

электронная промышленность

ISSN 0207-6357

4 / 93

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СЛОИ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

**ЭЛЕКТРОННОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ КОРПУСОВ
БИС И СБИС НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА**

**ИК ФОТОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА
НА УЗКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

АМОРФНЫЙ КРЕМНИЙ В ТЕХНОЛОГИИ СБИС

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

**ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ
МАТЕРИАЛОВ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ**

НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА

**ПРИМЕНЕНИЕ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ
В МЕДИЦИНЕ**

MICROELECTRONICS AND SEMICONDUCTOR DEVICES.

- EPITAXIAL GaAs FILMS FOR SCHOTTKY-BARRIER DEVICES.
- PACKAGING NANOSECOND LSI AND VLSI.
- IR PHOTORECEIVER IC's ON NARROW-BAND SEMICONDUCTORS.
- APPLICATION OF AMORPHOUS SI THIN FILMS IN VLSI PROM.
- CLEANING Si WAFERS FROM ORGANIC CONTAMINATIONS.

RADIOCOMPONENTS.

- THIN-FILM RESISTORS.
- CURRENT SENSORS.

CONTENTS

MICROELECTRONICS AND SEMICONDUCTOR DEVICES.

New High Technology

- Epitaxial GaAs Films for Schottky-Barrier Devices. Tolstihin J. L., Lukash V. S., Kravchenko P. K., Romanova M. N. 2
- Packaging Nanosecond LSI and VLSI. Kontarev V. J., Panov V. N., Bogdanov D. P. 6
- IR Photoreceiver IC's on Narrow-Band Semiconductors. Velichko A. A., Okomelchenko I. A. 15
- Application of Amorphous Si Thin Films in VLSI PROM. Budagjan B. G., Filatova I. V., Sazonov A. J., Trajkis T. P., Scheinin J. I. 22
- Electrochemical Metallization of GaAs Wafers. Samsonenko B. N., Panasenko P. V., Sorokin I. N., Sygatchiov A. V., Streltsov V. S. 26

Industry Technology

- Cleaning Si Wafers from Organic Contaminations. Bokarev V. P., Vahrushev M. J., Gizatullin M. R., Balychenko A. A., Grebenkov V. S., Popov A. P. 33
- An Effective Method for Photoresistive Mask Processing. Andzulene B. K., Sutskal J. I., Andzulis A. A. 35
- Increasing Material Corrosion Resistance by Ion-Beam Implantation. Novohrost V. V. 63

RELIABILITY AND QUALITY CONTROL

- Determination of Substrate Surface Purity. Kolpakov A. I. 37
- The LC Nematic Probe Construction and Application for Analyzing IC's Defects and Failures. Klimenko A. S., Moshel N. V., Surjena Z. J. 40
- Technology Provision for LC Methods of Thin Film Quality Control. Klimenko A. S., Moshel N. V., Surjena Z. J. 42
- Thermal Force — the Most Effective Method for Galvanic Platings Adhesion Strength Evaluation. Emeljanov V. A., Anufriev L. P. 45
- Semiconductor Subsurface Layers Control by Local Melting. Loginov V. A., Plotnikov A. I., Rembeza S. I. 47
- Microgrid Quality Control in Manufacturing Process. Avtonomov V. A., Lukov J. F., Sedunov B. I., Uzdovsky V. V., Uzdovskaja N. V. 53
- Vacuum Devices Undestructive Pressure Control. Sokolov M. J., Mychkovsky J. G. 55
- RADIOCOMPONENTS**
- Thin-Film Resistors. Bendere R. B., Elfimova G. P., Kalnach J. V., Ozołos K. K. 57
- Current Sensors. Bolotin O. A., Portnoy G. J., Rojenov A. V. 59

Электронная промышленность

КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ОТРАСЛЯМ
ОБОРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
Главное управление
электронной промышленности
НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С 1970 г.
г. МОСКВА

Главный редактор
Ю.А. КОЗЛОВ

4 / 93

OldPC.su

музей компьютеров

СОДЕРЖАНИЕ

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Новости науки

Эпитаксиальные слои арсенида галлия для приборов с барьером Мотта. *Толстихин Ю. П., Лукаш В. С., Кравченко П. К., Ромашова М. Н.*

Исследование спектральной чувствительности рентгено-резистов с помощью дифракционной решетки. *Акимов А. В., Александров Ю. М., Алехин А. П., Мурашова В. А., Сулин В. В., Федорчук Р. В., Якименко М. Н.*

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Новые изделия

Проблемы электронного конструирования корпусов БИС и СБИС наносекундного диапазона. *Контарев В. Я., Ланов В. Н., Богданов Д. П.*
Опыт конструирования высоконадежных ИС ТТЛ. *Кудинов А. И., Петров Б. К.*

Интегральные ИК фотоприемные устройства на основе узкозонных полупроводников. *Величко А. А., Окомельченко И. А.*

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Новые наукоемкие технологии

Использование тонких пленок аморфного кремния в технологии СБИС ППЗУ. *Будагян Б. Г., Филатова И. В., Сазонов А. Ю., Трайнис Т. П., Щетинин Ю. И.*

Осаждение омических контактов в полевых транзисторах с меза-изоляция. *Самсоненко Б. Н., Панасенко П. В., Сорокин И. Н.*

Получение Au-Ge контактов в планарной технологии. *Самсоненко Б. Н., Сизачев А. В., Сорокин И. Н.*

Формирование разводки из золота на подслое ванадия-никель. *Самсоненко Б. Н., Стрельцов В. С.*

Применение локального маскирования при электрохимическом осаждении Au-Ge контактов. *Самсоненко Б. Н., Панасенко П. В.*

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Промышленные технологии

Очистка пластин кремния от органических примесей. *Божарев В. П., Вахрушев М. Ю., Гизатуллин М. Р., Бальченко А. А., Гребеньков В. С., Попов А. П.*

Эффективный метод обработки фоторезистивной маски. *Анджюлене Б. К., Суцкель Я. И., Анджюлис А. А.* 35

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Надежность и контроль качества

Метод определения чистоты поверхности подложек. *Колпаков А. И.* 37

Конструкции и применение НЖК-зонда при анализе причин брака и отказов ИС. *Клименко А. С., Мошель Н. В., Суржина З. Я.* 40

2 Технологическое обеспечение ЖК-методов контроля качества тонких пленок. *Клименко А. С., Мошель Н. В., Суржина З. Я.* 42

5 Метод термического воздействия — наиболее эффективный для оценки прочности сцепления гальванического покрытия. *Емельянов В. А., Ануфриев Л. П.* 45

Контроль приповерхностных слоев полупроводников методом локального плавления. *Логонов В. А., Плотиных А. И., Рембеза С. И.* 47

6 Методология тестирования однокристалльных микроконтроллеров серии K1814. *Введенский А. Е., Златопольский В. Н., Третьякова Г. К., Филатов М. Ю., Шадрин И. А.* 50

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ И ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ

11 Надежность и контроль качества
Контроль качества микросеток в процессе производства. *Автономов В. А., Луков Ю. Ф., Седунов Б. И., Уздовский В. В.* 53

15 Контроль давления в электривакуумных приборах неразрушающим способом. *Соколов М. Ю., Мычковский Ю. Г.* 55

РАДИОДЕТАЛИ И КОМПОНЕНТЫ

Новые изделия

22 Тонкопленочные резисторы. *Бендере Р. Б., Елфимова Г. П., Калнач Я. В., Озолос К. К.* 57

26 Датчики измерения тока. *Болотин О. А., Портной Г. Я., Рожнов А. В.* 59

ЭЛЕКТРОНИКА И МЕДИЦИНА

28 Зарубежная электронная техника
Применение ионно-лучевой технологии в медицине. *Сиошанси П.* 60

ЗАРУБЕЖНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

32 Повышение коррозионной стойкости материалов ионной имплантацией. *Новохрост В. В.* 63

30 Монолитные ИС мм-диапазона для автомобильных устройств

АППАРАТУРА И СИСТЕМЫ

33 Машинное зрение в технологических процессах. *Вальков В. М.* 68

Графический процессор. *Петух А. М., Такса А. Ф., Ободник Д. Т., Олиферович И. Е., Денисюк В. А.* 72

Адрес редакции: 117415, Москва, просп. Вернадского, 39

Тел.: 432-92-72, 432-92-27, 432-91-89

© ЦНИИ "Электроника" 1993

Эпитаксиальные слои арсенида галлия для приборов с барьером Мотта

Ю.Л.ТОЛСТИХИН, В.С.ЛУКАШ, П.К.КРАВЧЕНКО, М.Н.РОМАХОВА

Показано, что при получении резких концентрационных переходов в структурах арсенида галлия $n^{++}n$ — типа ориентации (111)А хлоридным методом введение в газовый поток аргона не оказывает ощутимого влияния на переход в случаях, когда обеспечены условия кинетического ограничения скорости роста. Использование сравнительно низких температур наращивания (650–660°С) дает возможность получать структуры с параметрами, пригодными для приборов с барьером Мотта, без использования инертных газов.

Для получения смесительных и детекторных приборов с переходом Мотта требуется полупроводниковый материал с резким концентрационным профилем между высоколегированным буферным n^{++} и слаболегированным субмикронных размеров рабочим n -эпитаксиальным слоями. Вопросы, связанные с уменьшением переходного слоя в структурах GaAs ориентации (100), достаточно рассмотрены в работах [1–3]. Общими принципами получения резких концентрационных переходов являются применение отдельных зон наращивания слоев с различными уровнями легирования [4], низкая скорость захвата легирующей примеси при достаточно высокой скорости эпитаксиального роста [5], снижение скорости роста слоев вплоть до нулевой за счет введения в зону роста дополнительного потока хлористого водорода [6], увеличение концентрации инертного газа в зоне роста [3], снижение температуры наращивания [7].

В последнее время значительный практический интерес представляет арсенид галлия ориентации (111)А, на котором могут быть получены приборы с улучшенными шумовыми характеристиками. Механизмы эпитаксиального роста арсенида галлия ориентаций (111)А и (100) существенно различаются. Причем, первый недостаточно изучен, для него требуется определить условия устойчивого получения резких концентрационных переходов.

В условиях диффузионного эпитаксиального роста в системе с отдельными зонами наращи-

вания «размытие» концентрационного перехода между слоями происходит за счет легирующей примеси, попавшей под кварцевую перегородку в зону роста слаболегированного материала противодиффузией во время роста буферного n^{++} -слоя и «захваченной» подложкой при смене зон наращивания, а также за счет автолегирования. В области поверхностной кинетики скорость захвата примеси определяется давлением пара примеси и кинетическим коэффициентом поверхности материала [8]. Ясно, что воспроизводимое получение заданных параметров слоев возможно лишь в условиях кинетического ограничения скорости вхождения примеси, где термодинамическая система устойчива к флуктуациям режимов наращивания. [8]. Проведено исследование влияния ростовых факторов на вхождение легирующей примеси в эпитаксиальные слои арсенида галлия с ориентацией (111)А, в результате чего определены эти условия для структур с резким концентрационным переходом между слоями n -типа с различным уровнем легирования.

Как и при исследованиях режимов наращивания структур арсенида галлия с ориентацией (100) [9], рассмотрено влияние концентрации треххлористого мышьяка, инертного газа и легирующей примеси в газовой фазе на резкость концентрационного перехода при различных температурах наращивания.

Исследования проводились с использованием горизонтального кварцевого реактора с отдельными зонами наращивания буферного высоколегированного и рабочего слаболегированного слоев толщиной 3–5 и 0,1–0,2 мкм, соответственно, в газотранспортной системе Ga—AsCl₃—AsCl₃(SnCl₄)—H₂—Ar. Подробно методика эксперимента изложена в работах [3, 9]. В качестве подложечного материала использовались пластины АГЧП-2 (111)А с разориентацией 2° в направлении к (011).

Обычно для сравнения различных видов концентрационных переходов используется угол наклона профиля при постоянном значении градиента концентрации носителей заряда в этой области, определяемый выражением

$$\alpha = \arctg \{ A^2(2S)^{-1} \},$$

где A — расстояние, на котором уровень концентрации носителей изменяется от n_1 до n_2 , S — площадь участка, ограниченного переходной областью и осью абсцисс [10].

Оценку крутизны концентрационного перехода от высоколегированного слоя к слаболегированному толщиной 0,1–0,2 мкм удобно проводить с использованием коэффициентов перекрытия по емкости k_1 , k_2 , равных $C_0/C_{0,2}$ и C_0/C_{-1} , соответственно, где C_0 , $C_{-0,2}$, C_{-1} — емкости контакта ртуть—арсенид галлия при отрицательных напряжениях смещения, которые равны 0; 0,2; 1,0 В, соответственно [11].

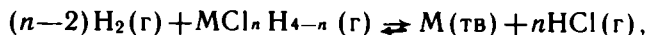
Согласно проведенной по этой методике оценке крутизны концентрационного перехода между эпитаксиальными слоями, отличающимися уровнями легирования на 1,5–2,0 порядка, как и в случае ориентации (100) [9], выполнение условий $C_0/C_{-0,2} < 1,02$; $C_0/C_{-1} < 1,06$ позволяет получать структуры для приборов с переходом Мотта.

Удобство такого определения крутизны концентрационного перехода для рассматриваемых структур по сравнению с использованной в работе [10] заключается в его простоте и наглядности. Тем более, что в соответствии с методикой вольт-емкостных измерений и определения величин, характеризующих крутизну перехода, коэффициенты перекрытия связаны с углом α и длиной переходного слоя d :

$$\alpha \sim (k-1)^2 / (2-k^2); \quad d \sim (k-1) / (k+1).$$

Коэффициенты перекрытия, получаемые из вольт-емкостных измерений, позволяют практически однозначно определить пригодность структуры для изготовления перехода Мотта.

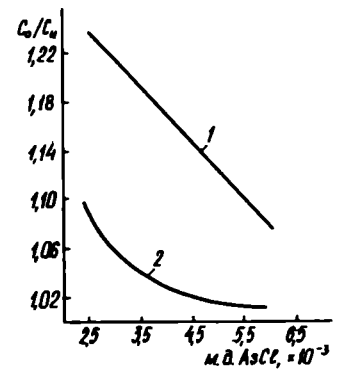
Увеличение содержания трихлорида мышьяка в газовой фазе приводит к формированию более резкой границы перехода (рис. 1). Во всех экспериментах линейная скорость газового потока составляла 0,67 см/с, температура источника Ga и зон роста — 770 и 680°C соответственно. Как и для структур GaAs ориентации (100) [9], происходит значительное снижение коэффициентов перекрытия по емкости. При увеличении мольной доли треххлористого мышьяка реакция



где M — элемент 4 группы, смещается влево [12]. Хлористый водород связывает атомы примеси, что в конечном итоге снижает встраивание Sn в эпитаксиальный слой арсенида галлия, приводя к более резкому концентрационному переходу.

Наращивание структур проводилось при температурах 690 и 650°C. Скорость газового потока составляла 1,0 см/с, мольная доля трихлорида мышьяка — $6,9 \cdot 10^{-3}$, в качестве инертного газа использовался аргон. Толщина буферного слоя находилась в диапазоне 10–15 мкм.

Рис. 1. Зависимость отношения емкостей C_0/C_{-1} (1) и $C_0/C_{-0,2}$ (2) от мольной доли трихлорида мышьяка при температуре роста 680°C и линейной скорости 0,67 см/с



С увеличением концентрации инертного газа при температуре 690°C происходит уменьшение длины переходного слоя более чем в 2 раза и, соответственно, увеличение крутизны концентрационного перехода (рис. 2, кривые 1, 2). При понижении температуры роста до 650°C изменение величины дополнительного потока аргона не оказывает заметного влияния на значения коэффициентов перекрытия по емкости и, следовательно, на крутизну перехода (рис. 2, кривые 3, 4).

Эти данные показывают, что при температуре роста 650–660°C и концентрации треххлористого мышьяка $6 \cdot 10^{-3}$ механизм роста определяется кинетикой поверхностных процессов. Таким образом, применение инертного газа эффективно лишь при более высоких температурах (690–710°C), где аргон как наиболее вязкий и тяжелый газ оказывает существенное влияние на диффузионные процессы роста эпитаксиальных слоев и резкость концентрационных переходов. При этом следует отметить, что повышение температуры наращивания без увеличения концентрации треххлористого мышьяка может привести к значительному ухудшению морфологии поверх-

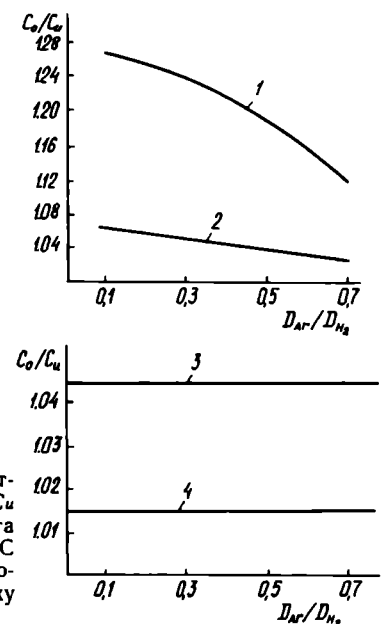


Рис. 2. Зависимость отношения емкостей C_0/C_i при температурах роста 690°C (1, 2) и 650°C (3, 4) от отношения потока аргона к потоку водорода

ности эпитаксиального слоя.

За счет более высокой адсорбционной активности грани (111)А к примесям в газовой фазе по сравнению с плоскостью (100) [13] возникает зависимость длины концентрационного перехода от времени наращивания высоколегированного ($n > 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) буферного слоя и входного давления SnCl_4 . Исследования зависимости k_1 и k_2 от времени роста при неизменных условиях наращивания показали, что увеличение времени наращивания в 3—5 раз для получения протяженных буферных слоев приводит к значительному «размытию» переходных областей. В частности, с увеличением толщины буферного слоя до 10—15 мкм коэффициент перекрытия увеличивается на 5—6%, что соответствует увеличению длины переходной области примерно в 2,5 раза.

При температуре роста 690°C и мольной доле трихлорида мышьяка $6,8 \cdot 10^{-3}$ коэффициенты k_1 и k_2 не зависят от давления SnCl_4 . При меньших мольных долях AsCl_3 — $3 \cdot 10^{-3}$ снижение парциального давления SnCl_4 от $8 \cdot 10^{-5}$ до $6,5 \cdot 10^{-6}$ в газовой фазе приводит к уменьшению значений k_1 и k_2 до 1,003 и 1,027, соответственно. При этом величина концентрации носителей заряда в буферном слое уменьшается от $(1-1,5) \cdot 10^{19}$ до $(0,1 \div 0,5) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Как следует из связи коэффициентов перекрытия с крутизной концентрационного перехода, изменение k_1 и k_2 не связано с изменением концентрации электронов в буферном слое.

Профили распределения носителей заряда на рис. 3 соответствуют условиям роста, при которых определялись зависимости, приведенные на рис. 1, 2. При условиях, когда $k_1 < 1,02$ и $k < 1,06$, длина переходного слоя составляет 0,01—0,02 мкм при толщине рабочего слоя 0,1—0,2 мкм и различии уровней легирования высоколегированного и слаболегированных слоев на 1,5—2 порядка. В таких структурах наблюдается полное перекрытие рабочего слоя в отсутствие напряжения смещения, что является необходимым условием получения приборов с барьером Мотта.

Таким образом, показано, что использование инертных газов для увеличения крутизны концентрационных переходов структур GaAs ориентации (111)А возможно в области сравнительно высоких температур наращивания ($680-710^\circ\text{C}$), когда диффузионное ограничение играет заметную роль. Наращивание эпитаксиальных структур GaAs (111)А для приборов с переходом Мотта целесообразно проводить в области низких температур роста ($650-660^\circ\text{C}$) в отсутствие инертного газа, т.е. в условиях кинетического ограничения процесса вхождения примеси, где система устойчива к возможным флуктуациям состава газовой фазы.

По сравнению с результатами, полученными в работе [9] для структур арсенида галлия ориентации (100), результаты данной работы показывают, что поверхность (111)А более критична

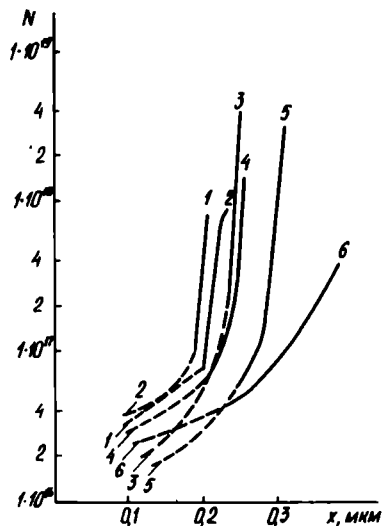


Рис. 3. Распределение концентраций электронов по толщине структур, полученных при различных отношениях потока аргона к потоку водорода и мольных долях трихлорида мышьяка: 1 — $C_{\text{Ar}}/C_{\text{H}_2} = 0,7$; 2 — $C_{\text{Ar}}/C_{\text{H}_2} = 0,58$; 3 — м.д. $\text{AsCl}_3 = 5,2 \cdot 10^{-3}$; 4 — $C_{\text{Ar}}/C_{\text{H}_2} = 0,46$; 5 — м.д. $\text{AsCl}_3 = 3 \cdot 10^{-3}$; 6 — $C_{\text{Ar}}/C_{\text{H}_2} = 0,35$

к условиям наращивания и составу газовой фазы, особенно при относительно высоких температурах. Наиболее подходящие температуры роста структур (111)А значительно ниже, чем для структур (100).

ЛИТЕРАТУРА

1. Полупроводниковые пленки для микроэлектроники/Под ред. Л.Н.Александрова, В.И.Петросяна.— Новосибирск: Наука, 1977.
2. Голованов Ю.А., Дербаносова С.А. Исследование низкотемпературного осаждения субмикронных слоев GaAs хлоридным методом.— В кн.: 5-ое Всесоюзное совещание по исследованию арсенида галлия, Томск, 21—23 сентября 1982 г., тезисы докладов.
3. А.с. № 1445463 (СССР). Способ получения многослойных ЭСАГ АЗВ5/Н.Н.Бакин, Т.В.Кораблева, П.К.Кравченко, Е.Н.Холзакова.— Оpubл. в Б.И., 1988.
4. Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления/Под ред. Д.В.ДиЛоренцо, Д.Д.Канделуола.— М.: Радио и связь, 1988, с. 51—52.
5. D u c h e m i n J.P. The transient mechanism in silicon multiplayer epitaxy.— Conf. Epitaxy, Collected Abstracts, Amsterdam, 1975, p. 130.
6. Verfahren zur Herstellung dünner Epitaxien schichten mit abruptem Dotierungsübergang/V.Hahn, M.Schmidt, K.Tempelhoff, B.Wehnert.— Academies der Wissenschaften der DDR. Пат. 247705, ГДР, заявл. 28.04.83 г. № 2503097, опубл. 15.07.87 г. МКИ С30 В 25/02, HOIL21/205.
7. S h a w D.W. GaAs vapor phase epitaxy at subnormal temperatures.— IEEE, 1977, vol. 124, N 8, p. 306.
8. Влияние температуры роста и ориентации подложки на вхождение Te в ЭСАГ/Л.Г.Лаврентьева, М.Д.Вилисова, В.А.Маковкин, С.Е.Торопов.— Изв. Вузов, Физика, 1982, № 41, с. 12—17.
9. Резкие переходы в структурах GaAs в системе Ga—AsCl—H—Ag для смешительных днодов с барьером Мотта/Ю.Л.Толстихин, П.К.Кравченко, В.С.Лукаш, М.Н.Ромахова.— Электронная техника. Сер. 6. Материалы, 1990, вып. 9, с. 72—74.
10. Леонов В.П. Влияние неидеальности газовых потоков в эпитаксиальном реакторе на резкость концентрационных переходов в структурах.— 5-ое Всесоюзное совещание по исследованию арсенида галлия, г. Томск, 21—23 сентября 1982 г. Тезисы докладов.
11. Отчет по ОКР «Темляк», 1989, № гос.рег. Ф34414.
12. D i l o g e n z o J.V., M o o g e G.E.— J. Electrochemical Soc., 1971, 118, 11, 1823.
13. Йононо Дзюндзи, Фуудзицу К.К. Пат. 57-6687, Япония. Заявл. 29.9.79 № 54-124720, опубл. 6.2.82 г. МКИ H 01L 21/205, H 01L 29/80.

Исследование спектральной чувствительности рентгенорезистов с помощью дифракционной решетки

А.В.АКИМОВ, Ю.М.АЛЕКСАНДРОВ, А.П.АЛЕХИН, В.А.МУРАШОВА,
В.В.СУЛИН, Р.В.ФЕДОРЧУК, М.Н.ЯКИМЕНКО

Дифракционные решетки могут применяться для исследования чувствительности рентгенорезистов и определения рабочего спектрального диапазона источника излучения, рекомендуемого для работы с резистами различных типов.

Оптимизация процесса экспонирования при использовании источников с широким спектральным диапазоном, таких как синхротроны и накопители, требует наличия у резиста повышенной чувствительности в значительном (несколько десятков \AA) диапазоне длин волн. При этом для анализа чувствительности резистов необходим монохроматор относительно невысокого разрешения. С другой стороны, этот спектральный прибор должен обладать достаточно высокой силой света, необходимой для имитации реального процесса экспонирования, чтобы исключить зависимость чувствительности от интенсивности падающего излучения.

В качестве такого спектрального прибора может быть использована "свободно висящая" дифракционная решетка с различными вариантами топологии. Основным преимуществом такой решетки перед решеткой на мембране является возможность абсолютной калибровки экспозиционной дозы.

Специалисты НИИФП им. Лукина провели исследование спектральной чувствительности рентгенорезиста на основе модифицированного полиметилметакрилата (ПММА). Топология и основные параметры, используемой решетки приведены в работе [1]. Распределение энергетического потока за решеткой, рассчитанное на основании технических характеристик ускорителя С-60 ФИАН [2], представлено на рис.1.

Резист, нанесенный на стандартную кремниевую подложку, экспонировался прошедшим дифракционную решетку синхротронным излучением. Глубина профиля

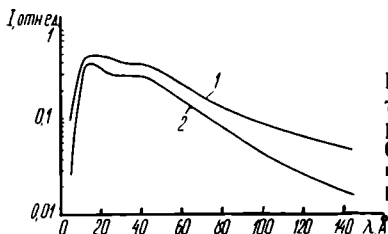


Рис.1. Распределение интенсивности излучения за решеткой на расстоянии 650 мм: 1 — полная плотность мощности, 2 — 1-й порядок

проявления измерялась интерферометрическим способом. Экспериментальные результаты (профиль проявления и зависимость глубины проявления от длины волны в диапазоне от 10 до 15 \AA и от 32 до 48 \AA) приведены на рис.2 и 3. Область от 15 до 32 \AA не исследовалась, поскольку в этом диапазоне резист проявлен до подложки.

Область спектральной чувствительности резиста лежит в диапазоне от 10 до 40 \AA , т.е. включает в себя края поглощения кислорода и углерода — основных компонентов ПММА, при этом можно предположить, что характер поведения кривой на участке 32—40 \AA определяется краем поглощения углерода [3].

Результаты эксперимента подтвердили возможность использования "свободно висящих" дифракционных решеток прямого падения для исследования спектральной чувствительности рентгенорезистов, спектрального диапазона, рекомендуемого при работе с резистами типа ПММА. Дифракционные решетки могут использоваться для выбора источников, имеющих максимальную интенсивность в этом диапазоне.

