electro-optical systems design*, 1980, v.12, N 7, p.22.
19. *Laser Focus*, 1980, v.16, N 6, pp.38, 40.
20. *Laser Focus*, 1980, v.16, N 4, pp.46, 48.
21. *Laser Focus*, 1980, v.16, N 6, pp.42, 44, 46, 48.

Н.А. Пащенко

## РЕКЛАМА

УДК 621.387.322.31

### ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ИНДИКАТОРНЫЕ КРУПНОЭЛЕМЕНТНЫЕ ПАНЕЛИ ИГПП-32/32 И ИГПП-16/32

Предназначены для формирования устройств отображения информации о ходе производственных процессов, авиаполетов, в системе коллективного обучения, электронных часах.

Размеры светового элемента обеспечивают уверенное восприятие информации с расстояния 15—20 м при минимальном формате знакоместа. При большем формате знакоместа это расстояние значительно увеличивается.

Каждая панель состоит из двух стеклянных пластин, между которыми расположены взаимно перпендикулярные системы анодных и катодных электродов. Рабочее положение панелей — любое. Охлаждение — естественное.

Конструкция индикаторов позволяет собирать экраны из крупных блоков, а не из множества отдельных знакомест, что обеспечивает возможность создания экранов любых размеров и конфигураций без потери информации по полю экрана в местах стыковки ГИП и отображать на экране как статическую, так и «бегущую» информацию.

Индикаторы обладают малым разбросом по яркости (не более 25% от номинального).

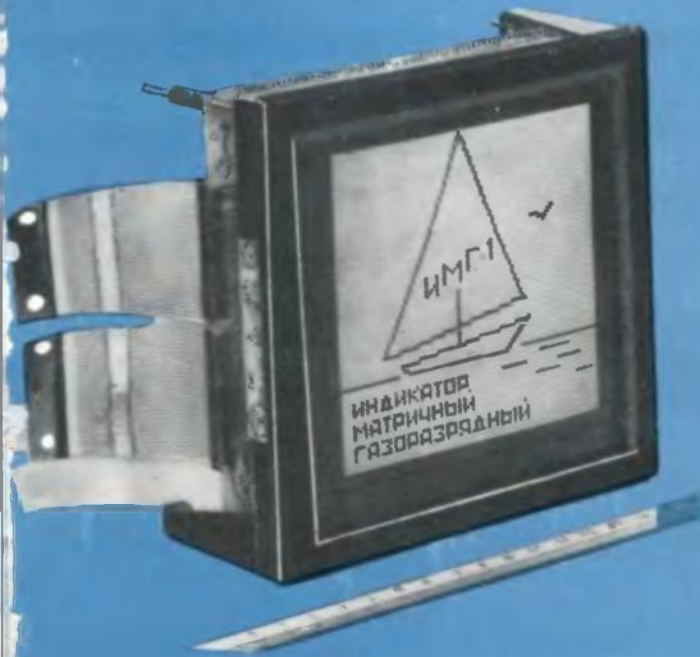
Технические характеристики	ИГПП-32/32	ИГПП-16/32
Информационная емкость, св.эл. ....	1024	512
Размер светового элемента, мм ....	3x3	3x3
Шаг элемента, мм ....	6	6
Количество отображаемых знаков		
при формате 5x7 элементов ....	до 16	до 8
при формате 10x14 элементов ....	до 4	до 2
Яркость свечения, кд/м <sup>2</sup> (не менее) ....	160	160
Цвет свечения ....	зеленый	зеленый
Угол обзора, град (не менее) ....	±45	±45
Напряжение питания анодов, В ....	200±5	200±5
Средний ресурс, ч ....	10000	10000
Мощность, потребляемая световым элементом, мВт (не более) ....	20	20
Габариты, мм ....	193x193x32	193x97x32
Масса, кг (не более) ....	1,2	0,6

Ю. И. Орлов

Заявки на приобретение направлять в магазины-салоны «Электроника» по адресам:  
196221, г. Ленинград, проспект Гагарина, 12;  
394030, г. Воронеж, ул. Кольцовская, 46.

УДК 621.387.322.31

ИНДИКАТОР  
МАТРИЧНЫЙ  
ГАЗОРАЗРЯДНЫЙ  
**ИМГ-1**



Техническая характеристика

Информационная емкость, св.эл. ....	100x100
Шаг световых элементов, мм .....	1
Яркость элементов (средняя), кд/м <sup>2</sup> .....	не менее 50
Цвет свечения .....	оранжево-красный
Напряжение источника питания, В .....	5±5%
	250 +1%
	-3%

Разрядность управляющих сигналов:

по координате X (развертка) ....	2 разряда двоично-десятичного кода
по координате Y (информация), бит .....	100
Уровни управляющих сигналов .....	ТТЛ
Частота регенерации изображения по координате X, Гц .....	от 10 до 100
Рабочая температура окружающей среды, °С .....	от -10 до +45
Минимальная наработка на отказ, ч .....	не менее 2000
Габариты (с монтажной платой потребителя), мм .....	145x145x67
Масса, кг .....	не более 0,8
Потребляемая мощность, Вт .....	не более 10

Индикаторный модуль на основе плоской газоразрядной панели со схемой управления, согласованной с ИС ТТЛ-типа, предназначен для преобразования электрических сигналов в видимое изображение, синтезированное из дискретных световых элементов в системе X—У координат. Позволяет отображать с точностью до 1° знаковую, графическую и гистограммную информацию с возможностью выделения полутонов.

Индикатор применяется в измерительной технике (цифровых осциллографах, анализаторах спектра, характериографах, в устройствах ввода-вывода ЭВМ); в приборостроении (дефектоскопах, станках с ЧПУ), в различных устройствах отображения информации в полиграфии, связи, медицине, нефтехимии, атомной энергетике, а также в других областях народного хозяйства.

Экраном индикатора является газоразрядная индикаторная панель (ГИП) постоянного тока с информационной емкостью 10 элементов индикации.

Газоразрядная индикаторная панель не обладает свойством внутренней памяти, что определяет возможность синтезирования изображений из ее ячеек только в режиме развертки. Развертка осуществляется по катодным электродам панели, принятым за координату X экрана индикатора посредством катодного коммутатора. Информационные сигналы подаются на анодные электроды ГИП (координаты у экрана) при помощи анодных ключевых элементов.

Цифровое управление и малые габариты ИМГ-1 создают возможности для комплексной микроминиатюризации аппаратуры.

Прибор не имеет прямых аналогов за рубежом. На Всесоюзном конкурсе по микроминиатюризации радиоэлектронных устройств отмечен второй премией. Аттестован государственным Знаком качества.

В. ИЛОБАН

Отсутствуют за выпуск С. И. Баранова, Л. И. Васильева  
Художник Л. А. Чернецова Технический редактор Г. М. Корнилова  
Корректоры Н. С. Рудяккин, Л. П. Демьянкова



Подписано в печать 24. 11. 90  
Т-20436 Формат 60x90/8 Объем 8,5 п. л.  
Уч.-изд. л. 10 Индекс 38.33 24 статьи, 5 рис.  
Заказ 1137 Тираж 3900 Цена 2 руб. 90 коп.

Производственно-издательский отдел ЦНИИ "Электроника"

Москва, 117415, проспект Варшавского, 39