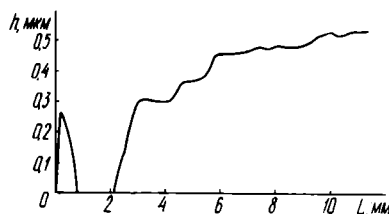


Рис.2. Профиль проявления резиста

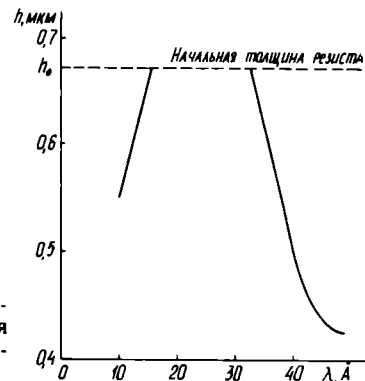


Рис.3. Скорректированный профиль проявления (мощность падающего излучения постоянная)

Применение в качестве мембран рентгеношаблонов материалов, близких к рентгенорезисту по химическому составу, вызывает "десенсибилизацию" резиста в процессе экспонирования, так как мембрана, как фильтр, вырезает именно те спектральные области, в которых рентгенорезист имеет максимальную чувствительность. В связи с этим представляется полезным производить подбор комплиментарных пар материалов резист-мембрана со сдвинутыми друг относительно друга областями поглощения.

Авторы выражают признательность А.А.Рупасову и Д.А.Федину за помощь в организации эксперимента и предоставление дифракционной решетки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Absolute soft x-ray measurements with a transmission grating spectrometer /K.Eidmann, T.Kishimoto, P.Heremann et al. — Laser and Particle Beams., 1986, vol. 4, parts 3, 4, p. 521—536.
2. Ускоритель ФИАН С-60 — источник синхротронного излучения /Ю.М.Александров, М.И.Благов, В.Н.Махов и др. — Препринт ФИАН № 168, М., 1980.
3. Некоторые особенности взаимодействия излучения с полимерами типа полиметилметакрилата /Ю.М.Александров, В.А.Мурашова, В.В.Сулин и др. — Высокомолекулярные соединения, 1989, № 6, с. 1259.

ВНИМАНИЮ подписчиков журнала!

Предлагается перечень иностранных периодических журналов, поступающих в отраслевой справочно-информационный фонд ЦНИИ "Электроника" в 1993 г.:

- EDN
- ELECTRONIC BUSINESS
- ELECTRONIC DESIGN
- ELECTRONIC ENGINEERING TIMES
- JEI
- FUNKSCHAU
- LASER FOCUS WORLD

- MICROELECTRONICS MANUFACTURING & TESTING
- MICROWAVES & RF
- PERSONAL COMPUTER WORLD
- PC MAGAZINE (RUSSIAN EDITION)
- SEMICONDUCTOR INTERNATIONAL
- SOLID STATE TECHNOLOGY
- Электроника (США), переводной,

а также справочное издание Д.А.Т.А. Вокк (США) по основным видам изделий электронной техники.

Контактные тел.: 432-92-32, 432-91-51

*микроэлектроника и полупроводниковые приборы
новые изделия*

Проблемы электронного конструирования корпусов БИС и СБИС наносекундного диапазона

В.Я.КОНТАРЕВ, В.Н.ПАНОВ, Д.П.БОГДАНОВ

Развитие элементной базы для быстродействующих средств вычислительной техники привело к созданию больших и сверхбольших интегральных микросхем. Особенности БИС и СБИС заключаются в наличии большого числа входных-выходных контактов, контактов питания, а также большой рассеиваемой мощности. Это, а также малое время переключения сигнала, предъявляет жесткие требования к конструкции корпуса при электронном конструировании, т.е. обеспечении необходимых электрических параметров корпуса микросхемы.

В настоящее время микросхемы для средств вычислительной техники в нашей стране выпускают в корпусах четырех конструктивных вариантов. Это корпуса с вертикально расположенными выводами, так называемые DIP-корпуса (рис. 1,а) с планарным двух- и четырехсторонним расположением выводов (рис. 1,б) и корпуса безвыводные типа «Н» (рис. 1,в). В последнее время все большее распространение получают корпуса с матричным расположением вертикальных выводов (рис. 1,г,д).

Корпуса прямоугольной формы с двухрядным

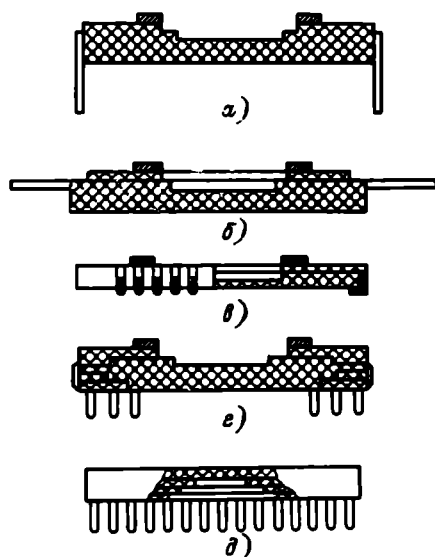


Рис. 1. Конструктивные варианты исполнения современных корпусов БИС и СБИС: *а* — с вертикальным расположением выводов в два ряда, *б* — с планарным расположением выводов с двух и четырех сторон, *в* — безвыводной корпус, *г* — с матричным расположением вертикальных выводов со стороны основания, *д* — с матричным расположением вертикальных выводов со стороны крышки

расположением выводов из-за неудовлетворительных массогабаритных и электрических параметров непригодны для установки кристалла БИС с числом выводов более 64 [1, 2].

Сопротивление выводов таких корпусов достигает 0,3—1 Ом, межвыводная емкость 1—4 пФ, отношение длины самого длинного и самого короткого выводов 7:1, время задержки на логическом выводе 0,3 нс. Корпус с двухрядным расположением выводов и числом выводов 64 занимает на монтажной плате площадь около 1900 мм².

Для улучшения массогабаритных и электрических параметров многывыводных БИС широко применяются плоские корпуса с планарным расположением выводов, которые можно устанавливать на широко распространенные стекложидкие печатные платы. При этом монтаж БИС можно осуществлять с двух сторон автоматизированными методами. Основания таких корпусов изготавливают из керамики или пластмассы. Корпуса с планарным расположением выводов и шагом 1,25 мм при двух- и четырехстороннем их расположении можно использовать для БИС с числом выводов до 100 [3]. Уменьшение шага выводов до 0,625 мм позволяет применять такие корпуса для БИС с числом выводов до 180.

Предпочтение следует отдавать корпусам с четырехсторонним расположением выводов, так как в этом случае основание корпуса имеет квадратную форму, что обеспечивает при отношении длин самого длинного и самого короткого выводов 1,4:1 равномерное распределение паразитных параметров. Сопротивление выводов составляет 0,15—0,25 Ом, межвыводная емкость 0,2—0,6 пФ,

время задержки на логическом выводе достигает 0,1 нс.

Безвыводные корпуса обеспечивают установку кристаллов БИС с числом выводов до 256 [3]. Кроме того, благодаря отсутствию выводов такие корпуса позволяют повысить плотность размещения БИС на монтажной плате.

Использование безвыводных корпусов при числе выводов 68 вместо корпусов с двухрядным расположением выводов позволяет достичь трехкратной экономии площади. Такой безвыводной корпус занимает площадь всего 640 мм². Сопротивление выводов составляет 0,1—0,2 Ом, межвыводная емкость 0,1—0,5 пФ, время задержки на выводе не превышает 0,05 нс.

Безвыводные корпуса выполняются из многослойной керамики и полимерных материалов. К их недостаткам следует отнести то, что для обеспечения их надежного присоединения к монтажной плате необходимо согласовывать материалы, из которых изготовлены безвыводные корпуса и монтажные платы, по коэффициентам термического расширения. Так, безвыводные керамические корпуса можно устанавливать только на керамические платы [4].

Корпуса с матричным расположением выводов обладают таким важным преимуществом перед другими типами корпусов, как независимость плотности размещения элементов на монтажной плате от общего количества выводов [4]. В таких корпусах БИС при шаге матрицы 2,5 мм занимают меньшую площадь на монтажной плате, чем в безвыводных корпусах с шагом выводных контактных площадок 0,625 мм при числе выводов более 200. В настоящее время ведущие фирмы выпускают матричные корпуса с числом выводов до 324 и более [3]. Отечественная промышленность выпускает матричные корпуса с числом выводов 64, 100 и 132 [2].

Изготавливают корпуса с матричным расположением выводов с полной, неполной и разделенной матрицами. Выводы располагают как на нижней, так и на верхней поверхности основания корпуса (см. рис. 1, *г, д*). Корпуса с полной матрицей выводов изготавливают из многослойной керамики. Использование неполной матрицы выводов позволяет упростить конструкцию основания [5]. Кроме того, отсутствие выводов на основании под кристаллом позволяет обеспечить монтаж кристалла эвтектической пайкой за счет лучшей передачи тепла от нагревательного столика к монтажной площадке корпуса. Если матрица выводов расположена со стороны крышки, то для улучшения теплоотвода на нижней плоскости можно установить радиатор.

При большом количестве выводов с целью сокращения длины проволочных перемычек между контактными площадками кристалла и корпуса размер монтажного колодца уменьшают, располагая внутренние контактные площадки корпуса не на одном, а на двух слоях. Для предотвращения пересечения проволочных перемычек, идущих от кристалла, контактные площадки корпуса на верхнем и нижнем слоях в монтаж-

Фирма	Технология изготовления БИС	Мощность рассеяния, Вт	Число выводов	Тип корпуса	Шаг выводов, мм
Honeywell	Биполярная	2	160	Матричный	2,5
Hughes	КМОП	0,7	148	Планарный	0,63
IBM	n-МОП	3	244	Матричный	2,5
TRW	Биполярная	3	132	Планарный	0,635
Westinghouse	КМОП	0,5	132	«	0,635
LSI Logic	КМОП	1	244	«	0,5
LSI Logic	КМОП	—	229	Матричный	—

ном колодце располагают со смещением относительно друг друга [7].

К наиболее перспективным для сверхбыстродействующих БИС с большим числом выводов относят безвыводные корпуса и корпуса с матричным расположением выводов [2, 4, 6, 7]. Однако такие корпуса обладают, с точки зрения изготовителей средств вычислительной техники, существенными недостатками, которые ограничивают их применение. Так, для ЕС ЭВМ неприемлемыми являются многослойные керамические платы размером 100×100 мм. В настоящее время общепринятым размером плат для ЕС ЭВМ является 140×150 и 330×150 мм. С другой стороны, применение керамических плат для прочих ЭВМ не дает выигрыша в плотности компонентов, надежности, массе и стоимости. Шаг трассировки керамических и стеклоэпоксидных плат одинаков — 0,4 мм. Стойкость к термоциклам (−60... +80°С) для стеклоэпоксидных плат с БИС в корпусах с планарным расположением выводов составляет 300 циклов, что превышает стойкость керамических плат с БИС в керамических безвыводных кристаллоносителях. Масса керамической платы в 2 раза превышает массу стеклоэпоксидной. Кроме того, если для ЕС ЭВМ БИС использование корпусов с матричным расположением выводов дает определенный выигрыш в плотности компоновки, то для ряда других ЭВМ применение корпусов с планарным расположением выводов (с шагом 0,625 мм) обеспечивает двусторонний монтаж на плату с внутренним теплоотводящим слоем и позволяет уменьшить объем электронного блока в 3 раза.

Таким образом, для удовлетворения потребностей быстродействующих ЭВМ одни и те же БИС должны выпускаться в различных корпусах: с планарным и матричным расположением выводов. При этом планарные корпуса должны выпускаться с шагом выводов 0,625 мм, а матричные — с шагом 2,5 мм.

Ведущие зарубежные фирмы, выпускающие аппаратуру на СБИС, придерживаются этих же принципов, применяя СБИС в корпусах с планарным (четырёхсторонним) расположением вы-

водов с шагом 0,63 или 0,5 мм, а также корпуса с матричным расположением выводов с шагом 2,5 мм (таблица).

Оптимальная конструкция корпуса для БИС должна обеспечивать не только минимальную площадь, занимаемую БИС на плате, получаемую рациональным расположением внешних выводов корпуса, и удовлетворять конструкции устройства, но и качественную передачу сигнала и стабильность работы кристалла.

Потребности в дальнейшем повышении быстродействия обуславливают как дальнейший рост степени интеграции, так и уменьшение времени переключения логических элементов (ЛЭ).

Быстродействие элементной базы высокопроизводительных ЭВМ должно быть сбалансировано со степенью интеграции БИС и соответственно с временными задержками в линиях связи между элементами в реальной конструкции ЭВМ. Поэтому совершенствование микроэлектронной элементной базы высокопроизводительных ЭВМ наряду с ростом быстродействия элементов и степени интеграции должно сопровождаться прямо пропорциональным сокращением времен задержек в линиях связи ЭВМ. Например, при двумерной (планарной) компоновке логического обрабатывающего устройства или узла это условие соответствует следующему соотношению:

$$K_{\text{Фонт}} = K_{\text{Нонт}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{Фонт}}$ — коэффициент роста оптимального быстродействия элементов БИС; $K_{\text{Нонт}}$ — коэффициент роста оптимальной степени интеграции элементов БИС.

Однако для микросхем в широком диапазоне параметров

$$K_F K_N = K_{Pz} K_P \quad (2)$$

или при неизменной мощности на кристалле ($K_P = 1$)

$$K_F K_N = K_{Pz}$$

где K_{PI} — коэффициент уменьшения работы переключения (коэффициент роста уровня технологии схем); K_P — коэффициент роста рассеиваемой мощности на кристалле.

Решая совместно уравнения (1) и (2), получаем оптимальное значение коэффициента роста быстродействия $K_{Фонт}$ и степени интеграции при уменьшении энергии переключения элементов:

$$K_{Фонт} = K_{Нонт} = \sqrt{K_{PI} K_P}. \quad (3)$$

Так, при уменьшении энергии переключения Pt в 4 раза ($K_{PI} = 4$) быстродействие элементов матричных БИС должно повышаться в 2 раза ($K_{Фонт} = 2$). При этом быстродействие устройства на микросхемах, смонтированных на плате, повысится вдвое.

Большое значение при этом имеют времена переключения выходных ЛЭ, работающих на внешние (по отношению к кристаллу) линии связи. В настоящее время скорости переключения выходных ЛЭ достигли субнаносекундного диапазона и продолжают уменьшаться. Кроме того, с ростом быстродействия и степени интеграции неизбежно увеличение мощности кристаллов. Рост степени интеграции приводит также к росту числа входных-выходных контактов на кристалле. Особенно остро данная проблема стоит для логических схем обрабатывающих устройств с произвольной логикой при условии функциональной незавершенности логической схемы на кристалле. Последнее наиболее характерно для БИС и СБИС высокопроизводительных ЭВМ, т.е. именно там, где наиболее остро стоит проблема быстродействия элементной базы.

Число входных-выходных контактов на кристалле, являющемся функциональным узлом ЭВМ с произвольной логикой, можно оценивать с помощью соотношения, называемого правилом Рента:

$$N_{св} = aNp, \quad (4)$$

где $N_{св}$ — число входных-выходных контактов (внешних связей) кристалла; N — число ЛЭ на кристалле (степень интеграции); a — число внешних связей ЛЭ; p — показатель Рента, характеризующий быстродействие логической структуры на кристалле.

Полученные экспериментальные значения для p в зависимости от производительности процессора колеблются в диапазоне 0,5—0,75 (рис. 2).

Анализ показывает, что БИС со степенью интеграции 10^3 ЛЭ на кристалл требуют около 100 входов-выходов (например, БМК И-300 помещаются в корпус с 90 логическими контактами), а для СБИС со степенью интеграции 10^4 ЛЭ на кристалл число необходимых входов-выходов достигает нескольких сотен.

Из сказанного следует, что при совершенствовании элементной базы высокопроизводительных ЭВМ требуется адекватный подход к конструкции микросхем высокого быстродей-

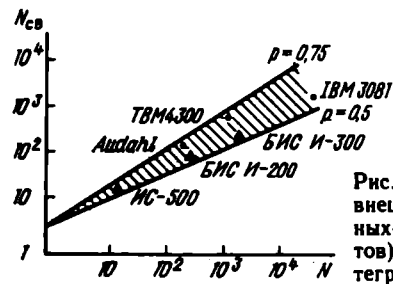


Рис. 2. Зависимость числа внешних-выходных контактов $N_{св}$ от степени интеграции N для микросхем: кружки — зарубежные разработки, треугольники — отечественные

ствия, отличающихся высокой мощностью и соответствующим токопотреблением, а также большим количеством внешних выводов.

До недавнего времени времени корпуса микросхем рассматривались в качестве вспомогательного конструктивного элемента, служащего для электрического подсоединения контактных площадок на кристалле к соответствующим контактам печатной платы, обеспечения необходимого теплоотвода, а также для предохранения кристалла от различных внешних воздействий.

Такой подход был вполне допустим для микросхем с низкой степенью интеграции и сравнительно большими временами переключения, так как небольшие размеры кристалла и низкая степень интеграции, а следовательно, малое число внешних выводов и небольшая рассеиваемая мощность позволяли создавать относительно компактные корпуса с малой длиной токоведущих частей. Последнее при длительных фронтах переключения сигнала позволяло пренебрегать временем задержки и искажениями фронта сигнала на токоведущих частях корпуса, а также не влияло заметным образом на помехозащищенность. Но с ростом степени интеграции и быстродействия возникает большое число проблем, связанных с искажениями сигналов, времен задержек, помехами и стабильностью работы микросхем, что определяется конструкцией корпуса.

Это объясняется тем, что при высоком быстродействии электрические параметры выводов корпуса начинают играть заметную роль в искажении формы сигнала и снижении запаса помехозащищенности. Таким образом, с ростом быстродействия и степени интеграции возникает необходимость рассматривать корпус как сложное электронное устройство. Данные устройства должны обеспечивать необходимый запас помехозащищенности и устойчивости к появлению паразитной генерации.

Уменьшение запаса помехозащищенности кристалла в корпусе связано при прочих равных условиях с падением напряжения в потенциальных токоведущих частях корпуса. Причем если для ЭСЛ-, ТТЛ-схемотехники это относится прежде всего к падению напряжения в шинах нулевого потенциала, то для КМОП — к падению напряжения как в шинах нулевого потен-

циала, так и в шинах питания. Сюда же следует отнести и падение напряжения в логических выводах корпуса, хотя острота проблемы здесь значительно слабее из-за меньшего тока в них. Так, кристаллы, помещенные в корпус с высоким сопротивлением токоведущих частей, будут иметь пониженный запас помехоустойчивости, что, в частности, приведет к снижению надежности работы СБИС. Например, кристаллы БИС И-300, которые помещены в корпус «Макет-4.108», имеющий сопротивление сигнальных проводников до 0,3 Ом и потенциальных проводников до 0,13 Ом, при максимальном токе нулевого потенциала теряют до 25—30% из общего запаса помехозащищенности. Уменьшить сопротивление потенциальных токоведущих частей можно следующим образом:

применяя низкоомные материалы и увеличивая поперечное сечение проводников. Это не всегда представляется возможным в рамках существующих технологий, но, например, применение бериллиевой бронзы в 108-выводном корпусе, аналогичном корпусу «Макет-4.108», позволило снизить сопротивление выводов более чем на порядок (до 0,01 Ом);

сокращая общую длину выводов. Это наиболее перспективно для корпусов с матричным расположением выводов, в которых в качестве потенциальных выводов необходимо использовать контакты, наиболее близко расположенные к кристаллу;

используя многослойность (слой нулевого потенциала и слой питания) в корпусе. Подключение слоев к соответствующим выводам должно осуществляться, с одной стороны, к траверсам в монтажном колодце, а с другой — к внешним выводам корпуса;

уменьшая, насколько это возможно, длину проволочной перемычки в корпусе. Длина проволочной перемычки зависит от соотношения размеров кристалла и размеров монтажного колодца. Говоря о проволочной перемычке, отдельно следует отметить, что кардинально этот вопрос решается при использовании шариковых выводов, что уменьшает проволочную перемычку до размеров шарика;

увеличивая число потенциальных выводов. Вообще говоря, это нежелательно, так как в этом случае либо сокращается число логических выводов, либо увеличивается число выводов корпуса. Соответственно увеличиваются его размеры и длины в корпусе, уменьшается плотность компоновки на плате и т.д.

Кондуктивная помеха в выводах корпуса носит индуктивный характер и возникает из-за резкого изменения тока в индуктивности потенциальных токоведущих частей корпуса при одновременном переключении в одном направлении большого числа выходов схемы. В частности, для ЭСЛ-схем это относится к току нулевого потенциала, а для КМОП-схем — как к току нулевого потенциала, так и к току питания.

Генерация ЭСЛ-схем зависит от электриче-

ских параметров схемы и индуктивностей в цепи базы и коллектора, вносимых также и корпусом.

Таким образом, для исключения влияния вышеописанных явлений на работу микросхемы необходимо, насколько это возможно, снижать индуктивность выводов корпуса.

Индуктивность вывода можно оценить (оценка сверху) по следующей формуле:

$$L_{\text{выв}} \approx \frac{\mu\mu_0 l}{2} \ln \frac{l}{d}, \quad (5)$$

где l — длина вывода; d — ширина (диаметр) вывода.

Из формулы (5) видно, что основными параметрами, определяющими индуктивность вывода, являются его длина, а также, в меньшей степени, ширина. Поэтому снижения значения индуктивности можно эффективно добиваться уменьшая l , что достигается сокращением длины потенциальных выводов (что наиболее удобно в матричном корпусе), либо распределением потенциальных токов в плоскости, параллельной плоскости разводки сигнальных проводников, т.е. в слоях корпуса. При этом уменьшаются до минимума длина участков проводников с «концентрированными» токами нулевого потенциала и, если это необходимо, длина проводников питания внутри корпуса. Такими участками являются: проволочная перемычка от контактной площадки кристалла до контакта с потенциальной шиной корпуса, а также участок вывода от слоя в корпусе до точки контакта с многослойной печатной платой (МПП). Оставшиеся участки потенциальных выводов с «концентрированными» токами необходимо делать максимально большой ширины (диаметра).

Описанные выше способы увеличения помехозащищенности позволяют одновременно понизить и индуктивность. В качестве эффективных мер по снижению индуктивности следует выделить второй, третий и четвертый способы.

Перекрестная помеха в выводах корпуса носит емкостной характер и зависит от соотношения между собственной и взаимной емкостями сигнальных проводников в корпусе. Для надежной защиты от перекрестных помех при использовании любой схемотехники необходимо, чтобы взаимная емкость не превышала третьей части от собственной. Значения вышеуказанных емкостей зависят от соотношения геометрических параметров поперечного сечения проводников, изоляторов корпуса и наличия в нем потенциальных слоев.

Наряду с этим необходимо отметить, что скорость передачи сигнала определяется кроме длины вывода значением погонной емкости и волновым сопротивлением вывода. Поэтому рекомендуется использовать в качестве диэлектрика в корпусе материалы с возможно более низкой диэлектрической проницаемостью ϵ , что позволяет снизить время передачи сигнала по выводу.

В перспективе весьма важным моментом представляется также согласование импеданса сигнальных проводников корпуса с волновым сопротивлением линии связи в МПП с целью исключения возможных многократных пробегов сигнала внутри корпуса, что неизбежно при рассогласовании вышеуказанных параметров и волновом характере переходного процесса в линии связи. При наличии в корпусе потенциальных слоев, меняя толщину диэлектрика между сигнальным и потенциальными слоями, а также применяя материалы с различным ϵ , можно изменять волновое сопротивление выводов.

Строго говоря, требования к импедансу выводов, являющихся входными и выходными, различаются. Если для вывода, являющегося выходным, необходимо равенство его импеданса и волнового сопротивления линии связи, то для вывода, являющегося входом, требования к импедансу могут быть иными.

Таким образом, для БИС и СБИС высокопроизводительных ЭВМ требуется решение вопросов электронного конструирования корпусов. Взаимосвязанность конструктивных и электрических параметров кристалла и корпуса требует адекватного выбора типа корпуса и его кон-

струкции, что приводит к значительному усложнению конструкции и соответственно удорожанию корпуса быстродействующих БИС и СБИС. В общем случае создание универсального корпуса неэффективно и нецелесообразно.

ЛИТЕРАТУРА

1. S i n n a d u r a i N. EPJC: A Cost-Effective Plastic Chip Carrier for VLSI Packaging.— IEEE Trans. on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, 1985, vol. CHMT-8, N 3, p. 390.
2. Ч е р н ы ш е в А.А., Ш а м а р д и н В.Г. Матричные корпуса интегральных микросхем.— Электронная промышленность, 1987, вып. 8, с. 24—28.
3. Ч е р н ы ш е в А.А., Ч и с т я к о в Ю.Д. Корпуса для сборки интегральных микросхем.— Зарубежная электронная техника, 1988, вып. 9.
4. Ч е р н ы ш е в А.А., С т а д н и к А.А., Т ю х и н А.А. Корпуса для больших интегральных схем и перспективы их совершенствования.— Зарубежная электронная радиоэлектроника, 1984, вып. 9, с. 83—95.
5. Ч е р н ы ш е в А.А. Некоторые проблемы корпусирования сверхбыстродействующих СБИС.— Радиоэлектроника за рубежом, 1983, вып. 5, с. 83—95.
6. S m i t h K. Packages are Presenting Deversifired Mix.— Electronics Week, 1984, N 9, p. 67—73.
7. B e f c k s h a w M., D a n c e F. Design Manufacture and Assembly of High Pin Count Plastic Pin Grid Array Packages.— Solid State Technology, 1986, N 8, p. 141—146.

Опыт конструирования высоконадежных ИС ТТЛ

А.И.КУДИНОВ, Б.К.ПЕТРОВ

В НПО "Электроника" (г. Воронеж) на основе физического анализа брака и отказов ИС серий 106, 134 определены относительно "слабые" места конструкции ИС. Установлено, что конструктивные запасы должны превышать в несколько раз суммарные максимально допустимые отклонения размеров элементов по допускам в результате колебаний технологического процесса. С этой целью проведены конструктивные доработки:

- во всех местах на кристалле минимизирована масса Al в окрестности контактных окон к эмиттерным областям для предотвращения "проседания" контакта Al-Si, приводящего к закорачиванию p-n-переходов;
- изменена разводка металлизации с целью сведения к минимуму вероятности шунтирования цепей ИС через дефекты окисла под металлизацией;

— изменена форма контактных площадок для приварки выводов, исключая отказы из-за повреждения металлизированных дорожек при сварке в месте выхода с этих площадок;

— произведено упрочнение в определенных границах наиболее "слабых" элементов к воздействию электрических перегрузок, в результате чего повышена устойчивость ИС к электрическим перегрузкам и исключены отказы из-за воздействия разрядов статического электричества;

— рассмотрены условия возникновения паразитных транзисторов и меры по исключению их возникновения.

В результате этих и других принятых мер частота отказов ИС серий 106, 134 уменьшилась на 1—2 порядка

Одной из главных проблем современной микроэлектроники является повышение эксплуатационной надежности радиоэлектронной (РЭА) и вычислительной аппаратуры, которая создается с применением разнообразных ИЭТ, в основном ИС. Повышение надежности ИС представляет собой сложную комплексную проблему.

Очевидно, устойчивая конструкция — одно из главных условий получения высоконадежных ИС. Такая конструкция обеспечивает получение высоконадежных изделий при малой квалификации исполнителей технологических операций. Однако в литературе, например [1—3], отсутствуют технические рекомендации по повышению устойчи-

ности конструкции ИС. Из опыта работы по совершенствованию биполярных ИС ТТЛ с окисной изоляцией малой и средней степени интеграции следует, что это требование выполняется тогда, когда обеспечиваются многократные запасы по допускам на колебания технологического процесса. Например, заложенная в КД ширина дорожек металлизации такова, что локальное зауужение ее в 5—10 раз, как правило, не приводит к отказу, так как ширина заууженной части остается все-таки большей, чем та, которая требуется из условия допустимой максимальной плотности рабочего тока, равной $2 \cdot 10^5$ А/см².

Тщательная проверка запасов в части надежности конструкции возможна только анализом отказов. В этом отношении анализ отказов на различных этапах жизненного цикла ИС дает исчерпывающую информацию об имеющихся особенностях конструкции, в которых так или иначе не обеспечивается такой запас прочности.

Объектом исследования являлась надежность ИС, зависящая от конструкции кристалла. На основе многолетнего систематического анализа брака и отказов ИС с различных этапов жизненного цикла систематизированы причины, приводящие к снижению их надежности. Отказы могут иметь как случайный, так и систематический характер. К первым относятся обрывы металлизации, например, по царапине дорожки крошкой кремния или из-за локального растрова металлизации, обрывы выводов повреждением при сборке и др. Ко вторым относятся отказы, обусловленные контактом Al—Si в элементах ИС, в некоторых случаях отверстиями в окисле под металлизацией, деформацией металлизации при приварке выводов, переходом металлизации через ступеньку окисел — кремний и др.

Контакт Al—Si. Весьма частым видом отказов ИС при определенных условиях могут явиться отказы, обусловленные шунтированием нижежежащего *p-n*-перехода алюминием, опускающимся в контакт на место Si, растворяющегося до определенного предела в Al-пленке. Это проис-

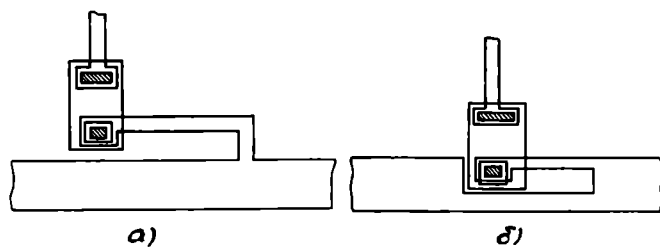


Рис. 1. Схемы подключения элементов к шине «земля», исключающие «проседание» контакта



Рис. 2. Схема подключения элементов, при которой шина «земля» проходит над эмиттерами нескольких транзисторов, с контактным окном неиспользуемого элемента (А)

ходит тогда, когда в окрестности этого контакта располагается относительно большая масса Al. Известно, что скорость диффузии Si в пленке Al весьма высока. Например, в работе [4] указано, что при отжиге в течение 30 мин при температуре, равной 500°C, кремний диффундирует на расстояние 55 мкм. То есть большая масса алюминия в виде, например, контактной площадки во входных цепях ИС должна располагаться не ближе данного расстояния, и нередко осуществлялось искусственное удлинение дорожки. Большая масса Al часто имеет место по трассе шины «земля», так как она, как и шина «питание», имеет самую большую ширину по сравнению со своей остальной разводкой. В связи с этим случаи прохождения шины «земля» над переходами э—б недопустимы.

Для исключения «проседания» контакта подключения элементов к шине «земля» осуществляется по типу, изображенному на рис. 1, а, б. Иногда шина «земля» проходит над эмиттерами нескольких рядом расположенных транзисторов. Тогда активное растворение кремния будет наблюдаться только в первом транзисторе. Условия могут быть таковы, что расположить металлизацию по рис. 1, а, б не удастся. В этом случае надо рассмотреть возможность выделения малой отдельной области кристалла перед первым эмиттером и создание контакта к ней шины металла (рис. 2). Здесь кремний из эмиттера первого транзистора будет растворяться в ограниченном количестве, так как пленка Al насытится кремнием из контактного окна выделенной области. При этом удалось использовать имевшийся незадействованный элемент, по контактному окну которого и была проложена шина «земля», что исключило таким образом возможность отказа.

Другой проблемой контакта Al—Si являются повышенные значения его сопротивления. Это происходит в случае чрезмерно заниженных размеров контактных окон. Причем, начиная с некоторых размеров сопротивление возрастает скачкообразно. Часто эта ситуация имеет место во входных цепях ИС. В этом случае с возрастанием сопротивления уменьшается помехоустойчивость ИС, увеличиваются пороговые напряжения открывания транзисторов схемы. Завышение сопротивления зачастую усиливается чрезмерным вжиганием, когда контакт «проседает» из-за растворения кремния, но из-за несоизмерности зерна пленки с размерами контактных окон возникает микрорасслоение [5] и, как следствие, возрастает сопротивление.

Шунтирование входных и выходных цепей ИС проколами в окисле. Одной из причин отказов ИС является шунтирование элементов, особенно во входных и выходных цепях, через отверстия в окисле, расположенные на потенциальных элементах и находящиеся одновременно под металлизацией. При этом в ИС с изоляцией окислом между элементами, в отличие от ИС с изоляцией *p-n*-переходом, на области чипа

между карманами, заполненными поликристаллом, нет необходимости подавать потенциал, так как они всегда электронейтральны и не имеют никакой паразитной связи с элементами ИС. Поэтому необходимо максимально использовать эти области для трассировки металлизации и располагать элементы так, чтобы облегчать возможность такой разводки.

Отказ ИС из-за шунтирования через отверстие в окисле имеет одну важную особенность. В биполярных ИС ТТЛ используются пластины n -типа, и если Al-разводку располагать над областями n -типа, то в случае расположения отверстия под металлизацией, как правило, образуется p - n -переход типа диода Шотки. Тогда, если потенциал между шунтируемыми элементами будет мал, то во-первых, этот диод может не возникнуть, так как на дне отверстия есть остатки окисла, а во-вторых, в случае его образования шунтирование часто исключается либо высоким сопротивлением при обратном включении, либо конечным напряжением его открывания при прямом включении. Этим, видимо, и объясняется различие более чем на порядок в сторону уменьшения частоты отказов из-за отверстий в окисле во внутренних цепях ИС. Поэтому в случае отсутствия возможности выполнения трассировки металлизации по поликристаллу, необходимо стремительно располагать разводку металлизации над областями с наименьшей разностью потенциалов.

Обрыв металлизированных дорожек. Одной из обширных групп отказов ИС являются отказы, обусловленные обрывом металлизации. Причины обрывов металлизации могут быть весьма различными: коррозия, механические повреждения металлизации (царапины) при сборке, обрывы на ступеньке окисел—окисел и окисел—кремний и др. Рассмотрим вначале обрывы по причине царапин металлизации, которые могут быть весьма различными по виду и природе их возникновения.

Специфичными являются царапины в виде деформации сварочным инструментом в месте отрыва проволоки на кристалле при сварке клином. В случае неоптимального выхода металлизации с контактной площадки и небольшого смещения сварной точки возможен отказ ИС. В настоящее время все контактные площадки в ИС серий 106, 134 имеют одно- или двухсторонний скос или короткое ступенчатое расширение в месте выхода с контактной площадки. При таких выходах металлизации с контактной площадки смещение сварной точки на узкую часть Al-дорожки является невероятным, и поэтому отказы по данной причине исключены.

Одним из самых сложных видов отказов являются отказы, обусловленные обрывом металлизации на ступеньке окисел—кремний. На ступеньке окисел—окисел обрывы металлизации весьма редки. Обрыв же на ступеньке окисел—кремний стимулируется тем, что Al в месте входа

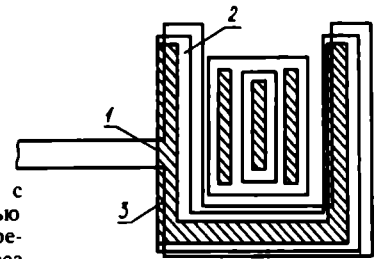


Рис. 3. Структура ИС с пониженной надежностью 1 — ненадежный переход металлизации через две совпадающие ступеньки окисла; 2 — n^+ -область коллектора; 3 — контактное окно

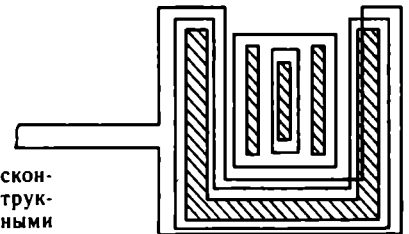


Рис. 4. Надежно сконструированная конструкция ИС, с достаточными запасами на рассовмещение и затравливание

в контакт несколько оседает в процессе вжигания из-за уже указанного растворения кремния в Al, в результате чего уменьшается сечение металлизации на вертикальной стенке окисла. Наиболее часто встречающаяся ситуация в нашем случае заключалась в обрыве металлизации в месте ввода в контакт коллектора. Дело в том, что в коллекторе суммарный перепад окисла — самый высокий ($h \approx 0,8$ мкм): основной окисел — эмиттерный окисел — чистый кремний. Эмиттерный окисел обусловлен тем, что для создания омического контакта к n -области коллектора проводится диффузия фосфора для создания n^+ -области в контакте. В случае недостаточных запасов могут быть такие рассовмещения и уходы размеров при травлении, что переход узкой частью металлизации будет осуществляться через совпавшие ступеньки. Это резко снижает надежность ИС (рис.3). Необходимо конструировать этот узел, так, чтобы, во-первых, зазоры между гравировкой n^+ -области и контакта с внешней стороны были не менее 2—3 мкм при любых суммарных возможных уходах размеров областей и их рассовмещении, и, во-вторых, металлизация была бы по размерам существенно больше, чем внешние размеры n^+ -области коллектора (рис.4). Со стороны ввода металлизации запасы на рассовмещение и затравливание должны быть многократными (в 5 и более раз).

Пробой статическим электричеством. Одним из опасных видов отказов является воздействие разрядов статического электричества. Причем из опыта работы по анализу отказов у потребителя следует, что избежать этого воздействия практически невозможно. Поэтому конструкция ИС должна быть максимально устойчивой к воздействию перегрузок, вызываемых статическим электричеством. Первым условием конструкции должна быть равная устойчивость всех элементов к воздействию статического электричества.

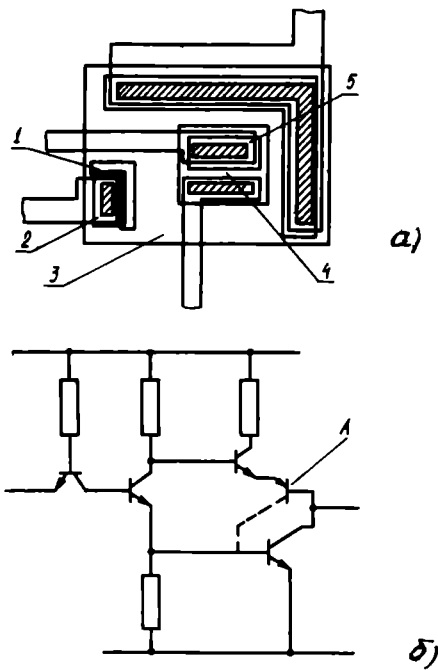


Рис. 5. Фрагмент структуры ИС ТТЛ вентиля (а) и его эквивалентная схема (б): 1 — разделяющая n^+ -область; 2 — p -область диода смещения; 3 — n -область коллектора выходного транзистора; 4 — p -область базы выходного транзистора; 5 — n^+ -область эмиттера выходного транзистора; А — паразитный транзистор $p-n-p$ типа

При анализе отказов ИС серии 134 было установлено, что наиболее слабым звеном ИС оказался фазопереклюкающий транзистор, расположенный между многоэмиттерным транзистором на входе и выходным транзистором. Причем, след пробоя формировался по переходу $\varepsilon-b$ иногда настолько слабый, что обнаруживался только после тонкого химического травления. Пробой внутреннего транзистора при неповрежденных входных и выходных транзисторах свидетельствовал о том, что внутренний транзистор был существенно менее устойчивым, чем другие элементы. Поэтому была изменена конструкция транзистора с целью его упрочнения, что исключило отказы ИС из-за пробоя статическим электричеством. В транзисторе был несколько удлинен эмиттер транзистора и увеличено расстояние между переходом $\varepsilon-b$ и контактом в базе. В итоге устойчивость транзистора возросла в несколько раз.

Обратимые отказы. Специфическим видом отказов являются обратимые отказы, обусловленные изменением величины коэффициента усиления ($V_{ст}$) транзисторов и некоторыми другими условиями. В одних случаях — это отказы при отрицательных температурах, когда отдельные транзисторы могут выходить из состояния насыщения вследствие уменьшения $V_{ст}$, а в других (например, при повышенной температуре) отказы вследствие увеличения $V_{ст}$ и совмещения в одной

изолированной области двух и более активных элементов ИС, включая диоды, с образованием шунтирующих связей в виде паразитных транзисторов. Например, если диод смещения и выходной транзистор типового ТТЛ вентиля помещается в один карман, что допустимо при условии выполнения разделяющей полоски n -типа около диода (рис. 5, а), то в случае образования паразитного транзистора согласно рис. 5, б выходная цепь блокируется и на выходе устанавливается постоянный логический «0». Условиями возникновения этого транзистора является повышенное значение $E_{плт}$ ИС, повышенная температура, близкое расположение элементов друг от друга и высокие значения коэффициента усиления транзисторов. Последнее условие весьма важно. В большинстве случаев для увеличения быстродействия ИС ТТЛ вводится золото в элементы ИС. Однако, при технологических колебаниях процесса введения золота возможна ситуация, когда его относительно мало, что приводит к резкому увеличению $V_{ст}$ и, как следствие, образованию паразитного транзистора $p-n-p$ в составе областей эмиттера, диода смещения, коллектора и базы выходного транзистора. Для его включения, кроме того, необходим большой ток на выходе ИС. В ТТЛ-вентильях стандартного типа (см. рис. 5, б) такой ток обеспечивается верхним транзистором, в цепи коллектора которого стоит резистор небольшого сопротивления (100—200 ом). Поэтому для исключения образования паразитного транзистора в вентильях с полным построением не рекомендуется помещать диод смещения и выходной транзистор в одном кармане. Если применяется «усеченный» вентиль (рис. 6), в котором исключен большой ток на выходе, то для совмещения диода и выходного транзистора в одном кармане нет ограничений.

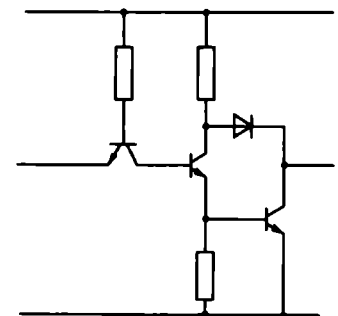


Рис. 6. Эквивалентная схема ТТЛ «усеченного» вентиля

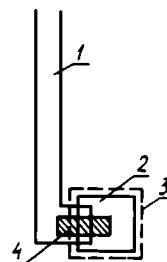


Рис. 7. Фрагмент биполярной ИС ТТЛ: 1 — p -область резистора; 2 — n^+ -область шины питания; 3 — фронт боковой диффузии n^+ -области; 4 — контактное окно к резистору и n^+ -области

Другие виды неисправностей конструкции. Известно, что на каждом чипе имеются различные тестовые элементы: резисторы, диоды, транзисторы, а также метки для совмещения. При этом для экономии места они располагаются на любых свободных участках по периферии кристалла, в том числе и в области общего кармана резисторов, соединенных с шиной питания. В нашей практике имелись случаи снижения надежности ИС по причине образования паразитной связи из-за касания внутреннего вывода при некотором смещении точки металлизации тестового транзистора, расположенного вблизи сварной точки в кармане резисторов. В настоящее время все тестовые элементы ИС серий 106, 134 располагаются либо в отдельном кармане, либо вне пределов досягаемости сварной точки на кристалле при любых неблагоприятных сочетаниях отклонений по допускам.

В биполярных ИС ТТЛ один из концов резисторов, соединенных с шиной питания, смыкается с n^+ -областью определенных размеров для уменьшения паразитной емкости резистора (рис.7). Здесь при возможных колебаниях размеров контактного окна к резистору, n^+ -области, самого резистора может произойти перехват контакта Al к p -области резистора n^+ -области с учетом боковой диффузии, что приводит к повышению сопротивления контакта вплоть до состояния обрыва.

Многие из отмеченных «слабых» мест конструкции кристалла относительно легко устанавливаемых в ИС малой и средней степеней интеграции, трудно обнаружить в ИС большой степени интеграции. Навыки, полученные при анализе и конструировании несложных ИС, при эвристическом подходе позволяют целенаправленно анализировать конструкцию БИС и СБИС. То есть можно сказать, что при конструировании БИС необходимо иметь некий справочный банк данных, которые можно выводить на дисплей ЭВМ, по возможным случаям снижения надежности из-за вышеперечисленных и подобного рода недостатков конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. — М.: Радио и связь, 1983. — 232 с.
2. Пономарев М.Ф. Конструкции и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА. — М.: Радио и связь, 1982. — 288 с.
3. Козырь И.Я. Качество и надежность интегральных микросхем. Вып. 5. — М.: Высшая школа, 1987. — 144 с.
4. D r a t a n i k D., S a x e n a A.N. VLSI metallization using aluminum and its. — Alloys. Solid State Technology, 1983, vol.26, N 1, p. 127—134.
5. Кудынов А.И., Петров Б.К. Метод диагностирования помехоустойчивости микросхем. — Тез. докл. на II научно-технической конференции «Состояние и пути повышения надежности кассетных видеоманитофонов. Новгород, 1988, с. 27—28.

Интегральные ИК фотоприемные устройства на основе узкозонных полупроводников

А.А.ВЕЛИЧКО, И.А.ОКОМЕЛЬЧЕНКО

Показана возможность за счет использования буферного слоя фторидов $\text{BAF}_2/\text{CAF}_2$ получать гетерозпитаксиальные фоточувствительные слои соединений A_4B_6 и CdTe высокого структурного совершенства с хорошими электрофизическими параметрами. Важным преимуществом указанных гетероструктур является возможность создания на них интегральных ФПУ со схемой обработки на кремнии, что значительно увеличивает надежность приборов. Использование диэлектрических свойств буферного слоя фторидов позволяет осуществлять диэлектрические и емкостные развязки цепей управления матрицей ИК-приемника и схемы обработки. Применение структур полупроводник

узкозонные полупроводники — наиболее перспективные материалы для создания ИК фотоприемных устройств (ИК ФПУ), работающих в диапазоне длин волн 3—12 мкм, благодаря

на диэлектрике значительно повышает радиационную стойкость приборов. Наличие механизмов релаксации напряжений, возникающих при охлаждении структур до рабочих температур и близость значений КТР фторидного буфера и фоточувствительного слоя улучшают стабильность характеристик приборов при многократных процессах термоциклирования. За счет совершенствования технологии возможно значительное улучшение параметров приборов, которые приближаются к соответствующим значениям для КРТ, но имеют большую воспроизводимость и однородность по площади.

высокой квантовой эффективности и низкому уровню шумов при заданной рабочей температуре. В качестве материалов для фотоприемников широко используются соединения A_4B_6 . Это

Сравнительные характеристики материалов

Материал	Постоянная решетки, Å	Коэффициент термического расширения $\times 10^{-6}, K^{-1}$	E_g , эВ	$\lambda_{гр}$, (красная граница), мкм
Si	5,431	2,6	1,1	1,1
CaF ₂	5,46	19,2	10,0	—
BaF ₂	6,20	19,8	10,0	—
SrF ₂	5,94	20,2	0,42	3,0 (300K)
			0,37	3,4 (200K)
			0,31	4,0 (77K)
PbTe	6,46	19,8	0,27	4,6 (200K)
			0,22	5,6 (77K)
Pb _{1-x} Se _x ($x = 0 \div 1$)	5,94—6,12		0,42—0,17	3—7
Pb _{1-x} Eu _x Se ($x = 0 \div 0,002$)	6,12		0,17—0,42	7—3
Pb _{1-x} Sn _x Se ($x = 0 \div 0,2$)	6,12—6,06		0,17—0,0	7—∞
Pb _{1-x} Sn _x Te ($x = 0 \div 0,04$)	6,46—6,40		0,3—0,0	4—∞

обусловлено их высокой чувствительностью к излучению, что позволяет сравнить их с HgCdTe, а также возможностью получения на основе A₄B₆ таких твердых растворов, которые могут быть использованы для приемников ИК излучения, как Pb_{1-x}Sn_xSe, PbSi_{1-x}Se_x, Pb_{1-x}Sn_xTe, прикрывающих диапазоны 3—8 и 8—12 мкм и эпитаксиальных слоев с высокими электрофизическими параметрами методом эпитаксии из молекулярных пучков (ЭМП).

Многоэлементные ФПУ включают в себя, как правило, матрицу фоточувствительных элементов и схему обработки. Поскольку создание схемы обработки на том же узкозонном материале сегодня невозможно, то сопряжение элементов матрицы со схемой обработки на кремнии выполняют по гибридной технологии с использованием обратного монтажа на индиевых столбах или гибких выводах (шлейфов) [1], что усложняет технологию и снижает надежность.

Наиболее перспективно создание монолитных интегральных ИК ФПУ на основе гетероэпитаксиальных слоев узкозонных полупроводников, выращенных на кремниевой подложке, которая может быть использована как окно для ввода ИК излучения и как базовый кристалл, в котором формируется схема обработки.

Гетероэпитаксиальный рост соединений A₄B₆ и их твердых растворов непосредственно на поверхности кремниевых подложек приводит к возникновению в них многочисленных дефектов структуры, обусловленных различием постоянных решеток и КТР пленки и подложки.

Для снижения плотности структурных дефектов используются буферные слои разных мате-

риалов, сглаживающих различия параметров пленки и подложки. Для гетеросистемы A₄B₆/Si в качестве материала буферного слоя наиболее подходят фториды щелочно-земельных металлов (ФЩЗМ), обладающие хорошими диэлектрическими свойствами, а также возможностью получения эпитаксиальных слоев методом ЭМП в замкнутом технологическом цикле с A₄B₆ [1]. Сравнительные характеристики соединений A₄B₆, CaF₂, SrF₂, BaF₂ и Si приведены в таблице 1, из которой следует, что наиболее близкими значениями постоянных кристаллических решеток обладают Si и CaF₂, а ближе всех в ряде фторидов к соединениям A₄B₆ стоит BaF₂. Это означает, что буферный слой ФЩЗМ должен иметь сложную структуру: или непрерывно меняющийся по толщине состав (Ca, Sr, Ba), F₂, или несколько слоев со ступенчато меняющимся составом по толщине. При создании такого буфера необходимо решать несколько самостоятельных задач по гетероэпитаксии: фторида кальция на кремниевой подложке, фторида бария на поверхности CaF₂ и A₄B₆ на поверхности фторида бария. В случае использования ФЩЗМ сложного состава, непрерывно меняющегося по толщине, в своей основе эти три проблемы остаются.

Структурное совершенство фоточувствительных слоев A₄B₆ и, следовательно, качество и параметры фотоприемников на них будут в значительной степени определяться успешным решением задач гетероэпитаксии.

В работе на основе литературных данных проводится анализ современного состояния технологии получения слоев A₄B₆ и CdTe на поверхности структуры (Ca, Sr, Ba) F₂/Si, приводятся

параметры фотоприемников и рассматриваются пути совершенствования технологического процесса.

ОСАЖДЕНИЕ ФТОРИДОВ МЕТОДОМ ЭМП

Осаждение фторидов ЩЗМ (ФЩЗМ) проводится в установках эпитаксии из молекулярных пучков с исходным вакуумом 10^{-8} Па. Фториды кальция, стронция и бария имеют низкое давление насыщенных паров и сублимируются при относительно низких температурах $T_s \sim 1200^\circ\text{C}$ из резистивных молекулярных источников в виде недиссоциирующих молекул. Отсутствие диссоциации ФЩЗМ позволяет получать однородные по составу пленки.

В качестве материала тиглей в молекулярных источниках нежелательно использовать нитрид бора, поскольку в этом случае в выращенных пленках фторидов обнаруживается бор, а электрофизические параметры диэлектрических пленок резко ухудшаются [2]. Использование недостаточно очищенных ФЩЗМ при эпитаксии приводит к возникновению структурных и морфологических дефектов в слоях фторидов, что значительно снижает диэлектрические характеристики.

Перед началом эпитаксиального роста подложка кремния подвергается стандартной химической обработке, а затем помещается в ростовую камеру установки ЭМП, где отжигается при $T_s \cong 800\text{--}900^\circ\text{C}$. В процессе отжига окисел десорбируется с поверхности кремния. Процесс термообработки контролируется методом дифракции быстрых электронов (ДБЭ): в случае использования подложек кремния с ориентацией ростовой поверхности (111) на экране ДБЭ наблюдается сверхструктура (7×7), а для подложек Si (001) — сверхструктура (2×1).

После завершения отжига температура подложки снижается до необходимой, открываются заслонки предварительно разогретых до рабочих температур молекулярных источников и происходит процесс роста слоев ФЩЗМ.

ГЕТЕРОЭПИТАКСИЯ ФЩЗМ НА КРЕМНИИ

На качество кристаллической структуры гетероэпитаксиальных слоев CaF_2 , SrF_2 , BaF_2 выращенных на кремнии методом ЭМП влияют температура подложки, ее ориентация, скорость осаждения. Процессы роста CaF_2 на поверхности кремния описаны в работах [3—5].

На подложках Si (111) слои CaF_2 растут по двумерно-слоевому механизму и обладают хорошей морфологией поверхности. Эпитаксиальный рост приводят при температуре $T_s = 500\text{--}800^\circ\text{C}$ со скоростью роста 0,4—1,0 мкм/ч. Двумерный рост обусловлен низким значением свободной поверхности энергии CaF_2 (111) (450 Эрг/см²). Типичные структурные дефекты, наблюдаемые в слоях CaF_2/Si (111) — двойники типа А и В. Тип А — это эпитаксиальная структура, имею-

щая ту же ориентацию, что и подложка кремния, тип В — структура, развернутая на 180° по отношению к А вокруг направления $\langle 111 \rangle$. Использование других режимов осаждения (например, твердофазной эпитаксии на начальной стадии роста и последующего дорастивания слоя CaF_2) также приводит к возникновению микродвойников, границы раздела которых содержат дислокации в плоскости, перпендикулярной ростовой поверхности [6]. Возникновение областей, находящихся в двойниковой и недвойниковой позициях при различных условиях эпитаксии практически равновероятно, и по-видимому, обусловлено близкими значениями энергии образования структур типов А и В. Как показывают расчеты, разница энергий составляет 0,1 эВ [7], поэтому на наличие микродвойников в значительной мере будут влиять неоднородности в распределении температуры по площади подложки, качество ее подготовки и морфология поверхности.

На подложках Si (001) диапазон температур, при которых получают качественные слои CaF_2 узок и находится около $T_s = 550^\circ\text{C}$. Рост осуществляется по трехмерному механизму, который обусловлен высоким значением свободной поверхности энергии (001) поверхности CaF_2 , которая примерно в два раза превышает ее значение для (111) поверхности CaF_2 . Трехмерный рост приводит к образованию пирамид роста на поверхности CaF_2 (001) (фасет) и структурным дефектам в объеме пленки. Для снижения дефектности и улучшения морфологии поверхности используют различного рода отжиги [8]. Наилучшие результаты дает быстрый отжиг, который значительно улучшает морфологию поверхности и снижает плотность структурных дефектов на границе раздела $\text{CaF}_2\text{—Si}$ и в объеме слоя CaF_2 .

Выращивание слоев BaF_2 и SrF_2 непосредственно на подложке кремния с достаточно хорошим качеством могло бы значительно упростить проблему получения буферного слоя между A_4V_6 и Si. Попытки получения эпитаксиальных слоев BaF_2 и SrF_2 на Si (001) и Si (111) были сделаны в работах [9, 10].

Слои BaF_2 на Si (111) растут кристаллическими при $T_s = 650^\circ\text{C}$, имеют ту же ориентацию, что и подложка, и содержат в основном эпитаксиальные структуры типа В. Параметр канализирования не превышал для них $\chi < 0,05$, что говорит о достаточно высоком структурном совершенстве слоев BaF_2/Si (111). В то же время поверхность слоев BaF_2 , выращенных при $T_s > 400^\circ\text{C}$ содержит сетку трещин, плотность которых возрастает с увеличением температуры эпитаксии.

При пониженных температурах эпитаксии $T \approx 450^\circ\text{C}$ ухудшается структурное качество слоев BaF_2 ($\chi > 0,15$) [10].

Слои BaF_2 (001) имеют минимальную плотность дефектов при температуре роста $T_s \approx 550^\circ\text{C}$, однако по данным рентгеноструктурного анализа они ориентированы преимущественно по $\langle 111 \rangle$. На поверхности BaF_2/Si (001) обычно наблюдаются трещины, располагающиеся вдоль направ-

лений $\langle 110 \rangle$, что также свидетельствует о наличии структуры BaF_2 (111)/Si (001), по-видимому, текстуры.

Эксперименты по эпитаксии слоев SrF_2 на кремнии любой ориентации показали, что несмотря на меньшее рассогласование постоянных кристаллических решеток SrF_2 и Si дефектность слоев SrF_2 значительно выше, чем BaF_2 .

ГЕТЕРОЭПИТАКСИЯ BaF_2 НА СТРУКТУРАХ CaF_2/Si

Слой BaF_2 можно сразу же выращивать на поверхности CaF_2/Si (111) без проведения дополнительных отжигов, так как морфология поверхности CaF_2 хорошая. Температуры осаждения BaF_2 как правила не превышают $350\text{--}400^\circ\text{C}$. В некоторых случаях рост BaF_2 начинают при $T_s = 700^\circ\text{C}$, соответствующей температуре эпитаксии CaF_2/Si (111), а после осаждения слоя в несколько десятков нанометров температуру снижают до $T_s = 350\text{--}450^\circ\text{C}$ [11]. Пленка BaF_2 растет монокристаллической, несмотря на рассогласование постоянных решеток с CaF_2 в 14%, образуя при этом эпитаксиальную структуру типа А относительно CaF_2 . Полная толщина слоя BaF_2 обычно не превышает $d = 200$ нм и определяется оптимальной толщиной, при которой плотность структурных дефектов минимальна. На рис.1 приведена зависимость параметра каналирования χ от толщины слоя d . Видно, что оптимальные значения толщин слоя лежат в диапазоне $150\text{--}300$ нм. Уменьшение χ с ростом толщины слоя BaF_2 связано со снижением влияния дефектной области на границе раздела $\text{BaF}_2\text{--CaF}_2$. Причина возрастания χ после достижения $d = 400$ нм авторам работы [11] не ясна. Как следует из рис.1 величина $\chi = 0,05$, достигаемая при $d = 200$ нм, не превышает аналогичного значения для CaF_2/Si .

Эпитаксиальный рост BaF_2 на структурах CaF_2/Si (001) проводят при $T = 550^\circ\text{C}$ после предварительного быстрого отжига при $T_s = 1000^\circ\text{C}$ в течение 10 с [12]. Качество отжига контролируется по ДБЭ: после завершения отжига точечные рефлексы вытягиваются в тяжи. Рост BaF_2 осуществляется при $T = 550^\circ\text{C}$ до толщины $d = 200$ нм, в процессе которого на поверхности BaF_2 вновь возникают пирамиды роста — фасеты. Для их устранения проводят еще один быстрый отжиг при температуре $T_s = 700^\circ\text{C}$, после чего поверхность BaF_2 становится зеркально гладкой и на ней возможен двумерный рост BaF_2 [13].

Таким образом, применение сложного фторидного буфера позволяет уменьшить решеточное несоответствие между подложкой кремния и верхними фоточувствительными слоями A_4B_6 , CdTe и др. (табл.1). Для лучшего согласования постоянных решеток ФЦЗМ и фоточувствительного слоя сверху слоя BaF_2 осаждается слой фторидов сложного состава $(\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba})\text{F}_2$.

Значительное различие по КТР между под-

Рис. 1. Зависимость параметра каналирования χ_{min} от толщины пленки BaF_2

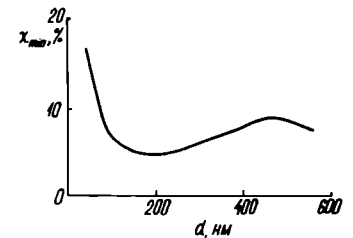
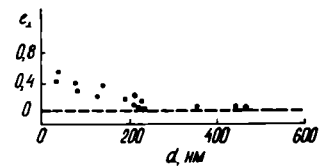


Рис. 2. Изменение напряжения сжатия e_4 в зависимости от толщины слоя BaF_2 , выращенного на структуре CaF_2/Si (111) (измерено методом рентгеновской дифракции)



ложкой кремния, ФЦЗМ и фоточувствительными слоями существенно осложняет не только гетероэпитаксию, но и последующие процессы термоциклирования и охлаждения фотоприемников до рабочих температур. Напряжения, возникающие при этом, могут приводить к возникновению структурных дефектов во всех слоях гетероструктуры и даже к ее растрескиванию, как это наблюдается для BaF_2/Si (001). Однако эксперименты показывают, что в двуслойной гетероструктуре $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}$ (111) напряжения в слое BaF_2 существенно зависят от его толщины и при $d \geq 200$ нм полностью отсутствуют (рис.2). При меньших толщинах возникают напряжения растяжения $e_{||}$ в плоскости, параллельной ростовой поверхности и напряжения сжатия e_{\perp} , перпендикулярные ей. Напряжения e_1 и e_4 связаны соотношением $e_{||} = -e_4/A$, где A рассчитывается с помощью упругих констант BaF_2 [14]. Уменьшение напряжений в пленке BaF_2 при толщинах $d \geq 200$ нм объясняется возникновением пластических деформаций в ней, и, вероятно, в наибольшей степени на границе раздела $\text{BaF}_2\text{--CaF}_2$. Такой процесс релаксации напряжений характерен для всех ФЦЗМ и, в частности, для системы CaF_2/Si (111). Однако в BaF_2 релаксация идет быстрее, вероятно из-за значительно меньших констант упругости этого материала по сравнению с CaF_2 и SrF_2 .

Способность фторида бария полностью релаксировать напряжения позволяет получать на его поверхности ненапряженные слои различных материалов, не обладающих высокими пластическими свойствами [11]. В качестве примера можно привести гетероструктуру $\text{CaF}_2/\text{BaF}_2/\text{CaF}_2$ на поверхности Si (111), в которой верхний слой CaF_2 имел значительно более высокое структурное совершенство по сравнению с первым, нижним слоем, выращенным на Si (111). В работе [15] показано, что напряжения отсутствуют и в структуре $\text{PbTe}/\text{BaF}_2/\text{CaF}_2$, выращенной на Si (111), а в [14] отмечено, что постоянная решетки CdTe , выращенного также на BaF_2 , соответствует ее объемному значению с точностью до $3 \cdot 10^{-4}$.

Аналогичные исследования релаксации напряжений проводились и в гетеросистемах $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}$ (001) [12]. Обнаружено, что в этом случае напряжения также уменьшаются с ростом толщины слоя фторида бария, однако не исчезают полностью (остаточные напряжения не превышают 0,2%), что не является критичным для проведения гетероэпитаксии слоев CdTe или A_4B_6 на поверхности BaF_2 .

Однозначного ответа на природу релаксационных процессов пока нет. Вероятнее всего, гермические напряжения релаксируют за счет возникновения дислокаций несоответствия (ДН) на гетерограницах $\text{CaF}_2/\text{BaF}_2$ и $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2$ в процессах роста и остывания гетероструктуры от ростовых температур до комнатной. Но при охлаждении их до гелиевых температур с последующим нагреванием (термоциклирование) вероятность их возникновения мала. Тем не менее термоциклирование таких гетероструктур при температурах от 15 до 300К не приводит к изменению электрофизических параметров слоев [15].

В заключение этого раздела можно сделать вывод, что использование ФЦЗМ в качестве буфера для согласования постоянных решеток и релаксации напряжений, возникающих за счет КТР, является уникальной возможностью получения бездефектных фоточувствительных слоев.

ГЕТЕРОЭПИТАКСИЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЛОЕВ НА СТРУКТУРАХ $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}$

Гетероэпитаксиальный рост CdTe на поверхности буферного слоя фторида обычно проводят либо методом ЭМП, либо горячей стенки. Оба процесса протекают в условиях сверхвысокого вакуума (СВВ), что позволяет камеру ЭМП для эпитаксии ФЦЗМ и камеру роста CdTe объединить СВВ-транспортным устройством. В этом случае говорят о замкнутом технологическом цикле подготовки подложки — роста буферного слоя — роста эпитаксиального полупроводникового слоя [16]. Поверхность фторидов подвергается сравнительно простой очистке в условиях СВВ: термический отжиг при относительно невысоких температурах дает атомарно чистую поверхность [1].

Гетероэпитаксию CdTe на поверхности гетероструктуры [17] $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}$ (111) проводят при температуре подложки $T_s = 300\text{—}400^\circ\text{C}$ со скоростью $V = 4$ мкм/ч. Как правило, пленка CdTe имеет эпитаксиальную структуру типа В хорошего качества, но иногда (вероятно, из-за наличия остаточных загрязнений на поверхности слоя BaF_2) наблюдаются одновременно структуры А и В типов.

На поверхности гетероструктуры $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}$ (001) при $T_s = 270^\circ\text{C}$ проводят эпитаксию CdTe , в процессе которой на экране ДБЭ наблюдаются вытянутые рефлексy (тяги), что указывает на двумерный механизм роста CdTe .

Иногда для улучшения морфологии поверхности слоев CdTe используется поток Te из дополнительного источника.

Слои CdTe , выращенные на поверхности фторидного буферного слоя, по своему качеству не уступают выращенным на GaAs или InSb и, следовательно, в этом случае появляется возможность создания схемы обработки на кремнии при наличии диэлектрической развязки между CdTe и Si .

Гетероэпитаксию бинарных соединений PbTe или PbSe обычно осуществляют сублимированием выбранного материала из одного тигля. При получении твердых растворов типа $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$ сублимированные PbSe и SnSe проводят из двух тиглей одновременно, добываясь изменением молекулярных потоков необходимого состава x . Ширина запрещенной зоны твердого раствора зависит от x :

$$E_g = 130 - 890x + 0,45T \text{ мэВ,}$$

и определяет красную границу поглощения.

Эпитаксию проводят при температурах подложки $T_s = 300\text{—}450^\circ\text{C}$ со скоростью от долей до нескольких микрометров в час. В этих условиях после образования сплошного слоя пленки, рост идет по двумерному механизму, обеспечивая получение качественной пленки с зеркальной поверхностью.

Электрофизические параметры слоев A_4B_6 , выращенных на фторидном буфере также высоки: в частности, в слоях PbSe , полученных методом горячей стенки, подвижность электронов при $T = 77\text{K}$ составила $\mu_n = 3 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, что сравнимо с ее значением для объемного материала [10].

ПАРАМЕТРЫ ИК ПРИЕМНИКОВ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

В зависимости от выбранного диапазона излучения и назначения разработаны различные конструкции ИК ФПУ.

Приемник на PbSe . В качестве активного слоя используется PbSe для создания ФПУ, в диапазоне длин волн 3—5 мкм. В работе [10] приводятся следующие параметры фотоприемника: $R_0A \approx 0,14 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ при $T = 77\text{K}$, что соответствует величине обнаружительной способности $D^* = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}\cdot\text{Вт}^{1/2} \text{ Гц}^{1/2}$ при длине волн $\lambda = 7 \text{ мкм}$. В работе не приводится зависимость D^* от λ .

Приемники на PbTe . В качестве фоточувствительного материала в диапазоне длин волн 3—5 мкм широко используется PbTe . На рис.3 приведены темновая и световая вольт-амперные характеристики типичного ИК приемника на PbTe , выращенного на кремнии через фторидный буфер [1]. Дифференциальное сопротивление при нулевом совмещении $T = 90\text{K}$ составляет $R_0 = 40 \text{ МОм}$. Величина R_0A достигает значения при этой температуре $3 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$, а среднее

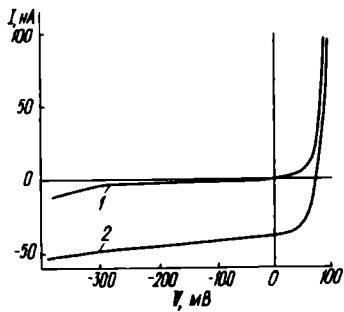


Рис. 3. ВАХ элемента ФПУ из $PbTe/(Ba, Ca)F_2/Si(111)$: 1 — темновая характеристика, 2 — в условиях фоновой засветки ($T_\phi = 300K$)

значение $R_0A = 1 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Граничное значение длины волны при $T = 90K$ составляет $\lambda = 5,5 \text{ мкм}$, а при $T = 200K$ $\lambda_{гр} = 4,5 \text{ мкм}$. При $T = 200K$ $R_0A = 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Типичная квантовая эффективность приемника составляет $\eta \geq 50\%$.

Расчет величины обнаружительной способности при $\eta = 50\%$ для различных температур дает значения $D^* = 2 \cdot 10^{12}$, $1 \cdot 10^{10}$ и $2 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ при $T = 90$, 200 и $300K$ соответственно. Расчет проводился по следующей формуле:

$$D^* = \eta q / E_g (R_0A / 4KT)^{1/2},$$

где η — квантовая эффективность.

Достигнутые в работе [1] результаты ниже теоретически возможных, поэтому дальнейшее совершенствование технологии позволит улучшить параметры приборов [15].

Приемники PbS . Наиболее высокие результаты показали ИК приемники на PbS , выращенные с использованием буферного фторидного слоя [18]. Параметры приемника приведены в таблице 2, а на рис.4 показана ВАХ типичного элемента ФПУ при трех различных температурах.

Для многоэлементных ФПУ важнейшим параметром является однородность распределения электрофизических характеристик по площади

Таблица 2

Параметры ИК приемника на PbS

T, K	$\lambda_{гр}$, мкм	R_0A , Ом·см ²	$D\lambda^*$, см·Вт ⁻¹ ·Гц ^{1/2}
300	3,0	0,1	$3 \cdot 10^9$
277	3,1	0,2	$4,5 \cdot 10^9$
200	3,4	3,0	$2 \cdot 10^{10}$
150	3,6	200	$2 \cdot 10^{11}$
84	4,0	$2 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^{13}$

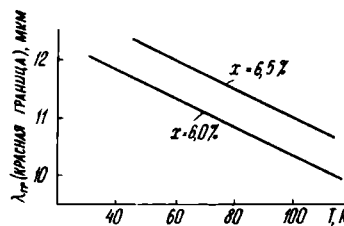


Рис. 7. Температурная зависимость $\lambda_{гр}$ (красной границы) приемника излучения на основе $Pb_{1-x}Sn_xSe/(Ba, Ca)F_2/Si$ при различных x

или по элементам. На рис.5 показано распределение величины R_0A по элементам. Эти данные свидетельствуют о достаточно высокой однородности по площади указанного 66-элементного приемника.

При сравнении этого приемника с ранее изготовленными на основе слиточного PbS или его

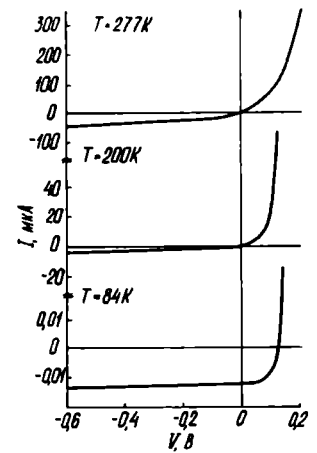


Рис. 4. ВАХ типичного элемента ФПУ из $PbS/(Ba, Ca)F_2/Si$ при трех различных температурах. Характеристика при $T = 84K$ получена в условиях фоновой засветки с $T_\phi = 300K$

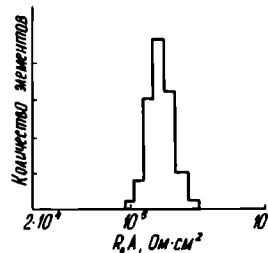


Рис.5. Распределение значений R_0A в линейке фотоприемников из 66 элементов на основе $PbS/(Ba, Ca)F_2/Si$ при $T = 84K$, $A = 50 \times 100 \text{ мкм}^2$

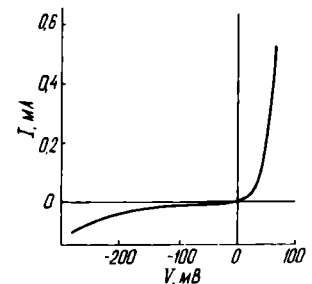


Рис. 6. ВАХ типичного элемента ФПУ из $Pb_{1-x}Sn_xSe/(Ba, Ca)F_2/Si$ при $T = 85K$. Величина динамического сопротивления при $T = 85K$ и нулевом смещении $R_0 = 4 \text{ кОм}$

эпитаксиальной пленки на слиточном BaF_2 видно, что величина чувствительности для него всего в три раза ниже, чем для слиточного материала [18].

В работе [1] выражена уверенность, что за счет дальнейшего совершенствования технологии получения гетероэпитаксиального слоя, изготовления прибора и использования антиотражающего (просветляющего) покрытия можно достигнуть следующих значений обнаружительной способности $D^* = 6 \cdot 10^{10}$; $2 \cdot 10^{12}$; $10^{15} \text{ см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ для рабочих температур $T = 300, 200, 77\text{К}$ соответственно.

Приемники на $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$, работающие в диапазоне длин волн 8—12 мкм. Наиболее перспективным материалом, рассчитанным на диапазон длин волн 8—12 мкм, является $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$, выращенный на кремнии через фторидный буфер [1]. На рис.6 показана вольт-амперная характеристика приемника на основе $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$. Среднее значение R_0A по всем 66-и элементам приемника было не хуже $0,05 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, а величина $D^* \cong 2 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ при 87К. Функционировали все элементы линейки. К преимуществам этого материала можно отнести возможность изменения красной границы в зависимости от состава твердого раствора, получение которого из двух молекулярных источников RbSe и SnSe обеспечивает высокую точность и воспроизводимость результатов (рис.7).

Сравнение параметров ИК приемников на основе $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$ и $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ проведено в работе [1], в которой даны в сравнении значения R_0A для этих двух датчиков, их разница не превышает 5—25 раз. Однако, поскольку $D^* \cong (R_0A)^{1/2}$, то по обнаружительной способности эти датчики отличаются не более чем в 2—5 раз.

Технология создания датчиков на основе A_4B_6 на кремниевой подложке через буферный слой фторидов находится в стадии разработки и имеют значительные резервы как в области совершенствования процессов гетероэпитаксии, так и создания приборных структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Infrared sensor arrays with 3—12 μm cutoff wavelenghts, in heteroepitaxial narrow-gap semiconductors on silicon substrate/H.Zogg, S.Blunier, T.Hoshino et al. — IEEE transactions on electron devices, 1991, vol.38, N 5, p. 1111—1117.
2. Growth of single crystal and polycrystalline insulating fluoride films on semiconductor by molecular beam epitaxy/P.W.Sullivan, T.I.Cox, R.F.C.Farrow et al. — J. Vac. Sci. Technol., 1982, vol. 20, N 3, p. 731—732.
3. М и н о г - J a g u e A., F o n t a i n e C. Molecular beam epitaxy of insulating fluoride-semiconductor heterostructures. — Surface Science, 1986, vol. 168, N 1—3, p. 624—626.
4. В е л и ч к о А.А., Н о а к С.К. Структура и свойства эпитаксиальных пленок фторидов, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. — Обзор по электронной технике, 1988. Сер.3, вып. 7, № 1397, М., ЦНИИ «Электроника», с. 47.
5. В е л и ч к о А.А. Гетероэпитаксиальные КНД-структуры $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}$. Исследования. Применение. — Электронная промышленность, 1990, вып.8, с. 51—57.

6. HREM investigation of epitaxial layer and interface structure the CaF_2/Si heterosistem/V.Ju.Karasev, A.N.Kiselev, E.V.Orlova et al. — Microsc., Semicond. Mater. Conf., Oxford, 25—28 March 1991, section 7, p. 537—540.

7. S a t p a t h y S., M a r t i n R.M. Energates and valence-band offset of the CaF_2/Si insulator-on-semiconductor interface. — Phys. Rev., B, 1989, vol.39, N 12, p. 8494—8498.

8. Post-growth annealing treatments of epitaxial CaF_2 on $\text{Si}(100)$ /J.M.Phillips, L.Pfeiffer, D.C.Joy et al. — Solid State Sci. and Technol., 1986, vol.133, N 1, p. 224—227.

9. A s a n o T., I s h i w a r a H., K a i f u N. Heteroepitaxial growth of group-IIa-fluoride on Si substrates. — Jap. Joup. of Appl. Phys., 1983, vol.22, N 10, p. 1474—1481.

10. Z o g g H., H i i p p i M. Growth of high epitaxial PbSe onto Si using a $(\text{Ca}, \text{Ba})\text{F}_2$ buffer layer. — Appl. Phys. Lett., 1985, vol.47, N 2, p. 133—135.

11. Z o g g H., M a i e r P., M e l e h i o r H. Graded IIa-fluoride buffer layers for heteroepitaxy of lead chalcogenides and CdTe on Si. — Jour. of Crys. Growth, 1987, N 80, p. 408—416.

12. B l u n i e r S., Z o g g H., W e i b e l H. Growth of lattice-mismatched stacked epitaxial CaF_2 — SrF_2 — BaF_2 layers on (100) oriented Si substrates. — Appl. Phys. Lett., 1988, vol.53, N 16, p. 1512—1514.

13. Molecular beam epitaxial growth of (100) oriented CdTe on Si (100) using BaF_2 — CaF_2 as a buffer /A.N.Tiwari, W.Floeder, S.Blumer. — Appl. Phys. Lett., 1990, vol.57, N 11, p. 1108—1110.

14. Z o g g H. Strain relief in epitaxial fluoride buffer layers for semiconductor heteroepitaxy. — Appl. Phys. Lett., 1986, vol. 49, N 15, p. 933—935.

15. Photovoltaic infrared sensors in heteroepitaxial PbTe on Si /C.Maissen, J.Masek, H.Zogg, S.Blunier. — Appl. Phys. Lett., 1988, vol. 53, N 17, p. 1608—1610.

16. Особенности структуры многослойной гетеросистемы CaF_2/GaAs , выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии /А.А.Величко, А.К.Гутаковский, В.А.Илюшин и др. — Материалы VIII Междунар. конф. по микроэлектронике, 16—18 октября 1990 г., сер.3, т.2, с. 79—81.

17. Z o g g H., B l u n i e r S. Molecular beam epitaxial growth of high structural perfection CdTe on Si using $(\text{Ca}, \text{Ba})\text{F}_2$ buffer layer. — App. Phys. Lett., 1986, vol. 49, N 22, p. 1531—1533.

18. Monolithic photovoltaic PbS -on-Si infrared sensors array /J. Masek, A. Ishida, H.Zogg et al. — IEEE Electron Device Letters, 1990, vol. 11, N 1, p. 12—14.



Олеськив Б.С. Удаление адсорбированной влаги с поверхности кристалла. — Рукопись деп. в ЦНИИ "Электроника", 1993, № Р-5474.

Рассматриваются аспекты применения электромагнитного излучения для разрыва связей адсорбированных молекул агрессивных функциональных групп на поверхности кристалла.

УДК 661.384.3

ДЕПОНИРОВАНИЕ

Использование тонких пленок аморфного кремния в технологии СБИС ППЗУ

Б.Г.БУДАГЯН, И.В.ФИЛАТОВА, А.Ю.САЗОНОВ, Т.П.ТРАЙНИС,
Ю.И.ЩЕТИНИН

Показана возможность использования пленок гидрогенизированного аморфного кремния ($\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{N}_x\text{:H}$) с различными значениями x в технологии СБИС ППЗУ. В результате комплексного исследования свойств пленок $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{N}_x\text{:H}$ в диапазоне $x=0\div 0,15$ обнаружено, что при $x=0,05$ повышается стабильность материала по отношению к термообработкам без ухудшения электрофизических свойств. При $x=0,15$ модифицируется структура материала с образованием аморфного нитрида кремния. Испытания тестовых структур программируемых элементов на основе $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{N}_x\text{:H}$ подтвердили стабильность параметров ПЭ при $x=0,05$.

Проблема повышения информационной емкости запоминающих устройств (в частности, ППЗУ) может быть решена с помощью нового типа программируемого элемента (ПЭ) вертикальной конструкции, активный слой которого формируется из полупроводниковых материалов нового класса с напряженностью пробивного электрического поля 10^6 В/см. К таким материалам относится аморфный гидрогенизированный кремний ($\alpha\text{-Si:H}$), имеющий в тонком слое пробивное напряжение в пределах 4—6 В [1].

С учетом возможности различных схемотехнических решений накопителя и электроники обр-рамления к ПЭ могут предъявляться требования со значительными вариациями пробивных параметров, основные из которых — напряжение и ток пробоя $U_{пр}$ и $I_{пр}$ соответственно), предпробойный ток ($I_{ппр}$) и сопротивление после пробоя ($R_{ост}$). Управление этими параметрами возможно путем изменения состава пленки при добавлении новых компонентов в исходную газовую смесь. Так, использование сплавов $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{N}_x\text{:H}$ с различными значениями x позволяет варьировать параметры пробоя. При этом возникает вопрос не только об изменении, но и стабилизации ве-

личин пробивных параметров ПЭ, выдерживающих термические обработки ($\sim 450^\circ\text{C}$) на отдельных стадиях формирования. В НИИ молекулярной электроники (г. Москва) исследовано влияние содержания азота в пленках $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{N}_x\text{:H}$ (при $x=0; 0,05; 0,09; 0,15$) на их структурные и электрофизические характеристики, а также на пробивные параметры ПЭ, изготовленных на их основе. Изучено влияние термообработок на стабильность величин пробивных параметров ПЭ и определена область оптимальных значений x , позволяющих получить более стабильные значения параметров.

Пленки $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{N}_x\text{:H}$ были получены методом ВЧ разложения силано-аммиачной смеси в плазме тлеющего разряда [2]. При этом $T_s=220^\circ\text{C}$; $W_{уд}=0,3$ Вт/см²; $P=50$ Па, $P_{нн}$, варьировалось от 1 до 5 Па, что соответствует $x=0,05\div 0,15$.

Программируемые элементы вертикальной конструкции, представляющие собой сэндвич-структуры $\text{Me}-\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{N}_x\text{:H}-\text{Me}$, изготовлены на пластинах кремния со сформированным методом ионной имплантации слоем как p , так и n -типа (рис. 1). После предварительной очистки проводилось окисление пластин и с помощью

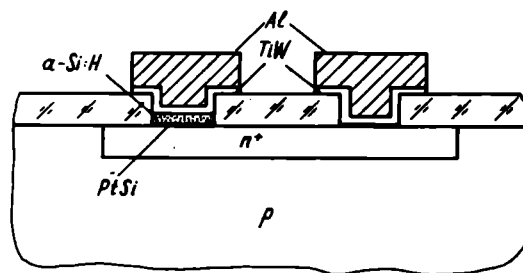


Рис. 1. Структура программируемых элементов (ПЭ) на основе $\alpha\text{-Si:H}$

Пробивные параметры ПЭ до и после термообработки

Состав слоя программирования	Содержание азота (x)	Усредненные параметры ВАХ до повторной термообработки				Режим термообработки		Усредненные параметры ВАХ после повторной термообработки			
		$I_{ут}$, мкА (2 В)	$U_{пр}$, В	$I_{пр}$, мА	$R_{ост}$, Ом (5 мА)	t° , С	τ , мин	$I_{ут}$, мкА (2 В)	$U_{пр}$, В	$I_{пр}$, мА	$R_{ост}$, Ом (5 мА)
α -Si:H	0	>0,1	7	0,3	1500	450	30	>0,1	7	0,3	5000
α -Si _{0,95} N _{0,5} :H	0,05	>0,1	10	0,3	2000	450	30	>0,1	10	0,3	2000
α -Si _{0,85} N _{0,15} :H	0,15	>0,1	40	0,3	2000	450	30	>0,1	40	0,3	3000

фотолитографических операций формирование в них окон, затем — осаждение пленки α -Si_{1-x}N_x:H. Толщина пленки обычно составляла 70—80 нм. После формирования пленки α -Si_{1-x}N_x:H осуществлялся следующий этап фотолитографических операций для формирования слоев металлизации (TiW + AlSi). Измерения пробивных параметров готовых структур ПЭ проводились в статическом режиме на стенде, включающем в себя характериограф TR-4805. Исследовано изменение параметров ВАХ, таких, как пробивные напряжения ($U_{пр}$) и ток ($I_{пр}$), ток утечки ($I_{нпр}$ при $U=2$ В) и остаточное сопротивление ($R_{ост}$) элементов, полученных при различном содержании азота в пленках (см. таблицу). Термические

обработки готовых структур осуществляли при температурах 300, 400 и 450°C в течение 30 мин в азоте.

На рис. 2 и 3 показаны спектры ИК пропускания пленок α -Si_{1-x}N_x:H при разных значениях и полученные на их основе зависимости концентрации связей Si—H, N—H, Si—N, а также общего содержания водорода от состава x. На спектре пропускания α -Si:H наблюдается характерная полоса поглощения в области 2020 см⁻¹, соответствующая кластерированным формам связывания водорода Si—H [3]. Подобное распределение водорода наблюдается на спектрах ЯМР α -Si:H [4] и связано с наличием микроструктурных неоднородностей в виде микропус-

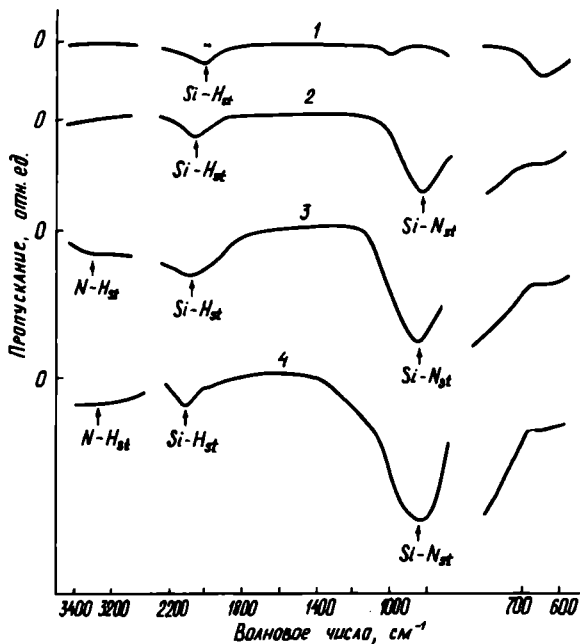


Рис. 2. Спектры ИК пропускания пленок α -Si_{1-x}N_x:H при $x=0$ (1), 0,05 (2), 0,09 (3), 0,15 (4)

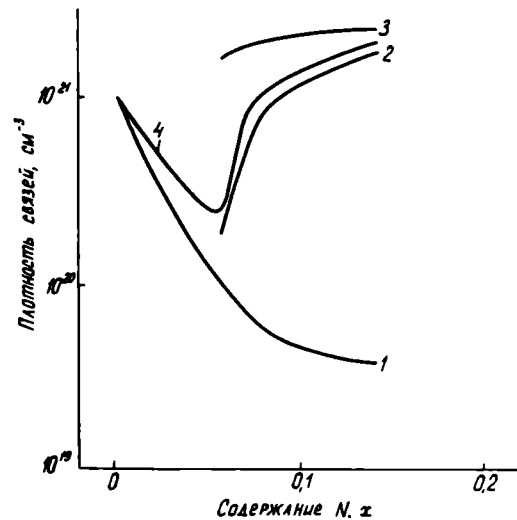


Рис. 3. Зависимость концентрации связей Si—H (1); N—H (2); Si—N (3), а также общего содержания водорода (4) от состава пленки x

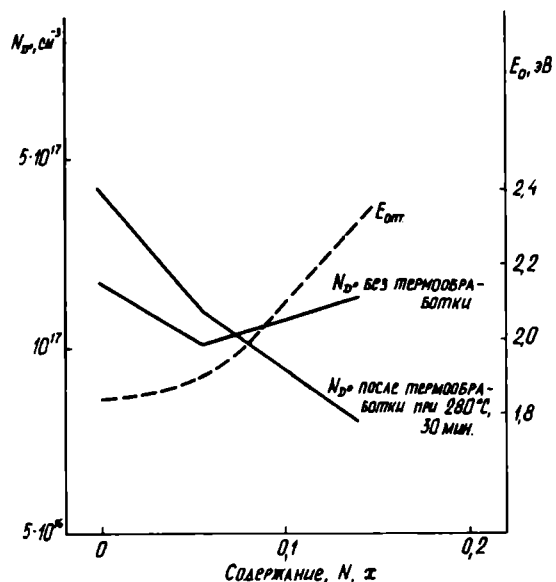


Рис. 4. Зависимость плотности нейтральных связей N_{D^0} и оптической ширины запрещенной зоны $E_{\text{опт}}$ от состава пленки x

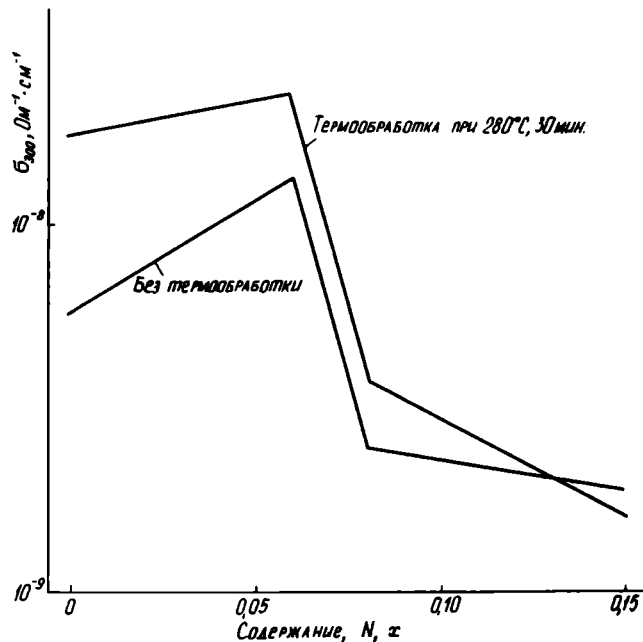


Рис. 5. Зависимость темновой проводимости σ_{300} от состава пленки x

тот [5], границ зерен [3] и др. Следует отметить, что такие неоднородности присутствуют и на пленках, полученных при «оптимальных» условиях и связаны с особенностями процесса роста [6, 7].

При добавлении азота на спектрах ИК пропускания обнаруживаются полосы поглощения в области 850 см^{-1} и 3350 см^{-1} , связанные с образованием связей $\text{Si}-\text{N}$ и $\text{N}-\text{H}$ соответственно [8, 9]. Как видно из рис. 3, небольшая добавка азота ($x=0,05$) приводит к резкому падению концентрации $\text{Si}-\text{H}$ связей и общего содержания водорода. При этом азот главным образом связан с атомами кремния. В то же время наличие полосы поглощения 2020 см^{-1} указывает на то, что атомы водорода также связаны с этими же атомами кремния [10]. Увеличение концентрации азота в пленке приводит к монотонному росту концентрации $\text{Si}-\text{H}$ связей и значительному росту числа $\text{N}-\text{H}$ связей. В результате общее содержание водорода в пленке возрастает.

На рис. 4 показана зависимость плотности нейтральных дефектов N_{D^0} , измеренной с помощью ЭПР, от содержания азота в пленке. Там же приведена кривая $N_{D^0}(x)$ для пленок $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{N}_x\text{:H}$ после их обработки в вакууме в течение 30 мин при температуре 300°C . Как видно, плотность дефектов при $x=0,05$ уменьшается по сравнению с нелегированным $\alpha\text{-Si:H}$, а при $x=0,15$ вновь возрастает. Влияние термообработки на плотность оборванных связей минимально также при $x=0,05$. При $x=0,15$ плотность оборванных связей после термообработки уменьшается, т.е. происходит смена знака изменения N_{D^0} .

На этом же рисунке представлена зависимость оптической ширины запрещенной зоны $E_{\text{опт}}$ от содержания азота в пленке x . При $x=0,05$ $E_{\text{опт}}$ слабо отличается от значения для нелегированного $\alpha\text{-Si:H}$ и значительно возрастает при дальнейшем увеличении x .

По-видимому, увеличение плотности оборванных связей и оптической ширины запрещенной зоны при $x=0,15$ свидетельствует об образовании нестехиометрического нитрида кремния, термообработка которого приводит к релаксации структуры и уменьшению N_{D^0} . Нестабильность свойств этого материала, как и в случае $\alpha\text{-Si:H}$, обусловлена избыточным содержанием водорода в виде $\text{N}-\text{H}$ связей. В свою очередь, увеличение стабильности свойств при $x=0,05$ связано с уменьшением общего содержания водорода и плотности дефектов N_{D^0} .

На рис. 5 показана зависимость темновой проводимости, измеренной при комнатной температуре σ_{300} до и после термообработок, от состава (x). Как видно, с увеличением концентрации азота в пленке влияние термообработок на проводимость уменьшается, и при $x=0,15$ знак изменения величины проводимости $\Delta\sigma_{300}$ меняется на противоположный. Аналогичное изменение знака зависимости уже отмечалось выше для N_{D^0} . Из рисунка также следует, что при небольших добавках азота ($x=0,15$) проводимость пленок максимальна. Это увеличение проводимости, видимо, связано с уменьшением общего содержания водорода (см. рис. 3) и плотности нейтральных дефектов D^0 (см. рис. 5).

Значительное уменьшение проводимости при дальнейшем увеличении x коррелирует с увеличением ширины запрещенной зоны (см. рис. 4), что связано с образованием нестехиометрического нитрида кремния.

Таким образом, пленки $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{N}_x\text{:H}$ при $x=0,05$ являются более стабильными по свойствам по сравнению с нелегированным $\alpha\text{-Si:H}$ и обладают при этом большей проводимостью и оптимальной структурой.

Для исследования возможности применения указанных материалов в ППЗУ были изготовлены тестовые структуры ПЭ на основе $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{N}_x\text{:H}$ $x=0; 0,05; 0,15$. В качестве подложек использовались пластины кремния с подслоем как p , так и n -типа (см. рис. 1). При использовании подложек p -типа кривая ВАХ ПЭ после пробоя имела в основном нелинейный вид.

Проведен анализ пробивных характеристик тестовых структур ПЭ на основе $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{N}_x\text{:H}$ до и после повторной термообработки. В таблице представлены величины пробивных параметров ПЭ, изготовленных на основе $\alpha\text{-Si:H}$, $\alpha\text{-Si}_{0,95}\text{N}_{0,05}\text{:H}$ и $\alpha\text{-Si}_{0,85}\text{N}_{0,15}\text{:H}$ до и после термообработок при температуре 450°C . Толщина пленок активного слоя во всех случаях была приблизительно одинаковой и составляла 70–80 нм. Как видно из таблицы, увеличение содержания азота в пленках приводит к повышению пробивных напряжений до 40 В при $x=0,15$, что и ожидалось. Необходимо отметить, что с ростом содержания азота изменение величины проводимости $\Delta\sigma_{300}$ в пленках после термообработок при температуре 450°C уменьшается, что свидетельствует о повышении их термической устойчивости.

Отсутствие влияния термообработок до температуры 450°C на величины пробивных характеристик ПЭ на основе $\alpha\text{-Si}_{0,85}\text{N}_{0,15}\text{:H}$, несмотря на значительное изменение при этом плотности дефектов в самой пленке, указывает на слабое участие оборванных связей кремния D^0 в процессе пробоя.

С другой стороны, при малом содержании азота ($x=0,05$) оптическая ширина запрещенной зоны пленок изменяется незначительно по сравнению с нелегированным $\alpha\text{-Si:H}$, что свидетельствует об определяющей роли матрицы аморфного кремния в структуре материала. В соответствии с этим величины пробивных характеристик структур, изготовленных на основе $\alpha\text{-Si}_{0,95}\text{N}_{0,05}\text{:H}$ повышаются незначительно. Корректировка пробивного напряжения до требуемой величины может быть достигнута путем изменения толщины активного слоя.

Таким образом, использование пленок $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{N}_x\text{:H}$ позволяет значительно повысить термическую стабильность ПЭ по сравнению с нелегированным $\alpha\text{-Si:H}$ при термообработках до 450°C и расширяет возможности управления величинами характеристик пробоя. Это, в свою очередь, определяет перспективы использования указанного материала в технологии СБИС ППЗУ.

Авторы выражают благодарность В.Х.Кудояровой (ФТИ им. Иоффе, Санкт-Петербург) и Л.Д.Богомоловой (МГУ) за помощь в проведении исследований методами ИК спектроскопии и ЭПР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Однократно программируемые элементы памяти на аморфном кремнии и возможность их использования в технологии СБИС/А.А.Айвазов, Б.Г.Будагян, И.В.Филатова, М.Н.Мейтин.— Электронная промышленность, 1991, вып. 7, с. 54.
2. Айвазов А.А., Бодагян Н.В., Приходько Е.Л., Белоусов В.С.— Электронная промышленность, 1991, вып. 1, с. 3.
3. Kniffler N., Schroeder B., Geiger J. Vibrational spectroscopy of hydrogenated evaporated amorphous silicon films.— Journ. of Non-Cryst. Solids, 1983, vol. 58, p. 153.
4. NMR investigation of hydrogen in amorphous silicon and related materials/J.B.Boyce, S.E.Ready, M.Stutzmann, R.E.Norberg.— Journ. of Non-Cryst. Solids, 1989, vol. 114, p. 211.
5. The observation of microvoids in device quality hydrogenated amorphous silicon/D.L.Williamson, A.H.Mahan, B.P.Nelson, R.S.Crandall.— Journ. of Non-Cryst. Solids, 1989, vol. 114, p. 226.
6. Amorphous silicon and related materials/Ed.by H.Fritzsche, N.Y., 1988.— 207 p.
7. Lee S.M., Jones S.J., Li Yu.-M., Turner W.A., Paul W./Phil. Mag. B., 1989, vol. 61, N 4, p. 547–564.
8. Osenbach J.W., Koille W.R. A model describing the electrical behavior of $\alpha\text{-SiN:H}$ alloys.— Journ. of Appl. Phys., 1986, vol. 60, N 4, p. 1408.
9. Chemical bonds identification in hydrogenated Si-based amorphous alloys by IR spectroscopy/G.Lucovsky, J.Yang, S.S.Chao et al.— Phys. Rev. B., 1983, vol. 28, N 6, p. 3234.
10. IR spectra of glow discharge silicon nitride/Sala Della, C.Coluzza, G.Fortunato, F.Evangelisti.— Journ. of Non-Cryst. Solids., 1985, vol. 77/78, Pt. 2, p. 933.



Гусев В.Г. Формирование голографических интерферограмм бокового сдвига. — Рукопись деп. в ЦНИИ "Электроника", 1993, № Р-5472.

Рассматривается освещение диффузного рассеивателя диффузно рассеянным когерентным излучением в дифференциальной голографической интерферометрии для контроля волновых aberrаций линз и объективов. Теоретически показаны и экспериментально подтверждены условия формирования интерференционных картин бокового сдвига в различных плоскостях их локализации. Проведение пространственной фильтрации позволяет регистрировать их независимо друг от друга.

УДК 778.38

ДЕПОНИРОВАНИЕ

Электрохимические методы формирования металлизации на пластинах арсенида галлия

Разработанные в НИИ микроприборов экономичные методы электрохимического осаждения Au—Ge в качестве металлизации для полевых транзисторов с меза-изоляцией позволяют уменьшить расстояние исток-сток и увеличить пробивное напряжение. Осаждение тонких слоев Au—Ge-металлизации в планарной технологии транзисторов Шоттки способствует получению хорошей морфологии и низкого омического сопротивления контакта.

Электрохимическое формирование разводки из золота с применением вспомогательных слоев ванадия и никеля позволяет получить точное воспроизведение топологии и уменьшить поверхностное сопротивление на высоких частотах.

Осаждение омических контактов в полевых транзисторах с меза-изоляцией

Б.Н.САМСОНЕНКО, *д-р техн.наук, проф.* П.В.ПАНАСЕНКО,
д-р техн.наук, проф. И.Н.СОРОКИН

Травление мезы с целью электрической изоляции активных областей широко используют в технологии полевых транзисторов на арсениде галлия. Этот способ характеризуется простотой и экономичностью. Используют химическое травление [1] или анодное окисление [2, 3]. Анодным окислением получают пологие грани мезы, что позволяет устранить утоньчение затворной дорожки, приводящее к СВЧ потерям транзистора. Осаждением из электролита по маске анодного окисла на мезе формируют омические контакты светодиодов [4]. Способ обеспечивает самосовместимость операций, предотвращает попадание металла на светоизлучающую поверхность прибора. Пассивацию анодным окислом поверхности канала полевого транзистора применяют [5] для повышения граничной частоты, снижения поверхностных токов утечки.

В НИИ микроприборов (г. Москва) разработаны методы маскирования при осаждении из электролита омических контактов полевого транзистора с меза-изоляцией [6]. Было обнаружено, что при осаждении омических контактов по одной только фоторезистивной маске на меза-структуре имеет место просачивание электролита под маску на гранях мезы, приводящее к закорачиванию стока и истока (рис. 1). Эффект «просачи-

вания» обусловлен как недостаточной адгезией маски, так и неоднородным распределением электрического поля на гранях мезы. Формирование пологой меза-границы эффект не устраняет.

Проблему решают с использованием двух вариантов маскирования. В первом случае после формирования меза-структур проводят анодное окисление меза-поверхности до толщины окисла 0,1—0,13 мкм. При толщине более 0,15 мкм искажается геометрия меза-структур из-за неконтролируемого окисления под фоторезистивной маской. Если толщина анодного окисла менее 60 нм, не обеспечивается локальность осаждения контактов. Удаляют фоторезист. Формируют фоторезистивную маску под омические контакты и

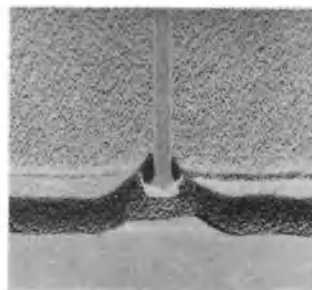


Рис. 1. Закорачивание омических контактов на гранях мезы

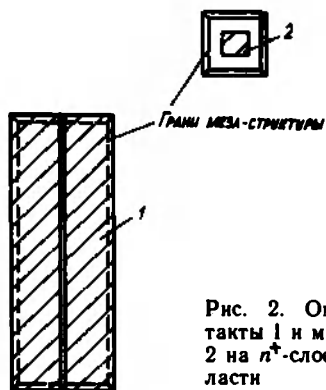


Рис. 2. Омические контакты 1 и маркерный знак 2 на n^+ -слое активной области

маркерные знаки. После нанесения резист подвергают инфракрасной сушке на установке УИС-1 в течение 5 мин. После проявления проводят плазмохимическую подчистку окон 1 мин, задубливание в УИС-1 20 мин.

Анодный окисел во вскрытых окнах, оставшийся после проявления, удаляют в растворе $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}=1:20$ за 10 с (окисел выходит в окна маски на гранях мезы).

Пластины устанавливают в кассету горизонтально, металлизуютой стороной вверх, что необходимо для свободного газовой выделения при осаждении металла. Электрический контакт к нижней полуизолирующей стороне пластины создают при освещении в электролите. Величина освещенности ~ 100000 люкс. В отсутствие освещения ток через пластину не протекает, осаждения не происходит. Электролитом для осаждения Au-Ge заполняют верхнюю часть кассеты с пластиной. В данном случае омические контакты транзистора осаждают только на n^+ -слой активной области (рис. 2).

Осаждение проводят без верхней подсветки пластины. Величина напряжения на электрохимической ячейке $U_{\text{яч}}=8$ В, общий ток через пластину $I=5$ мА (площадь открытой поверхности ~ 10 см²). Время осаждения $t=5$ мин. Толщина сформированных контактов и маркерных знаков составляет 0,17—0,23 мкм. Маркерный знак в виде квадрата 32×32 мкм располагают на n^+ -слое активной области. В случае, если окно фоторезистивной маски под маркерный знак приходится на вытравленную область, толщина осажденного там металла значительно превышает толщину омических контактов. По-видимому, это обусловлено отсутствием в этой области обратного смещенного $i-n$ -перехода.

Анодный окисел служит защитой от просачивания электролита под маску, снижая напряженность электрического поля на гранях мезы. При используемом режиме осаждения край формируемых контактов ровный, короткое замыкание отсутствует (рис. 3, а, б). Чем толще окисел, тем сильнее его экранирующее действие. Однако с увеличением плотности тока (величины напряжения на электрохимической ячейке) эффект «просачивания» электролита под маску на гранях

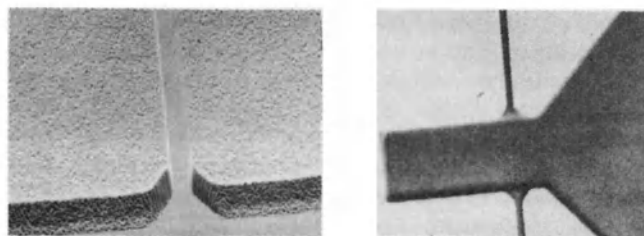


Рис. 3. Осажденные из электролита Au-Ge омические контакты после вжигания при увеличении $\times 2000$ (а) и $\times 800$ (б)

усиливается и при величине общего тока через пластину $I \sim 20$ мА ($U_{\text{яч}}=20$ В) не устраняется даже при наличии анодного окисла большой толщины ($\sim 0,17$ мкм). Фоторезистивную маску удаляют в диметилформамиде. Проводят вплавление омических контактов в диффузионной печи, в среде аргона $T=450^\circ\text{C}$, $t=3$ мин. Омическое сопротивление осажденных из электролита контактов на структурах $n^+-n^-+n^+-n^-+i$ составляет 0,2—0,3 Ом·мм, на структурах n^+-n^-+i 0,05—0,12 Ом·мм.

Другой способ устранения эффекта закорачивания — в осаждении контактов по маске анодного окисла. Для этого после травления меза-структур фоторезист удаляют, наносят слой SiO_2 . Формируют фоторезистивную маску, закрывающую области, предназначенные под омические контакты транзистора. В буферном растворе $\text{NH}_4\text{F}:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ вытравливают SiO_2 . Фоторезист удаляют. Проводят анодное окисление пластины по маске SiO_2 . Толщина формируемого окисла составляет $\sim 0,15$ мкм ($U_{\text{яч}}=100$ В). Толщина окисла в этом случае может быть и больше $\sim 0,2$ мкм, так как растравливание под маской SiO_2 изотропное. При использовании электрического контакта к обратной стороне пластины растет окисел одной толщины на активной области и низколегированной подложке.

Удаляют SiO_2 плазмохимическим травлением на установке 08-ПХО-100Т-001 селективно к арсениду галлия и анодному окислу. Для снятия плазменного окисла с поверхности пластины перед осаждением омических контактов проводят обработку в растворе $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$. Толщина окисла уменьшается при этом незначительно (~ 10 нм). Пластины устанавливают в кассету, создают электролитический контакт к обратной полуизолирующей стороне и проводят осаждение контактов по маске анодного окисла. Скорость растворения маски составляет ~ 20 нм/мин. После осаждения в канале остается окисел толщиной ~ 60 нм. Край контактов ровный, расстояние исток-сток составляет ~ 2 мкм. Минимальное расстояние определяется возможностями вписывания затвора фото- или электронно-лучевой литографией.

Наносят слой SiO_2 толщиной $\sim 0,3$ мкм, электронный резист ЭЛП-20. Проводят электронно-

лучевое экспонирование затворного слоя металлизации. Хорошая морфология поверхности осажденного металла обеспечивает надежный опрос маркерных знаков. После проявления и термообработки маски удаляют плазмохимически (направленно) SiO_2 в окнах. Анодный окисел в подзатворных областях канала стравливают. Проводят доподгонку статических параметров транзистора травлением в растворе $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$. Напыляют слой затворной металлизации V—Au—V толщиной $\sim 0,7$ мкм. «Взрывом» формируют субмикронный затвор размером $\sim 0,3$ мкм.

Анодный окисел, оставшийся в канале, предохраняет поверхность полупроводника от загрязнения, снижает электрический потенциал поверхности благодаря встроенному отрицательному заряду. В результате уменьшаются токи утечки и повышается пробивное напряжение транзистора. Окончательно наносят защитный слой SiO_2 , гальваническим осаждением золота формируют разводку.

Таким образом, анодный окисел целесообразно использовать в качестве маски при осажде-

нии омических контактов и для пассивации поверхности полупроводника в канале.

Осаждение из электролита экономично, сокращает непроемкий расход золота. Используемый при осаждении электролитический контакт к обратной стороне пластины устраняет необходимость в нанесении и последующем удалении вспомогательного слоя металла, что упрощает технологию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент США № 4336549, МКИ HOIL 29/48. Оpubл. 1982 г.
2. Патент Великобритании № 2094058, МКИ HOIL 29/80. Оpubл. 1983 г.
3. Патент Японии № 61-56613, МКИ HOI L 21/306. Оpubл. 1986 г.
4. Патент США № 4227975, МКИ HOIL 21/283. Оpubл. 1980 г.
5. Патент Японии № 60-145675, МКИ HOIL 29/80. Оpubл. 1985 г.
6. Филатов И.Н., Бакрунов А.О., Панасенко П.В. Микроэлектроника: Учеб. пособие для вузов в 9-ти кн. Кн. 7 Микроэлектронные СВЧ-устройства/Под ред. Колесова Л.А.— М.: Высшая школа, 1987, с. 78—85.

Получение Au—Ge контактов в планарной технологии

Б.Н.САМСОНЕНКО, А.В.СИГАЧЕВ, д-р техн.наук, проф. И.Н.СОРОКИН

При изготовлении полупроводниковых приборов осуществляется электрохимическое осаждение контактов на структурах n — p -типа [1]. На тыльной стороне полупроводниковой пластины формируют металлический слой, через который на пластину подают напряжение. Проводят электрохимическое осаждение контактов на противоположную сторону пластины, после чего вспомогательный слой металла удаляют. Недостаток способа состоит в том, что необходимы дополнительные операции по формированию и удалению слоя металла. Кроме того, при осаждении контактов на меза-структурах по фоторезистивной маске происходит сильное просачивание электролита под маску у граней меза-структур, что приводит к искажению геометрии рисунка, закорачиванию стока и истока. Осаждение контактов целесообразно проводить на планарных структурах.

При изготовлении субмикронного затвора с помощью электронно-лучевой литографии необходимо обеспечить удаление электростатического заряда на пластине, возникающего при экспонировании. В работе [2] предложен способ, согласно которому обратную сторону полуизолирующей пластины имплантируют ионами Si^+ и про-

водят отжиг. Возникающий в ходе электронно-лучевого экспонирования заряд стекает с тыльной стороны пластины. Однако используемый в этом случае высокотемпературный отжиг нежелателен для структур с эпитаксиальными слоями.

Для снятия электронного заряда с пластины можно формировать вспомогательный слой металла в виде сетки на межкристалльных дорожках. Но при больших расстояниях между областями экспонирования и металлической сетки (размеры кристалла больше 2×2 мм) удаление заряда не происходит. Заряд, накапливаясь на пластине, вызывает электростатическое отклонение электронного луча. В результате искажается формируемый рисунок. Для получения затворного рисунка с минимальным размером необходимо использовать планарные структуры.

В НИИ микроприборов (г.Москва) усовершенствована технология транзисторов с электрохимически осаждаемыми контактами и субмикронным затвором Шотки. По этой технологии используют пластины арсенида галлия с активным слоем $n^+ - n - n^- - i$ -типа с концентрацией $n^+ = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $n = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и толщиной $d_{n^+} = 0,12$ мкм, $d_n = 0,3$ мкм, $d_{n^-} = 0,5$ мкм.

Создают фоторезистивную маску с рисунком

омических контактов, маркерных и базировочных знаков. Расстояние исток-сток в маске составляет $\sim 2,2$ мкм.

Удаляют естественный окисел на поверхности полупроводника в растворе $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$. Пластины устанавливают в кассету горизонтально активным слоем вверх.

Создают электролитический контакт к обратной полуизолирующей стороне пластины. Проводят электрохимическое осаждение Au-Ge омических контактов. Толщина осажденных контактов составляет ~ 50 нм, расстояние исток-сток — $1,7\div 1,8$ мкм. В ходе процесса происходит осаждение металла под край фоторезистивной маски, что приводит к сужению исток-стоковой области. При малой толщине осаждаемых контактов величина ухода размера не превышает $0,5$ мкм. С увеличением толщины контактов до $0,15\text{--}0,2$ мкм происходит смыкание областей стока и истока. Формирование тонких слоев омических контактов $40\text{--}70$ нм позволяет воспроизводимо получать малый размер области исток-сток (в пределах $1\text{--}2$ мкм).

Электрохимическое осаждение контактов на планарную поверхность пластины позволяет исключить смыкание областей стока и истока на ступеньках рельефа, что имеет место при изоляции химическим травлением. Формирование исток-стоковой области размером менее 1 мкм ограничивается возможностями вписывания затвора при электронно-лучевой литографии. Равномерному осаждению металлизации способствует электропроводность n^+ -слоя пластины, не изолированного мезой.

Проводят сплавление контактов на установке лампового отжига «Импульс-5». Благодаря малой толщине омических контактов, сплавление осуществляется в «мягком» режиме: 450°C за 3 импульса продолжительностью $1,5$ с каждый. Для сплавления контактов толщиной $0,15\text{--}0,2$ мкм необходимо увеличивать длительность импульсов до $4\text{--}5$ с. Более длительный отжиг приводит к развитию морфологии контакта. На тонких слоях омической металлизации $40\text{--}70$ нм нарушения исходной морфологии не наблюдается, что связано с особенностями тонкопленочных структур. При отжиге силы смачивания Au-Ge сплавом поверхности полупроводника превышают силы каплеобразования, действующие на внешней поверхности контакта. Тонкий контакт прогревается более равномерно, за меньшее время, что сокращает продолжительность диффузионных процессов. Уменьшение глубины диффузионной области в полупроводнике позволяет сближать исток-стоковые участки омической металлизации.

Получить Au-Ge контакты термическим напылением не удастся из-за плохой морфологии поверхности, образования большого количества пор в контакте. Тонкие Au-Ge контакты ($40\text{--}70$ нм), получаемые электрохимически, обладают хорошей морфологией (рельеф на поверхности контакта не наблюдается при увеличении 5000

раз) и низким омическим сопротивлением $0,03\text{--}0,08$ Ом·мм, что связано с отсутствием пор, большей эффективной площадью контакта. Хорошая морфология поверхности контактов обеспечивает надежный опрос базировочных и маркерных знаков при электронно-лучевом экспонировании. Формирование контактов малой толщины ($40\text{--}70$ нм) устраняет «затекание» электронного резиста в исток-стоковой области, в результате которого толщина слоя резиста в канале выше, чем на остальной поверхности пластины. Это приводит к необходимости увеличивать дозу экспонирования, что в свою очередь, вызывает увеличение минимально возможного размера затворного рисунка, обусловленное расходящимся пучком обратно рассеянных электронов. В результате реально получаемый затворный рисунок в слое резиста ЭЛП-20 толщиной $\sim 0,45$ мкм имеет минимальный размер $0,3\text{--}0,33$ мкм. Уменьшение толщины резистивного слоя в канале позволило получить размер $0,24\text{--}0,27$ мкм.

После сплавления контактов создают фоторезистивную маску с рисунком окон над областями полупроводника, граничащих с каналом транзистора. Это области выхода затворной металлизации за пределы канала. Устранение электропроводности на этих участках полупроводникового слоя необходимо для снижения токов утечки затвор — омические контакты. Изоляцию осуществляют имплантацией ионов V^+ на установке Лада-20. Доза $2,2 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$. Энергия ионов ~ 120 кэВ. Омические контакты малой толщины ($40\text{--}70$ нм) и изоляция активных областей ионной имплантацией позволяют сохранить планарность поверхности пластины.

Наносят слой SiO_2 толщиной $0,35\text{--}0,4$ мкм. Формируют слой электронного резиста практически одинаковой толщины ($\sim 0,35$ мкм) на всей поверхности пластины. Проводят на установке ZBA-20 электронно-лучевое экспонирование. При этом проводящий n^+ -слоя пластины обеспечивает снятие электронного заряда. Нет необходимости в формировании вспомогательного металла в виде сетки (ванадия $\sim 0,15$ мкм).

После проявления проводят плазмохимическую подчистку маски в кислороде на установке 08 ПХО-100Т-001, а после термообработки маски — направленное плазмохимическое травление SiO_2 на установке 08ПХО-100Т-005 в C_3F_8 . При этом стравливают слой окисла толщиной $\sim 0,3$ мкм (рис.1). Травление под маску практически отсутствует. Тонкий слой SiO_2 ($\sim 0,1$ мкм) сохраняют в окнах маски для предотвращения плазмохимического стравливания омических контактов. Оставшийся тонкий слой окисла удаляют в буферном травителе $\text{NH}_4\text{F}:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$. Малая величина растравливания SiO_2 под маской электронного резиста ($\sim 0,1$ мкм) уменьшает прогиб маски при термическом напылении затворной металлизации, что способствует лучшему «взрыву».

Проводят плазмохимическую обработку пластин на установке 08ПХО-100Т-001 в кислороде

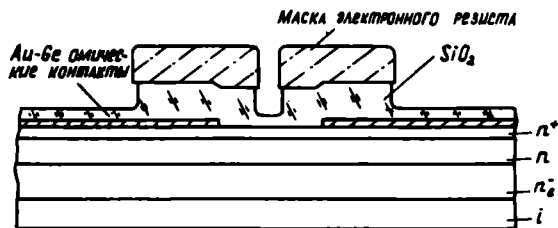


Рис. 1. Полупроводниковая структура после плазмохимического травления SiO_2 по маске электронного резиста

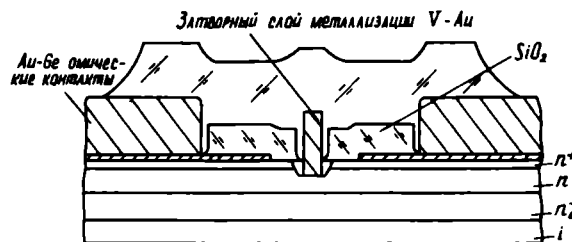


Рис. 2. Структура изготавливаемого транзистора Шоттки с субмикронным затвором

для удаления тонких фторированных пленок электронного резиста, препятствующих быстрому растворению резиста при «взрыве» затворной металлизации. Проводят химическое травление подзатворных областей для получения заданных токов насыщения транзистора. Напыляют затворную металлизацию V-Au толщиной $\sim 0,7$ мкм. «Взрыв» затворной металлизации осуществляют растворением электронного резиста в диметилформамиде. Затвор формируется без «усов» и короток с омическими контактами. Длина затвора составляет $0,25\text{—}0,27$ мкм.

Наносят слой SiO_2 толщиной $\sim 0,7$ мкм. С помощью фотолитографии и травления SiO_2 формируют защитный слой над областью канала транзисторов. Проводят дополнительно имплантацию ионов B^+ по маске защитных островков SiO_2 , омических контактов и затворной металлизации. При этом осуществляется полная электрическая изоляция полупроводниковых приборов. Величина тока утечки между активными областями пластины не превышает 100 нА/10 В. Структура изготавливаемого прибора представлена на рис.2. Далее создают разводку гальваническим осаж-

дением. При этом наращивают слой золота на омических контактах.

Таким образом, осаждение из электролита тонких ($40\text{—}70$ нм) слоев Au—Ge металлизации позволяет получить хорошую морфологию, низкое омическое сопротивление контакта.

Сохранение электропроводности активного слоя по пластине при электронно-лучевом экспонировании обеспечивает эффективное удаление электростатического заряда, формирование качественного затворного рисунка в кристаллах большого размера.

Формирование тонких слоев омических контактов, изоляция активных областей ионной имплантацией способствуют получению субмикронного затвора минимальной длины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент Японии H01L 21/288, № 57-34648, 1982 г.
2. Патент Японии H01L 21/30, № 60-52019, 1985 г.

Формирование разводки из золота на подслое ванадий—никель

Б.Н.САМСОНЕНКО, В.С.СТРЕЛЬЦОВ

При изготовлении межслойного соединения из золота обычно на подложку наносят изолирующую оксидную пленку, в которой вскрывают контактные окна [1]. Затем наносят вспомогательные слои из сплава титана с вольфрамом и золота. Создают фоторезистивную маску, в окна которой электрохимическим осаждением формируют слой золота. Фоторезист удаляют, стравливают вспомогательный слой золота с помощью ионно-лучевого травления. Затем удаляют пленку из сплава титана с вольфрамом, используя раствор перекиси водорода.

Для улучшения качества золотой разводки на кремниевую пластину напыляют вспомога-

тельные слои хрома (20 нм) — золота (10 нм) [2]. Слой хрома обеспечивает хорошую адгезию разводки к поверхности кремния и SiO_2 . Слой золота служит матрицей для осаждения золота из электролита. Создают двухслойную фоторезистивную маску. Проводят электрохимическое осаждение золота в окна маски в режиме постоянного тока. Высокая электропроводность кремниевой пластины обеспечивает равномерное распределение катодного потенциала на вспомогательном слое Cr—Au (на тонких слоях Cr (20 нм) и Au (10 нм), нанесенных на полуизолирующую пластину осаждение происходит неравномерно). Удаляют фоторезист и по маске осаж-

денного золота стравливают вспомогательные слои золота в $\text{HCl}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}$ и хрома в $\text{Se}(\text{SO}_4)_2:\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}$.

Недостаток указанных способов заключается в том, что для создания вспомогательного слоя используют дорогостоящий металл — золото, удаляемый на последующей операции. Удаление вспомогательного слоя золота сопровождается частичным стравливанием и золота гальванического, что неэкономично.

В НИИ микроприборов разработан способ формирования разводки без использования вспомогательного слоя золота. Используют полупроводниковые пластины арсенида галлия. Наносят слой SiO_2 . С помощью фотолитографии и травления SiO_2 формируют островки диэлектрика. Наносят последовательно вспомогательные слои ванадия (100 нм), никеля (40 нм), ванадия (400 нм) на всю поверхность пластины. Нижний слой ванадия обеспечивает хорошую адгезию разводки к поверхности полупроводника и диэлектрика. При отсутствии нижнего ванадия слой разводки $\text{Ni}-\text{Au}$ отслаивается от поверхности SiO_2 .

Создают фоторезистивную маску с рисунком разводки. Используют фоторезист ФП-383. Слой ванадия в окнах маски удаляют в растворе $\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$. Последующий слой никеля травлению не подвергается. Гальваническое золото на никеле растет плотным блестящим слоем, обладающим хорошим сцеплением с матрицей. При осаждении на ванадий формируется рыхлый отслаивающийся осадок (ванадий растворяется в используемом электролите). Эту особенность ванадия используют для защиты от нежелательного осаждения золота под край фоторезистивной маски. Кроме того, пленка ванадия на никелевом слое создает дополнительное сопротивление в цепи тока через пластину. В случае нанесения фоторезиста непосредственно на слой никеля после осаждения золота наблюдают локальные участки подосаждения металла по краю маски, а также многочисленные микропробои в фоторезисте (рис. 1). При формировании вспомога-

го слоя с верхним ванадием в ходе осаждения золота фоторезистивная маска не нарушается.

Пластины устанавливают в кассету горизонтально, осаждаемой стороной вверх. Формируют электролитический контакт к обратной стороне пластины. Осаждение золота проводят в импульсном режиме. Толщина полученного осадка составляет ~ 3 мкм по всей поверхности пластины. В предложенном способе через пластину протекает сквозной ток, что обеспечивает равномерное осаждение золота. Полупроводниковая подложка при этом выполняет роль распределенного сопротивления. Осадок имеет блестящую поверхность. Качество осадка обусловлено высокой плотностью зародышей металла, возникающих на никелевом подслое в начальный период осаждения.

После удаления фоторезиста плазмохимически стравливают верхний слой ванадия. Последующий слой никеля удаляют в водном растворе азотной кислоты за 1,5 мин. Использование других кислот для удаления никеля нецелесообразно, так как травление в них происходит значительно медленнее. В растворах щелочей никель не травится. Длительный процесс травления никеля отрицательно сказывается на адгезии разводки.

Для удаления верхнего слоя ванадия жидкостное травление нецелесообразно. В растворах кислот и щелочей ванадий химически устойчив, а при удалении ванадия в растворе перекиси водорода происходит пассивирование перекисью последующего слоя никеля. Травление пассивированного никеля в используемом растворе азотной кислоты происходит в 15 раз медленнее.

Оставшийся нижний слой ванадия удаляют плазмохимически. Жидкостное химическое стравливание нижнего слоя ванадия нецелесообразно, так как имеет место ускоренное травление под краем осажденной металлизации (обусловленное проникновением травителя по границам зерен металла на поверхности пластины). Сформированная разводка имеет ровный край, четкую геометрию (рис.2).

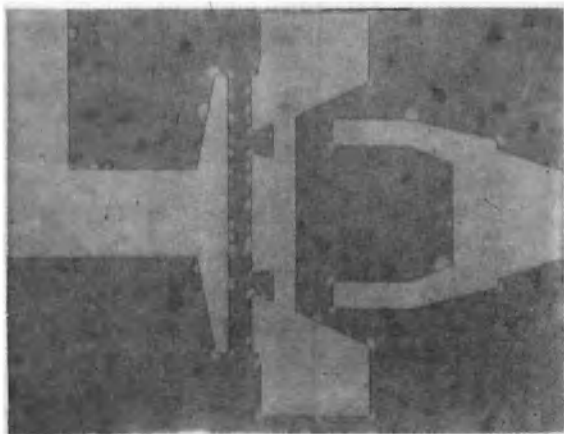


Рис. 1. Дефекты маскирования при формировании разводки. Увеличение $\times 160$

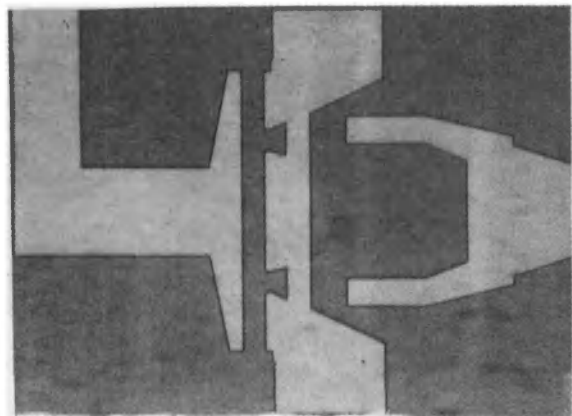


Рис. 2. Сформированная разводка. Увеличение $\times 160$

Предложенный способ формирования разводки экономичен, так как устраняет необходимость напыления золота для вспомогательного слоя. Удаление вспомогательного слоя по маске разводки не сопровождается травлением гальванического золота. Применение двухслойной маски фоторезиста и ванадия обеспечивает получение разводки с хорошей геометрией рисунка. Формирование на подслое никеля гальванического осадка плотной мелкозернистой структуры позволяет

уменьшить поверхностное сопротивление разводки на высоких частотах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент Японии № 1-173740, МКИ H01L 21/88, 1989.
2. R o m e r o G. Fabrication of Submicrometer Gold Lines Using Optical Lithography and High-Growth-Rate Electroplating. — IEEE Electron Device Letters, 1983, vol. EDL-4, N 7, p. 210—211.

Применение локального маскирования при электрохимическом осаждении Au—Ge контактов

Б.Н.САМСОНЕНКО, *д-р техн.наук, проф.* П.В.ПАНАСЕНКО

В структурах GaAlAs—GaAs применяется электрохимическое осаждение контактов по маске анодного окисла на мезе [1]. Для локального окисления мезы и осаждения контактов используют проводящий слой GaAs *n*-типа. Однако этот способ не позволяет проводить осаждение омических контактов полевых транзисторов, формируемых в активных слоях на полуизолирующей подложке, так как активные области приборов изолированы меза-травлением.

В работе [2] предложен метод осаждения из электролита омических контактов на полуизолирующих пластинах арсенида галлия с активным слоем *n*⁺—*n*—*n*[−]-типа. Осаждение омических Au—Ge контактов осуществляют по маске анодного окисла в канале и на изолирующих областях. При осаждении контактов происходит растворение маски анодного окисла на большой площади пластины, в результате чего загрязняется электролит и сокращается срок его службы. Кроме того, при формировании маски необходима операция анодного окисления изолирующих областей, что удлиняет технологический маршрут.

В НИИ микроприборов (г.Москва) разработан метод селективного осаждения омической металлизации. На полуизолирующих пластинах арсенида галлия с активным слоем *n*⁺—*n*—*n*[−]—*i*-типа формируют меза-структуры химическим травлением в растворе H₃PO₄:H₂O₂:H₂O. Наносят слой SiO₂ толщиной ~ 0,3 мкм. Создают фоторезистивную маску с окнами над областями канала транзисторов.

Удаляют SiO₂ в окнах в буферном травителе NH₄F:HF:H₂O. Удаляют фоторезист. Проводят анодное окисление пластины по маске SiO₂, формируя канал транзистора. Толщина слоя окисла составляет ~ 0,18 мкм, глубина травления ~ 0,12 мкм, напряжение на ячейке 120 В.

Удаляют SiO₂ плазмохимически, селективно к арсениду галлия и анодному окислу. Для повышения химической стойкости анодного окисла

проводят ламповый отжиг пластин с анодным окислом при температуре 400°C в течение 40 с на установке «Импульс-5». При этом скорость растворения окисла при осаждении омических контактов снижается от ~ 60 нм/мин (для неотожженного) до 50; 40 и 30 нм/мин при $T_{отж} = 300; 400$ и 500°C, соответственно.

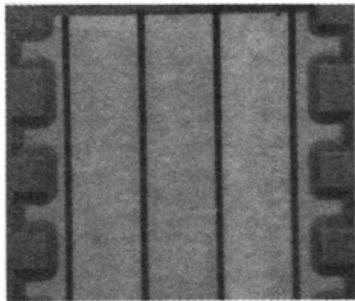
Отжиг при температуре менее 300°C практически не увеличивает химическую стойкость окисла. Слой анодного окисла толщиной ~ 0,1 мкм при осаждении контактов растворяется полностью. При температурах выше 500°C изменяется стехиометрический состав поверхности полупроводника, происходит ее обогащение мышьяком.

Пластину арсенида галлия обрабатывают в растворе NH₂OH:H₂O₂:H₂O для удаления естественного окисла на открытых областях *n*⁺-слоя. Осаждают Au—Ge омические контакты при интенсивном освещении (100000 люкс). Напряжение на ячейке $U_{яч} \approx 2$ В, величина общего тока $I_{мк} = 2,5$ мА, продолжительность процесса $t = 2$ мин. Толщина сформированных контактов составляет ~ 70 нм.

Осаждение металла происходит только на поверхности *n*⁺-слоя активных областей по маске анодного окисла в канале, на поверхности изолирующих областей металл не осаждается. В случае, если процесс проводят в темноте, металл осаждается только на поверхности изолирующих областей. В процессе осаждения контактов анодный окисел растворяется, загрязняя электролит.

Согласно предложенному способу площадь поверхности анодной пленки минимальна, так как формируют ее только в канале транзистора. Скорость растворения окисла снижают термообработкой.

Вплавляют омические контакты на установке лампового отжига «Импульс-5» при $T \approx 450^\circ\text{C}$. Сформированные контакты имеют хорошую морфологию поверхности (см. рисунок). Далее создают фоторезистивную маску с рисунком затвора.



Омические Au—Ge контакты транзистора, осажденные по локальной маске анодного окисла (×500)

Удаляют анодный окисел, оставшийся после проявления маски в растворе $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$. Проводят химическое дотравливание подзатворных областей для получения заданных токов насыщения в растворе $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$.

Напыляют слой затворной металлизации V—Au—V толщиной $\sim 0,7$ мкм и «взрывом» фоторезистивной маски формируют затвор. Анодный окисел в канале снижает электрический по-

тенциал поверхности полупроводника. В результате возрастают пробивные напряжения транзистора.

Метод локального маскирования при электрохимическом осаждении контактов позволяет уменьшить количество растворяющегося анодного окисла, снизить загрязнение электролита.

Проведение термообработки повышает химическую стойкость анодной пленки. Анодный окисел в канале способствует увеличению пробивных напряжений транзистора.

Самосовмещенное с областью канала осаждение омических контактов устраняет необходимость в формировании маски фоторезиста, позволяет минимизировать расстояние исток-сток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент США № 4227975, МКИ НОП 21/283, НК 204-15, 1980 г.

2. Самсоенко Б.Н., Панасенко П.В., Иванов Л.А. Электрохимическое направление в технологии изготовления полевых транзисторов Шотки. — Электронная техника. Сер. 10. Микроэлектронные устройства, 1992, вып. 3, 4, с. 48—49.

микроэлектроника и полупроводниковые приборы промышленные технологии

Очистка пластин кремния от органических примесей

В.П.БОКАРЕВ, М.Ю.ВАХРУШЕВ, М.Р.ГИЗАТУЛЛИН,
А.А.БАЛЫЧЕНКО, В.С.ГРЕБЕНЬКОВ, А.П.ПОПОВ

В НИИ "Субмикрон" разработан новый способ очистки кремниевых пластин с помощью источников непрерывного вакуумного ультрафиолетового излучения. Используемые в установке специальные дейтериевые лампы позволяют обрабатывать кремниевые пластины диаметром до 100 мм. Преимущества этого способа — низкая температура проведения процесса, отсутствие приносимых примесей и радиационных повреждений поверхности в результате очистки, возможность совмещения процессов очистки с другими технологическими процессами в одной рабочей камере.

В настоящее время все большее распространение в технологии СБИС получают фотоактивационные процессы. Так, эксимерные лазеры используют для травле-

ния полимеров и углерода [1—2] и нанесения на поверхность полупроводника технологических слоев [3—4]. Перспективно использование источников непрерывного интенсивного вакуумного ультрафиолетового излучения (ВУФ), которые можно применить как для нанесения технологических слоев, так и для очистки поверхности от органических примесей [5—7]. Однако разработанные источники ВУФ-излучения не позволяют обрабатывать пластины диаметром более 25 мм.

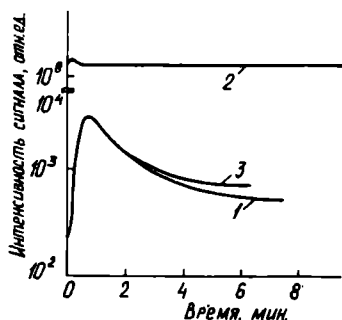
В НИИ "Субмикрон" изготовлена установка, позволяющая проводить ВУФ-обработку пластин диаметром до 100 мм. В ней использованы новые, специально разработанные дейтериевые лампы с рабочим окном диаметром 26 мм. Окно лампы, выполненное из монокристаллического фторида магния, подвергается термической обработке для улучшения пропускания в области 115—165 нм. Использование двух таких

ламп и вращающегося столика — подложкодержателя позволило проводить обработку кремниевых пластин диаметром до 100 мм.

Эксперименты по очистке кремниевых пластин от органических примесей проводили при комнатной температуре и давлении в рабочей камере установки от 1333 до 101086 Па. Расстояние от поверхности рабочего окна дейтериевых ламп до поверхности кремниевой пластины составляло 0,5–1 мм.

Предварительно пластины кремния, загрязненные следами фоторезиста ФП-383, помещали в рабочую камеру установки и обрабатывали ВУФ-излучением в двух режимах: одной лампой при неподвижном столике-подложкодержателе и двумя лампами при вращающемся столике. Первый режим использовался для исследования качества очистки путем сопоставления состава поверхности, обработанной и необработанной ВУФ-излучением областей пластины. Второй — для исследования эффективности очистки всей поверхности 100-мм пластин.

Состав поверхностного слоя исследовали методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на установке IMS — 4F. Методика измерений заключалась в снятии распределения элементов водорода, углерода и кислорода в приповерхностном слое образцов. На отдельных образцах снимали двумерные карты распределения указанных элементов по поверхности. Режимы измерений были следующие: первичные ионы — Cs^+ , ускоряющее напряжение — 10 кВ, ток пучка — 20–30 нА, размер раstra травления — 0,15x0,15 мм; вторичные ионы отбирались из пятна диаметром 33 мкм в центре раstra травления. Глубину кратера травления при профильном анализе измеряли профилометром фирмы Tencor Instruments.



Сопоставление профилей распределения углерода в приповерхностном слое кремниевых пластин

Оказалось, что как первый, так и второй режимы позволяют очищать кремниевые пластины от органических примесей. Однако скорость очистки пластины во втором режиме более чем на порядок отличается от скорости очистки неподвижной пластины, причем максимальная скорость очистки наблюдается у осевой части рабочего окна дейтериевой лампы.

На рисунке показаны профили распределения углерода по глубине на обработанных (кривая 1) и необра-

ботанных (кривая 2) ВУФ-излучением участках поверхности пластины кремния, а также профиль распределения углерода на чистой пластине Si после химической обработки (кривая 3). Как видно из рисунка, содержание органических примесей на поверхности кремниевых пластин после ВУФ-обработки в течение часа уменьшается до уровня фона.

В работе [6] ВУФ-источник был применен для формирования элементов ИС на GaAs-подложках путем фототравления резистов и углерода. Было показано, что электронный негативный резист ЭЛН-200 не травится, а сшивается.

Авторами исследован процесс ВУФ-травления позитивных фоторезистов ФП-383 и ФП-051. Для нанесения фоторезистов на поверхность 100-мм кремниевых пластин использовали стандартную методику. О скорости травления судили, сопоставляя толщину фоторезиста до и после травления. Толщину измеряли эллипсометрическим методом на эллипсометре ЛЭФ-3М-1.

Оказалось, что оба типа фоторезистов травятся под воздействием ВУФ-излучения как при атмосферном давлении, так и при давлении 1330 Па, причем процессу травления подвержены как исходные фоторезисты, так и фоторезисты, предварительно подвергнутые термическому задубливанию. Скорость травления фоторезистов при атмосферном давлении, неподвижном источнике ВУФ-излучения и расстоянии между поверхностью окна ВУФ-источника и пластины 0,5 мм составляла 18 нм/мин для ФП-383 и 12 нм/мин для ФП-051 при комнатной температуре. Однако в обоих случаях после снятия фоторезиста на поверхности пластин наблюдались капли конденсата углеводородного состава по данным ВИМС.

Авторы выражают благодарность А.Ю.Трифонову за исследования образцов методом ВИМС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конов В.И., Кононенко Т.В., Пименов С.Н. и др. — Квантовая электроника, 1991, т.18, № 10, с.1226—1228
2. Sripivasa n P. — Appl. Phys. Lett., 1982, vol. 41, N 6, p. 516.
3. Зенкевич А.В., Неволин В.И., Хабалашвили Н.Д. и др. — Микроэлектроника, 1992, т.21, вып. 2, с. 64—68.
4. Lin H., Roberts J.C. — Appl. Phys. Lett., 1991, vol. 58, N 15, p. 1659—1661.
5. Гребеньков В.С., Леонов Ю.С., Митрофанов А.В., Федотов С.М. — Электронная техника, 1989, № 8, с. 79—80.
6. Леонов Ю.С., Меншутин Л.И., Рыжиков И.А., Федотов С.М. — Электронная промышленность, 1990, № 5, с. 3—4.
7. Tatsu ru S., Masahiro V., Takashi F., Hiro yuki M. — Jap. J. Appl. Phys. Pt. 2, 1991, vol. 30, N 4, p. 2538—2540.

Научно-исследовательский институт «Субмикрон»
103482, Москва, корп. 313А
Тел. 531-35-74

Эффективный метод обработки фоторезистивной маски

Б.К.АНДЗЮЛЕНЕ, Я.И.СУЦКЕЛЬ, А.А.АНДЗЮЛИС

Современный процесс производства изделий микроэлектроники предполагает высокую воспроизводимость технологических параметров и допускает минимальную дефектность проводимых технологических процессов.

При имплантации больших доз мышьяка возникает множество проблем, связанных с деструкцией (растеканием, сморщиванием и даже сгоранием) фоторезистивной пленки, служащей маской при проведении имплантации, что вызывает нарушение топологического рисунка, загрязнение поверхности пластин и рабочего пространства установки. Хорошая воспроизводимость технологических параметров и низкая дефектность технологического процесса могут быть получены путем выбора метода обработки фоторезистивной маски и режима проведения имплантации.

Были опробованы разные режимы проведения процесса ионной имплантации и различные фоторезисты. При обработке использовали известные методы — ультрафиолетовую засветку [1, 2], плазмохимическое подтравливание [3] и обработку в парах адгезива [4].

Фотолитография проводилась на линии Лада-125 (использовали фоторезисты ФП-051Т, ФП-051МК), имплантация мышьяка ($D = 1 \cdot 10^6$ ион/см²) — на установке "Везувий-5", плазмохимическое подтравливание фоторезиста на величину 0,2 мкм — на установке 08-ПХО-100Т-005. Источником излучения служила лампа ДБ-60. Оптимальный режим обработки выбирался экспериментально. Время облучения составляет 7 мин для фоторезиста ФП-051Т и 9 мин для ФП-051МК. Оценены результаты высокотемпературной термообработки ($T = 160^\circ\text{C}$, $t = 20$ мин) после УФ облучения. При обработке фоторезистивной маски адгезивом использовали пары гексаметилдисилазана (ГМДС), время обработки 3,5 и 7 мин с последующей термообработкой ($t = 20$ мин, $T = 140^\circ\text{C}$). Схема эксперимента представлена в табл. 1.

Далее проводился процесс ионной имплантации (рис. 1). Установлено, что на деструкцию фоторезистивной пленки не влияет скорость выхода на рабочий режим. Дефекция фоторезистивной пленки зависит от плотности ионного тока I (мкА), при котором проводится процесс. Сморщивание, растекание фоторезистивной маски начинается при величине тока 10–12 мкА для фоторезиста ФП-051Т (толщина пленки $d = 1,2$ мкм) и при 11–14 мкА для фоторезиста ФП-051МК ($d = 1,6$ мкм) и зависит от условий формирования рисунка. При ухудшении адгезии фоторе-

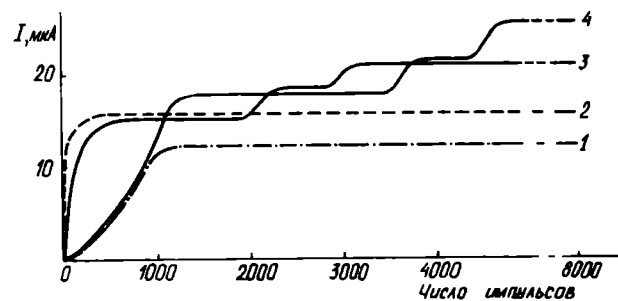


Рис. 1. Режимы проведения процесса имплантации: 1, 3 — медленный выход в рабочий режим; 2, 4 — быстрый выход в рабочий режим; 3, 4 — максимальная плотность ионного тока

Таблица 1

Фоторезист	Обработка ГМДС	ПХ подтравливание	УФ обработка	Термообработка	Ионная имплантация
ФП-051Т	+	—	—	+	+
ФП-051МК	+	—	—	+	+
ФП-051Т	—	+	—	—	+
ФП-051МК	—	+	—	—	+
ФП-051Т	—	—	+	—	+
ФП-051Т	—	—	+	+	+
ФП-051МК	—	—	+	—	+
ФП-051МК	—	—	+	+	+

Технологическая операция	ГМДС с термообработкой	ПХ подтравливание	УФ обработка	УФ обработка с термообработкой
Проявление	2,7±0,11* 2,6±0,13	2,7±0,12** 2,7±0,13	1,6±0,10 1,7±0,11	1,7±0,13 1,7±0,11
Обработка	2,2±0,25 2,1±0,25	2,7±0,14 2,6±0,13	1,6±0,11 1,7±0,11	1,8±0,15 1,7±0,15
Импламентация	2,0±0,30 2,0±0,30	2,6±0,20 2,6±0,20	1,6±0,11 1,7±0,12	1,7±0,15 1,8±0,15
Внешний вид фоторезистивной маски	Деформация рисунка, сморщивание фоторезиста, частичное пузырение	Оплывание границ, сморщивание фоторезиста (режимы 3, 4; рис.1)	Без изменения	Оплывание границ после термообработки

Примечания: * Измерение зазора между элементами.

** Верхняя строчка — фоторезист ФП-051Т, нижняя — ФП-951МК.

зистивной пленки деструкция начинается при меньшей плотности тока. Увеличение толщины пленки фоторезиста до 2,2 мкм результатов не дало. Введение фоторезистивной маски парами ГМДС с последующей термообработкой не увеличивает стойкости пленки к бомбардировке ионами мышьяка и не улучшает воспроизводимость линейного размера элемента (табл. 2).

Применение метода плазмохимического подтравливания помогает соблюдать геометрию рисунка и сохранять вид фоторезистивной маски в процессе ионной имплантации в режиме до 150 мкА. Наилучшие результаты были получены при введении УФ обработки фоторезистивной маски (см. табл.2): отсутствуют изменения внешнего вида фоторезистивной маски и геометрии рисунка даже при повышении ионного тока до величины 22–24 мкА. Наблюдаемый эффект объясняется отверждением в результате изменения структуры молекулы фоторезиста [1, 2].

Таким образом, установлено, что введение обработки фоторезистивной маски УФ излучением обеспечивает стойкость фоторезистивной пленки к процессу ионной имплантации при любом режиме проведения процесса и следовательно позволяет избежать искажения топологического рисунка схемы и уменьшить дефектность процесса. Плазмохимическое подтравливание фоторезистивной маски исключает деструкцию пленки фоторезиста в процессе имплантации мышьяка только при токах, меньших 15 мкА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование процесса отверждения изображения в слое позитивного фоторезиста /О.В.Игошева, А.В.Климкович, А.Л.Николаев, А.Д.Цырлин. — Электронная техника. Сер.2. Полупроводниковые приборы, 1982, вып. 8, с. 37–41.
2. Hiroaka H., Pasansky J. High temperature flow resistance of micron sized images in AZ resists. — J. Electrochemical Society, 1981, vol. 128, N 12, p. 2645–2647.
3. Патент № 3929483 (США). Method of ion implantation through a photoresist mask /Cl. Johson. — Оуб. 1975.
4. Особенности формирования фотолитографического рельефа в условиях обработки подложек в гексаметиладислазане /А.В.Климкович, Ю.А.Микиртумов, А.Л.Николаев и др. — Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы, 1983, вып.8, с. 38–42.

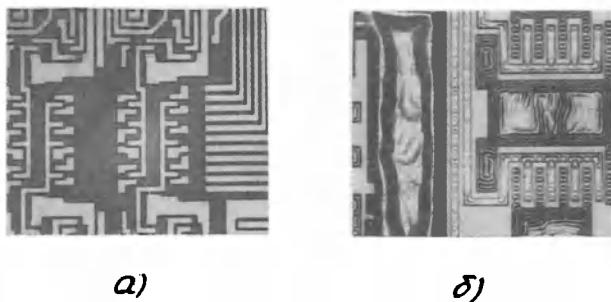


Рис.2. Вид фоторезистивной маски после проведения процесса ионной имплантации: а — без обработки фоторезистивной пленки; б — проведена УФ обработка

Метод определения чистоты поверхности подложек

А.И.КОЛПАКОВ

Скорость изменения светового потока можно использовать в качестве параметра, контролирующего чистоту поверхности подложек, применяемых в производстве радиоэлектронной аппаратуры.

Контроль чистоты поверхности активных и пассивных подложек осуществляют по величине краевого угла смачивания Θ , измерение которого возможно лишь при установлении термодинамического равновесия [1, 2]. Длительность установления равновесного состояния определяется скоростями смачивания и диффузии атомов, растворимых капель жидкости при ее растекании по поверхности подложки [3]. Если длительность в первом случае составляет доли, единицы секунд, то во втором — доли, единицы минут. Большая длительность процесса измерения приводит к накоплению в объеме жидкости чужеродных атомов и изменению ее параметров, например, коэффициента η [3], т.е. величина угла Θ становится зависимой не только от концентрации, но и от типа атомов, адсорбируемых поверхностью подложки. В связи с этим метод определения чистоты поверхности подложек по краевому углу Θ отличается большой длительностью и низкой воспроизводимостью результатов измерения. Время измерения можно значительно сократить, если в качестве контролируемого параметра использовать не угол Θ , а скорость смачивания жидкостью поверхности подложки.

Растекание капли жидкости по поверхности определяется количеством свободной поверхностной энергии подложки в области ее взаимодействия с каплей жидкости [4]. Резкое снижение этой энергии при загрязнении поверхности органическими веществами приводит к уменьшению работы образования новых поверхностей. Это связано с тем, что у органических веществ свободные энергетические уровни на поверхности заполнены. Отсутствие обмена электронами между поверхностями приводит к преобладанию сил

поверхностного натяжения и жидкость сохраняет форму капли. Увеличение свободной поверхностной энергии приводит к интенсивному обмену валентными электронами между поверхностными атомами жидкости и подложки с образованием между ними устойчивых связей. Это ослабляет силы поверхностного натяжения и капля жидкости растекается по поверхности подложки. Последнее означает осуществление процесса смачивания жидкостью поверхности подложки. Причем, величину скорости смачивания в этом случае определяет скорость установления связей.

Согласно ОСТ.4ГО.054.238 в производстве гибридных и интегральных микросхем находят применение только подложки, поверхность которых полностью смачивается жидкостью, например, дистиллированной водой. При выполнении условия $S > S_1$, где S_1 , S — площади растекшейся капли и поверхности подложки, соответственно, угол Θ в конце процесса смачивания имеет достаточно малое значение. Тогда справедливо следующее выражение [5].

$$\Delta\sigma = K(\sigma_n - \sigma_{n-ж}) - \sigma_ж, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma$ — сила, приходящаяся на единицу ширины фронта капли жидкости; $\sigma_{n-ж} = U_2 - \sum \Gamma_i \mu_i$ — свободная поверхностная энергия подложки на ее границе с жидкостью [4]; σ_n , $\sigma_ж$ — значения свободной поверхностной энергии подложки, жидкости на ее границе с окружающей средой, в которой проводится измерение, соответственно; K — коэффициент шероховатости поверхности; U_2 — удельная свободная энергия поверхности раздела подложка—жидкость; Γ_i , μ_i — адсорбция и химический потенциал i -го компонента комплекса атомов, загрязняющего поверхность подложки.

Уравнение движения капли для рассматриваемого случая записывается в следующем виде [6]:

$$r = \left\{ \frac{6}{\pi} m \frac{\Delta\sigma}{\eta\delta \left[\ln \left(\frac{3m}{\lambda\pi r^2\delta} \right) - \frac{3}{2} \right]} \right\}^{1/4} t^{1/4}, \quad (2)$$

где r — радиус капли жидкости; m — масса капли жидкости; η — коэффициент вязкости жидкости; δ — плотность жидкости; t — время растекания капли. Достаточно малые размеры площади смачивания ($\leq 300 \text{ мм}^2$) и при выполнении условия [6]

$$v \ll \frac{\eta r}{\delta}$$

позволяют пренебречь процессами ускорения в потоке жидкости и аппроксимировать его равномерным движением. Тогда скорость растекания жидкости определяется следующим образом:

$$v = \frac{r}{t} = \left\{ \frac{6}{\pi} m \frac{\Delta\sigma}{\eta\delta \left[\ln \left(\frac{3m}{\lambda\pi r^2\delta} \right) - \frac{3}{2} \right]} \right\}^{1/3} t^{-3/4}. \quad (3)$$

Выражение (2) получено аппроксимацией объема капли шаровым конусом. При контроле степени чистоты поверхности подложек, применяемых в производстве гибридных и интегральных микросхем, это справедливо, так как значения углов Θ в этом случае достаточно малы. Следовательно, изменение высоты шарового конуса $h(t)$ с учетом уравнения (2) можно представить в следующем виде:

$$h(t) = \frac{3m}{\pi r^2\delta} B \sqrt{\frac{C - \ln r}{\Delta\sigma t}}, \quad (4)$$

где $B = \eta^2 \sqrt{\frac{3}{2} \frac{m}{\pi\delta}}$; $C = \ln \left(\frac{3m}{\lambda\pi\delta} \right) - \frac{3}{2}$; $\lambda = h_0 \approx 10^1 - 10^3 \text{ \AA}$ при $h(t) \rightarrow 0$.

В шаровом конусе скорости изменения его площади (площади смачивания) и высоты равны. Однако технически проще контролировать скорость изменения величины $h(t)$. В настоящей работе этот контроль предлагается осуществлять по коэффициенту пропускания светового потока слоем жидкости, растекающейся по поверхности подложки. Изменение светового потока описывается законом Бугера—Ламперта [7]:

$$I = I_0 \exp[-\mu h(t)], \quad (5)$$

где I , I_0 — интенсивности светового потока на входе в слой жидкости и на выходе из него; μ — линейный коэффициент поглощения.

Количественное измерение величины I наиболее просто реализуется с помощью фотоэлемента (например, ФД-1), вольт-амперная характеристика которого имеет вид [8]:

$$I_\phi = K_\lambda I - I_s \left\{ \exp \frac{e(\varphi - U)}{kT} \right\} - 1, \quad (6)$$

где U — напряжение, приложенное к фотоэлементу; I_ϕ — ток в цепи фотоэлемента; φ — разность потенциалов на барьере p - n -перехода; I_s — тепловой ток фотоэлемента; e — заряд электрона; k — постоянная Больцмана; K_λ — спектральная чувствительность фотоэлемента; T — температура.

Выполнив постановку выражений (4) и (5) в (6), можно получить уравнение, устанавливающее аналитическую связь между параметрами фотоэлемента и законом изменения высоты капли жидкости в области светочувствительного слоя фотоэлемента:

$$I_\phi = \frac{D}{\exp(\mu B \sqrt{\frac{C - \ln r}{\Delta\sigma t}})} - A, \quad (7)$$

где $A = I_s \left\{ \exp \frac{e(\varphi - U)}{kT} \right\} - 1$; $D = K_\lambda I_0$; μB и C — постоянные коэффициенты устройства контроля чистоты поверхности подложек. Производство конкретных гибридных и интегральных микросхем требует применения подложек определенного типа, т.е. в этом случае коэффициенты K и σ_n можно принять за константы методики измерения чистоты поверхности подложек. Тогда из работы [8] следует, что амплитуда I_ϕ и параметры чистоты поверхности U_2 , $\Sigma\Gamma_i \mu_i$ имеют аналитическую связь. При измерении известных значений поверхностных концентраций атомов и мо-

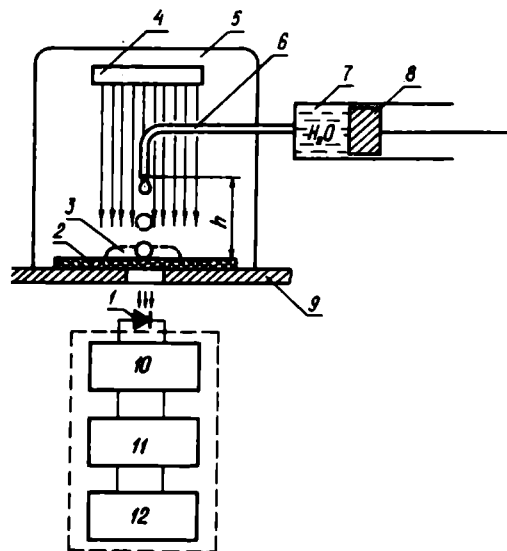


Рис. 1. Принципиальная схема устройства контроля чистоты поверхности подложек

лекул можно провести калибровку I_{ϕ} и после этого использовать его в качестве параметра, контролирующего чистоту поверхности подложек.

Для реализации метода разработано устройство (рис. 1). Методика измерения заключается в установлении в светонепроницаемую камеру 5 на основание 9 подложки 2 и освещении ее поверхности потоком света 4. Поршнем 8 выталкивают жидкость 7 в полую иглу 6 до образования и отрыва капли жидкости 3 от конца полой иглы.

Изменение интенсивности светового потока при растекании капли по поверхности подложки фиксировалось фотоприемником I типа ФД-6, включенным в электрическую схему в качестве источника тока. Линейное преобразование I_{ϕ} в напряжение осуществлялось с помощью дифференциального усилителя 10, выполненного на операционных усилителях (ОУ) типа К553УД. Для уменьшения погрешности измерения амплитуды импульса фототока A_1 коэффициент усиления ОУ выбирался таким, чтобы выполнялось неравенство $A_1 \geq 1 \div 2$ В. Схема 11 измерения (индикаторное устройство амплитуды A_1) реализована на микросхемах К544УД и представляет собой пиковый детектор с временем хранения информации ~ 60 с при точности хранения ≤ 1 мВ. Количественное значение A_1 фиксируется стрелочным или цифровым вольтметрами 12. Время измерения в обоих случаях не превышает 10—30 с.

Испытания устройства проводились на подложках типа «Поликор», поверхность которых очищалась методом реактивно-ионного травления, являющимся эффективным способом удаления органических загрязнений с поверхности подложек [9].

При вскрытии рабочей камеры установки реактивно-ионного травления осуществляется контакт исследуемой поверхности с газовой средой, т.е. поверхность подложки загрязняется газовыми молекулами окружающей среды. Процессы адсорбции и хемосорбции [10] существенно ухудшают чистоту поверхности подложек. На практике этого избегают сокращением времени взаимодействия поверхности подложки с окружающей средой и помещением их в специальную кварцевую посуду. В данной работе стабилизация процессов адсорбции и хемосорбции достигалась проведением процессов измерения при стандартных температуре ($T=300$ К) и влажности $\sim 98\%$.

Постоянство газового состава окружающей среды контролировалось путем сравнения результатов измерения чистоты поверхности контрольных подложек. Каждая точка на кривой рис. 2 представляет собой среднее арифметическое пяти измерений, разброс которых не превышал 10—15%, даже если измерения отстояли друг от друга более, чем на сутки.

Анализ зависимости на рис. 2 показывает, что выдержка исследуемой поверхности на воздухе загрязняет ее атомами и молекулами окру-

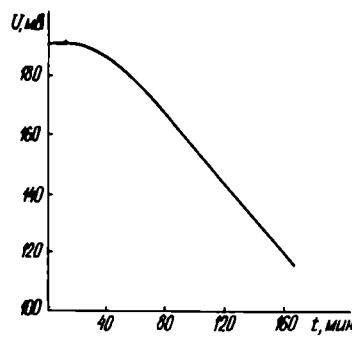


Рис. 2. Зависимость чистоты поверхности от длительности контакта подложек типа «Поликор» с окружающей средой (воздухом)

жающей среды, т.е. существует зависимость между током фотоприемника и степенью загрязнения поверхности подложек. Кроме этого, адгезия пленок алюминия имела максимальное значение (160 кг/см² при $t \leq 60,0$ мин), что также подтверждает достоверность кривой, представленной на рис. 2.

Таким образом, описанная в настоящей работе модель и устройство позволяют реализовать экспресс-контроль степени чистоты поверхности подложек, так как время измерения значительно (почти на порядок) меньше длительности технологических операций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голото И.Д., Докучаев Б.П., Колмогоров Г.Д. Чистота в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем.— М.: Энергия, 1975, с. 199—200.
2. А.с. МКИГ 01 № 13/02 (СССР). Способ определения краевого угла смачивания/А.Н.Мигунов.
3. Курносоев А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов.— М.: Высшая школа, 1974, с. 92—97.
4. Дерягин Б.В. О зависимости краевого угла от микрорельефа или шероховатости смачиваемой поверхности. Доклады АН СССР, 1946, т. 51, № 5, с. 357—360.
5. Рауд Э.А., Сумм В.Д., Щукин Е.Д. Растекание Ньютоновской жидкости по поверхности твердого тела. Доклады АН СССР, 1972, т. 205, № 5, с. 1134—1137.
6. О распространении жидких металлов по поверхности твердых металлов в связи с адсорбционным эффектом понижения прочности/Е.Д.Щукин, Ю.В.Горюнов, Г.И.Дельщикова и др.— Коллоидный журнал, 1963, т. 25, вып. 1, с. 108—114.
7. Геворкян Р.Г. Курс физики.— М.: Высшая школа, 1979.— 411 с.
8. Лысов В.Ф. Практикум по физике полупроводников.— М.: Просвещение, 1976, с. 166, 171.
9. Плазменная технология в производстве СБИС/Под ред. Н.Айнспрука и Д.Брауна.— М.: Мир, 1987, с. 285—286.
10. Волкештейн Ф.Ф. Электронные процессы на поверхности полупроводников при хемосорбции.— М.: Наука, 1987, с. 41—49, 93—95.

Конструкция и применение НЖК-зонда при анализе причин брака и отказов ИС

А.С.КЛИМЕНКО, Н.В.МОШЕЛЬ, З.Я.СУРЖИНА

При изготовлении полупроводниковых структур необходимо выявление причин их отказа и анализ брака. Специалисты Черниговского педагогического института разработали два типа конструкций, осуществляющих эти процессы методом использования НЖК-зонда. Используемые в них унифицированные ячейки и насадки позволяют контролировать большинство технологических операций, определяющих качество готовых изделий.

В последние годы в контроле качества полупроводниковых структур и в анализе причин брака и отказов ИС широкое применение находят методы, основанные на электрооптических эффектах в нематических жидких кристаллах (НЖК) [1—10]. Применение методов НЖК для анализа полупроводниковых структур и готовых ИС требует разработки устройств, позволяющих задавать определенную толщину и ориентацию слоя НЖК на исследуемой поверхности, а также визуально наблюдать (под микроскопом) эту поверхность при различных режимах питания и работы ИС.

Наиболее часто для создания тонкого слоя НЖК на поверхности ИС используют покровное стекло [3—10], размеры которого согласуются с поверхностью кристалла ИС, свободной от контактных выводов. На покровное стекло наносят прозрачную токопроводящую пленку [6—9], к которой прикладывают потенциал относительно кристалла ИС. При определенных режимах питания ИС и прозрачного электрода в поле зрения микроскопа фиксируется оптическая картина, соответствующая режиму работы ИС. Различие в картинах для дефектной и нормально функционирующей ИС позволяет определить дефектные места и проанализировать режимы работы ИС.

В работах [8, 9] электрический контакт между блоком питания и прозрачным электродом осуществлялся с помощью электропроводящего клея и игольчатого зонда. Однако эти способы контакта не устраняют свободного скольжения покровного стекла по НЖК, а следовательно, и опасности обрыва или короткого замыкания выводов кристалла ИС. Кроме того, сама область контакта затеняет и ограничивает площадь осмотра кристалла ИС. Этот недостаток особенно существен при контроле кристаллов малых размеров и с большой степенью интеграции.

В Черниговском педагогическом институте разработаны и используются несколько вариантов конструкций НЖК-ячеек для контроля качества технологических слоев при производстве, а также для анализа режимов работы и отказов ИС. При реализации конструктивных решений НЖК-ячейки были выбраны два направления. Первое заключается в формировании жесткой структуры «кристалл ИС — НЖК — прозрачный электрод», устанавливаемый на столик микроскопа. При этом прозрачный электрод жестко фиксируется относительно корпуса ИС, а крепление электрода одновременно является токопроводящим контактом.

На рис. 1 приведена схема одного из вариантов ячейки первого типа. Интегральную схему со вскрытым корпусом 5 устанавливают на столик с микрометрическим винтом 4. На поверхность кристалла ИС 6 наносят дозированную каплю НЖК 1. Предварительно поверхности кристалла ИС и прозрачного электрода 2 могут быть обработаны поверхностно-активным веществом для образования однородной ориентации НЖК. Прозрачный электрод, выполненный из стекла в форме цилиндра, параллелепипеда, усеченного конуса или усеченной пирамиды и покрытый проводящей прозрачной пленкой SnO_2 , жестко крепится к столику. С помощью микрометрического винта 4 устанавливают толщину слоя НЖК. На электроды схемы и прозрачный электрод пода-

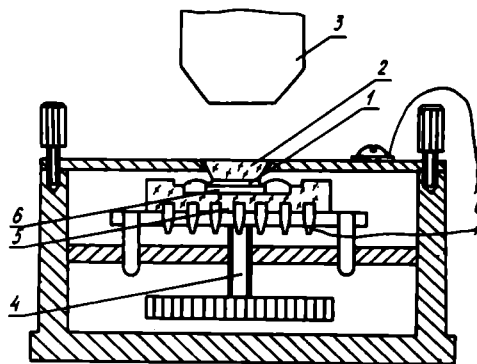


Рис. 1. Структура НЖК-ячейки на кристалле ИС со вскрытым корпусом

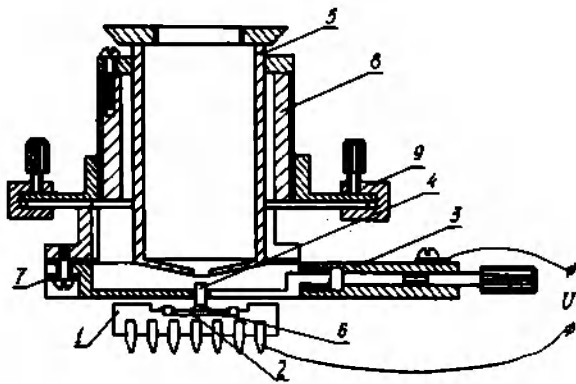


Рис. 2. НЖК-насадка к микроскопу

ются требуемые напряжения, при этом поверхность кристалла ИС последовательно просматривается при перемещении столика микроскопа (его объектив обозначен 3).

Второе направление основано на механическом и оптическом сопряжении прозрачного электрода с объективом микроскопа (рис.2). Прозрачный электрод 4 (в виде призмы или цилиндра) закрепляют в нижней части насадки 8 механическим прижимом 3, который одновременно является и контактным устройством. Эта часть насадки изолирована от объектива микроскопа 5 изоляционными втулками 7. Непосредственно на объектив резьбовым соединением крепится насадка 8, нижняя и верхняя части которой могут скользить относительно друг друга в плоскости, перпендикулярной оптической оси микроскопа. Части насадки фиксируют зажимами 9. После установки электрода 4 в прижим 3 оптические оси электрода и объектив микроскопа совмещают перемещением нижней части насадки 8 относительно верхней. Поскольку торцы электрода 4 плоско-параллельные, абсолютное совмещение оптических осей электрода и объектива микроскопа не обязательно, так как микроскоп работает в узком парааксиальном пучке и изображение передается через плоско-параллельную пластину без искажений. Момент совмещения фиксируется визуально по симметричному расположению нижнего торца электрода 4 в поле зрения микроскопа; взаимное положение частей насадки 8 фиксируется зажимами 9.

Следующей операцией является установка нижнего торца электрода 4 в такое положение, при котором зазор между нижним торцом электрода 4 и предметной плоскостью микроскопа будет соответствовать выбранной толщине слоя НЖК. Для этого можно использовать калиброванные стеклянные прокладки, а также фторопластовые или лавсановые пленки известной толщины. На предметный столик микроскопа помещается тест-объект (например, из комплекта микроскопа) и микроскоп настраивают на резкое изображение объекта. Затем на тест-объект на-

кладывают стеклянную пластину или пленку определенной толщины и втулка 8 опускается относительно объектива микроскопа до упора нижнего торца электрода 4 в пластину или пленку. В дальнейшем при настройке микроскопа на резкое изображение любой поверхности между этой поверхностью и нижним торцом электрода 4 фиксируется зазор заданной толщины. Исходя из противоречивых требований к ориентации слоя НЖК, значению рабочих напряжений и пространственному разрешению, толщина НЖК-слоя составляет 10—20 мкм.

Зазор между нижним торцом электрода 4 и поверхностью кристалла ИС 2 заполняют НЖК. При перемещении ИС на столике микроскопа капля НЖК капиллярными силами удерживается в зазоре и таким образом происходит зондирование всей поверхности ИС. Конструкция прижима 3 позволяет использовать прозрачные электроды-зонды различных размеров: диаметром 1,5; 1,0; 0,5 мм и длиной 2—5 мм. На рис.3 приведены фотографии насадок к микроскопам ММУ-3 (а) и «Epival» (б).

По сравнению с покровными стеклами насадки более универсальны, технологичны и полностью предотвращают обрыв токопроводящих выводов ИС при подготовке образцов к измерениям.

В качестве примера рассмотрим методику применения НЖК-зонда для определения поверхностных потенциалов кристалла ИС. Основанием для количественного определения электрических потенциалов является пороговый характер переориентации молекул НЖК, т.е. переориентация происходит при достижении определенного (порогового) значения напряжения $U_{пор}$, приложенного к слою НЖК.

На основе кристалла ИС по одному из описанных выше способов формируется НЖК-ячейка и схема включается в заданный режим. От источника, включенного между шиной «0» ИС и зондом, на прозрачный электрод подается потенциал, полярность и значение которого могут изменяться в пределах напряжений питания ИС. Изменением значения и полярности потенциала зонда фз, фиксируют момент локальной переориентации НЖК над соответствующим участком поверх-

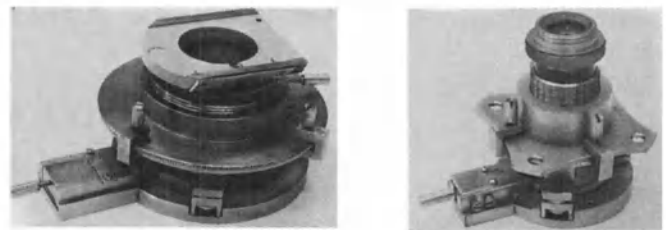


Рис. 3. Общий вид насадок к микроскопу ММУ-3 (а) и Epival (б)

ности ИС. При этом выполняется соотношение: $U_{пор} = \varphi_z \pm \varphi_x$, где φ_x — искомый потенциал. Поскольку НЖК реагирует на электрическое поле независимо от его полярности, по значению и знаку φ_z возможно определить значение и знак потенциала φ_x . Например, при подаче на зонд положительного потенциала переориентация происходит при $\varphi_z < U_{пор}$, следовательно, потенциал φ_x отрицательный и находится как $\varphi_x = -(U_{пор} - \varphi_z)$. Если переориентация происходит при $\varphi_z > U_{пор}$, то φ_x положителен; $\varphi_x = \varphi_z - U_{пор}$. Аналогично ведется расчет φ_x при отрицательном потенциале φ_z .

Когда переориентация НЖК происходит при $\varphi_z = 0$, что соответствует режиму ИС $|\varphi_x| > U_{пор}$, подбирают знак и значение φ_z до момента возвращения НЖК в исходное состояние. В этом случае модуль φ_x находят из соотношения $|\varphi_x| = U_{пор} + |\varphi_z|$, знак φ_x определяется знаком φ_z .

На основе унифицированных по типоразмерам насадок и держателей ИС разработаны нормативные документы, включающие в себя 10 методик:

- анализ качества пассивирующего слоя над металлизированными шинами;
- контроль электрической связи контактных площадок с кристаллом;
- контроль электрического контакта металлизированных шин с кристаллом;
- получение с помощью НЖК «тестовых» оптических изображений, соответствующих различным режимам работы ИС;
- определение поверхностных потенциалов ИС;
- контроль качества изолирующего, подзатворного и тонкого («подныры») окислов и вскрытия контактных окон;
- контроль качества изоляции «карманов» и изолирующего окисла на основе ДИКЭД- и КСДИ-структур;

— оценка толщины диэлектрического слоя на проводящей подложке;

- контроль качества межслойной изоляции;
- контроль качества подзатворного диэлектрика в ИС с поликремниевым затвором.

Существующая номенклатура НЖК позволяет реализовать НЖК-метод контроля в пределах напряжений $5 \div 10$ В и частот $0-200$ кГц. Сравнение результатов анализа, полученных с помощью НЖК и РЭМ [10] показывает, что НЖК-зонд позволяет выявлять точечные дефекты технологических слоев менее $0,5$ мкм с разрешением до 1 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гриценко Н.И., Клименко А.С., Коваль Ю.Д., Мошель Н.В. — Микроэлектроника, 1984, т.13, вып. 5, с. 468—471.
2. Гриценко Н.И., Добролеж С.А., Клименко А.С., Коваль Ю.Д., Мошель Н.В. — Электронная промышленность, 1982, вып. 10—11, с. 96—97.
3. Гриценко Н.И., Добролеж С.А., Клименко А.С., Коваль Ю.Д., Мошель Н.В. — Электронная промышленность, 1982, вып. 10—11, с. 90—95.
4. Гриценко Н.И., Клименко А.С., Коваль Ю.Д., Маркова О.З., Мошель Н.В. — Тезисы докладов V конференции соц. стран по ЖК, Одесса, АН УССР, 1983, т.2, ч.2, с. 48—49.
5. Невская Г.Е., Рубцов А.Е. Метод жидких кристаллов в контроле интегральных схем. Обзоры по электронной технике. Сер. 8, 1986; вып. 1, с. 47.
6. Гриценко Н.И., Коваль Ю.Д., Маркова О.З., Мошель Н.В. — Микроэлектроника, 1980, т. 9, вып. 5, с. 444—449.
7. Патент США № 3.0934.199, 1976.
8. Патент США № 4.242.635, 1980.
9. Burns J.D. IEEE Trans., 1979, v. ED-26, N 1, pp. 90—95.
10. Клименко А.С., Коваль Ю.Д., Мошель Н.В., Суржина З.Я. Тезисы докладов VI Всесоюзной конференции по ЖК, Чернигов, АН УССР, 1988, т. IV, с. 510—511.

Черниговский государственный педагогический институт
250013, Украина, г.Чернигов, ул.Свердлова, 53.

Технологическое обеспечение ЖК-методов контроля качества тонких пленок

А.С.КЛИМЕНКО, Н.В.МОШЕЛЬ, З.Я.СУРЖИНА

Причиной отказа изделий, полученных тонкопленочной технологией, часто являются дефекты промежуточных слоев и структур. Специалистами Черниговского педагогического института разработаны новые методы контроля качества тонкопленочных структур,

основанные на применении жидких кристаллов. Предложенные оптимальные конструкции ячеек для контроля пластин диаметром до 150 мм позволяют своевременно обнаружить и устранить указанные дефекты.

Основная причина отказов изделий, полученных тонкопленочной технологией, — дефекты промежуточных слоев и структур, в первую очередь диэлектрических. Поэтому необходимо разрабатывать новые методы и средства их контроля. В последнее время интенсивно развивается и внедряется метод жидких кристаллов (ЖК-метод) [1, 2], который основан на высокой чувствительности структуры ЖК к незначительным изменениям электрических и тепловых полей, формирующихся при работе изделия. При анализе дефектности методом ЖК на исследуемую структуру наносят тонкий (10–50 мкм) слой ЖК и моделируют соответствующий режим работы структуры. Локальные изменения электрических и тепловых полей в областях дефектов влекут за собой локальные изменения структуры ЖК-слоя. Для повышения контраста наблюдения проводят в поляризованном свете.

Методом ЖК пользуются для контроля качества широкого класса структур: диэлектрических, металлических и фоторезистивных пленок [1, 2, 3], полупроводниковых пластин [4], в том числе окисленных [2, 5], промежуточных этапов тонкопленочной технологии [6, 7], а также для анализа отказов готовых изделий [8, 9]. Однако внедрение метода в условиях массового производства сдерживается отсутствием простой, технологичной и унифицированной оснастки для формирования на исследуемой структуре ЖК-слоя заданной толщины и последующего анализа. В Черниговском педагогическом институте разработаны устройства для контроля качества полупроводниковых пластин, тонких пленок и промежуточных структур на полупроводниковых пластинах.

При разработке конструкции устройства для контроля качества тонких пленок (ЖК-ячейки) соблюдались следующие требования:

- основание, на которое устанавливается контролируемая пластина, должно быть электропроводящим, иметь контактный узел для подачи электрического потенциала; поверхность основания должна иметь высокий класс чистоты (не менее 6–20);

- устройство должно обеспечивать возможность образования на всей поверхности пластины слоя ЖК заданной толщины;

- подложка, накрывающая слой ЖК сверху, должна быть прозрачной, электропроводящей и быть устойчивой к органическим растворителям. Этому условию удовлетворяют стеклянные подложки с нанесенным прозрачным электродом в виде пленки SnO_2 , In_2O_3 , Cr ;

- электрический контакт с прозрачным электродом должен быть надежным и съемным;

- ЖК-ячейка должна легко собираться и разбираться, обеспечивать простое и надежное закрепление в нем пластины, ее съем и промывку;

- в собранном виде ЖК-ячейка должна жестко фиксировать пластину, выдерживать заданную толщину ЖК-слоя и быть пригодной для транспортировки;

- конструкция ЖК-ячейки должна обеспечивать возможность наблюдения всей поверхности пластины под микроскопом.

Согласно изложенным требованиям ЖК-ячейка имеет конструкцию, показанную на рис. 1.

С целью оптимизации конструкций был разработан и опробован ряд конструктивных вариантов. Вначале основание ячейки изготавливали из нержавеющей стали, стекло с прозрачным электродом закрепляли в металлической рамке, которую либо на винтах, либо на

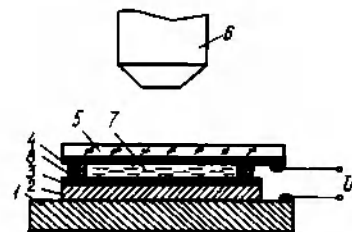


Рис.1. Структурная схема ЖК-ячейки

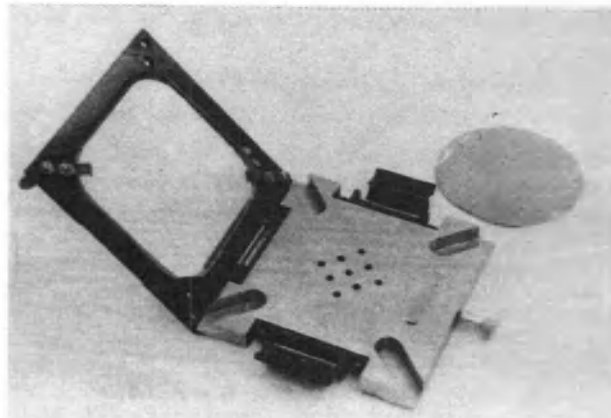


Рис.2. Ячейка для контроля пластин $\varnothing 76$ мм

шарнирах крепили к основанию. Толщину ЖК-слоя задавали фторопластовыми прокладками, установленными по периметру контролируемой пластины. Один из вариантов конструкции (рис. 2) позволяет контролировать пластины диаметром до 76 мм. Основание изготовлено из нержавеющей стали, поверхность основания обрабатывается до 6-го класса чистоты. Стекло с прозрачной токопроводящей пленкой SnO_2 закрепляется в металлической рамке латунными прижимами, которые одновременно являются контактами. Прижимы крепятся винтами, проходящими через фторопластовые втулки, служащие изоляторами. Один из винтов на наружной стороне рамки имеет гнездо для штыревого электрода. Винт на торце основания служит для подключения второго провода от источника. В основании выполнены пазы для размещения латунных прижимов при сборке.

Рамка со стеклом крепится к основанию шарниром с возможностью поворота на 180° . При сборке рамка спускается на основание и фиксируется пружинным пластинчатым замком. В самом основании выполнены отверстия для вакуумного закрепления пластины.

Испытания данной и аналогичных конструкций позволили выявить их недостатки: возможность образования клинообразного ЖК-слоя вследствие неравномерного прижима, необходимость точной обработки стекла под размер рамки, чувствительность слоя нематических жидких кристаллов (НЖК) в такой конструкции к сторонним механическим возмущениям и вибрации.

Для устранения этих недостатков было предложено основание ячейки выполнить разборным: в нижней части — корпусе на пружинной подвеске — установлен стол для исследуемой пластины. Рамка со стеклом крепится к корпусу винтами, при этом исследуемая пластина прижимается к стеклу пружинами, чем и обес-



Рис.3. Ячейка с подпружиненным основанием

печивается равномерность усилия прижима (рис. 3). Однако при эксплуатации таких ячеек выявилось, что после проведения анализа пластина, как и в ячейках предыдущей конструкции, силами поверхностного натяжения ЖК удерживается на покровном стекле. Это усложняет процесс подготовки ячейки к последующей операции контроля. Кроме того, поверхность основания для установки пластины должна, как и ранее, обрабатываться до высокой степени чистоты.

Для проведения контроля с использованием автоматически управляемого стола установки УКВМ-1 и вывода наблюдаемой картины на телевизионный экран разработана ячейка, позволяющая контролировать пластины диаметром до 150 мм. При разработке ставилась цель получить конструкцию простую и удобную в эксплуатации, легко собираемую и разбираемую. В качестве покровного стекла и основания для установки контролируемой пластины предложено использовать стекло с прозрачной токопроводящей пленкой SnO_2 , выпускаемые промышленностью по ТУ-21 УССР-180-79 для изготовления индикаторных приборов. При этом отпадает необходимость обрабатывать металлическое основание до высокого класса чистоты.

При испытаниях в качестве основания были использованы такие же стеклянные пластины для фотошаблонов, покрытые слоем хрома типа ППХВ 153x153x3 ЕТО.035.152ТУ. Оказалось, что результаты анализа дефектов диэлектрических пленок на пластинах Si не отличаются от результатов испытаний, в которых использовали основания со слоем Cr и SnO_2 . Следовательно, пленка Cr, как и SnO_2 [10], образует с Si омический контакт. В ячейке можно также использовать пластины, забракованные при производстве фотошаблонов, что особенно важно с точки зрения стоимости устройства контроля. Конструкция такой ячейки показана на рис. 4. Она состоит из основания, на котором установлены четыре подпружиненных прижима для закрепления стеклянных пластин, которые изолированы от основания и от пластин. В комплект входят две скобки с винтами для подключения к проводящим пленкам SnO_2 и Cr источника питания.

При подготовке образца к исследованиям на основании размещают стекло с Cr пленкой, проводящей вверх, затем накладывают пластину Si с анализируемой пленкой. На поверхность пластины наносят раствор поверхностно-активного вещества для получения однородной ориентации ЖК-слоя. Наиболее часто для получения нормальной ориентации длинных осей молекул ЖК к подложке используется раствор лецитина в толуоле, а для получения планарной ориентации соответ-

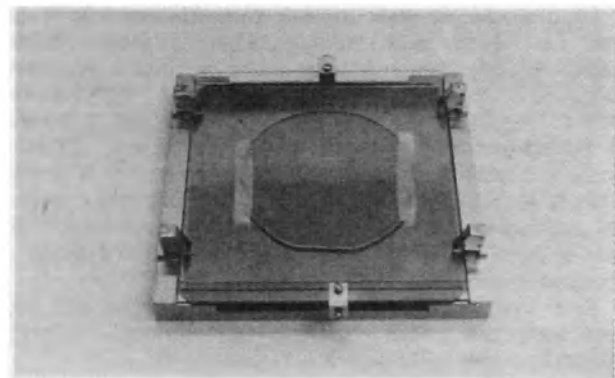
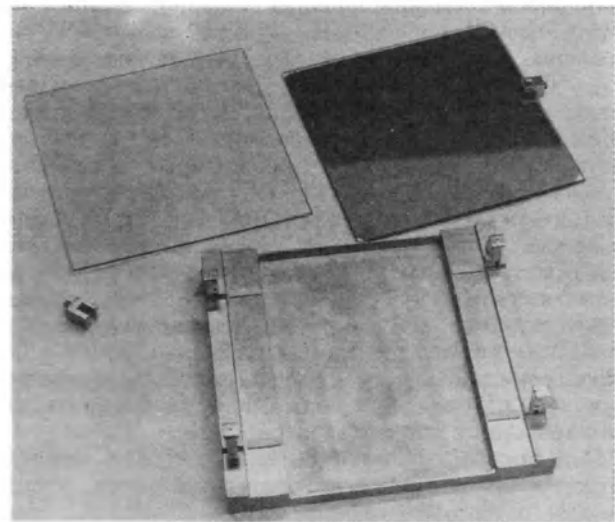


Рис.4. Ячейка для контроля пластин $\varnothing 150$ мм на основе калиброванных стекол: а — подготовленная к сборке; б — в собранном виде

венно, раствор поливинилового спирта. После высыхания растворителя образуется ориентирующая пленка. Затем на пластину наносят дозированную каплю ЖК; на технологические участки пластины, не подвергающиеся контролю, накладывают фторопластовые прокладки, определяющие толщину ЖК-слоя.

Ориентированный слой ЖК может быть получен и при выпаривании "тройной" смеси, содержащей ЖК, ориентант и растворитель, растворяющий оба компонента. Поскольку ориентанты преимущественно не растворяются в ЖК, такую тройную смесь готовят заранее и для формирования ориентированного ЖК-слоя на пластину наносят дозированную каплю смеси. После распределения раствора по поверхности пластины и высыхания растворителя формируется однородно ориентированный слой ЖК.

Сверху накладывают стекло со SnO_2 пленкой, проводящей вниз, и сборку фиксируют прижимами. Капля ЖК, растекаясь, заполняет зазор между поверхностью Si и слоем SnO_2 на стекле. При сборке ячейки стекла сдвигают по отношению друг к другу на расстояние ~ 10 мм, чтобы установить контактные скобки с проводами от источника питания. Подготовленную таким образом ячейку устанавливают на столик микроскопа, работающего в отраженном поляризованном свете. Настроив микроскоп на четкое изображение поверхности пластины, проверяют степень ориентации

ЖК-слоя по всей поверхности образца. Однородно ориентированный слой НЖК должен выглядеть темным в скрещенных поляроидах. При наличии неоднократно ориентированных участков ЖК ячейку нагревают до температуры, на $5-10^{\circ}$ превышающей температуру перехода ЖК в изотропное состояние; при охлаждении формируется текстура с более качественной ориентацией. Затем ячейку подключают к источнику питания и устанавливают необходимый режим питания (исходя из характеристик контролируемой пленки или поверхности). В областях дефектов или неоднородностей контролируемой пленки формируются неоднородности электрического поля, которые вызывают локальные изменения ориентации ЖК-слоя. Последние легко фиксируются в поляризованном свете из-за значительной ($\Delta n = 0,3-0,4$) анизотропии показателя преломления ЖК.

Ячейка с подогревом и стабилизацией температуры позволяет управлять чувствительностью метода, поскольку напряжение переориентации ЖК над дефектом есть функция вязкости [11]. Перемещая ячейку на столике микроскопа, осматривают всю поверхность образца, фиксируют ЖК-образы дефектов, их количество и распределение. Существенно упростить процесс контроля и повысить производительность труда можно, если совместить рабочее место контролера, включающее микроскоп с электрически управляемым координатным столиком, и подключенную к микроскопу телевизионную камеру с выводом на телеэкран, с ЭВМ с печатающим устройством. В этом случае ЖК-образ участка контролируемой пластины может быть введен в память ЭВМ в виде телевизионных сигналов; последовательно сканируя всю поверхность контролируемой пластины, информацию о дефектности пластины обрабатывают по заданной программе и выводят в графическом виде с указанием координат и дефектов на пластине. При этом одновременно может быть осуществлена автоматическая отбраковка пластин или их отдельных участков (областей).

ЛИТЕРАТУРА

1. Оптимизация метода НЖК для дефектоскопии твердых поверхностей в электрическом поле / В.Г.Чигринов, Г.В.Коркишко, Г.Е.Невская и др. — Обзоры по электронной технике. Сер. 8, 1988, вып.3, с. 50.
2. Гриценко Н.И., Кучеев С.И., Мошеля Н.В. Использование НЖК для неразрушающего контроля изделий микроэлектроники. — Изв. АН СССР, сер. физика, 1989, т.53, № 10, с. 2029—2044.
3. Анализ дефектов металлических и фоторезистивных слоев фотошаблонов с помощью НЖК / Н.И.Гриценко, А.С.Клименко, Ю.Д.Коваль и др. — Электронная техника. Сер.8, 1985, вып.4, с. 15—17.
4. Невская Г.Е., Макарова О.В., Домани И.Г. Контроль качества поверхности кремниевых пластин с помощью НЖК. — Электронная техника. Сер.8, 1989, вып.4, с. 38—39.
5. Патент США № 4468916, МКИ G02F1/13, 1987 г.
6. Павленко Л.С., Борисов В.М., Кочелковская Л.В. Применение НЖК для контроля качества МДП БИС. — Электронная техника, Сер.8, 1978, вып.5, с. 103—105.
7. Визуализация $p-n$ -переходов в изделиях микроэлектроники НЖК со свободной поверхностью / Н.И.Гриценко, С.И.Кучеев, А.С.Клименко и др. — Микроэлектроника, 1989, т.18, вып. 4, с. 289—333.
8. Патент Японии № 58-56975 МКИ H01L 21/66, 1983.
9. Рубцов А.Е., Невская Г.Е. Метод жидких кристаллов в контроле интегральных схем. / Обзоры по электронной технике. Сер.8, М.: ЦНИИ «Электроника». 1986, вып.1., 48 с.
10. Бугадов К.М., Алиев Д.Ф., Казым-Заде А.Г. Фотозлектрические свойства контакта жидкий кристалл—кремний. — Микроэлектроника, 1983, т.12, вып. 1, с. 76—78.
11. Блинов Л.М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. — М.: Наука, 1978, 384 с.

Черниговский государственный педагогический институт
им. Т. Г. Шевченко
250013, Украина, г. Чернигов,
ул. Свердлова, 53.

Метод термического воздействия — наиболее эффективный для оценки прочности сцепления гальванического покрытия

В.А.ЕМЕЛЬЯНОВ, Л.П.АНУФРИЕВ

Установлена зависимость прочности сцепления покрытия, пористости и внутренних напряжений от степени удаления с поверхности раздела продуктов травления. Рекомендован термический метод контроля качества сцепления гальванического покрытия с основой.

Металлические поверхности металлостеклянных корпусов полупроводниковых приборов и микросхем в процессе сборки, монтажа и экс-

плуатации подвергаются ряду термических, механических и химических воздействий, что определяет повышенные требования к качеству и устойчивости гальванического покрытия. Анализ отказов изделий электронной техники показал, что граница срастания металлической поверхности основы с гальваническим покрытием наиболее критична для определения качества и работоспособности изделия. Наличие в зоне сраста-

ния окисных пленок, остатков электролитов и продуктов травления, адсорбированных газов негативно сказывается на прочности и долговечности соединения гальванического покрытия с основой, ведет к нарушению кристаллической структуры покрытия, высоким внутренним напряжениям в пленках, а также к появлению пор и включений. Особенно наглядно это проявляется при тепловых воздействиях, когда неудовлетворительное качество сцепления и высокие внутренние напряжения в покрытии приводят к появлению таких дефектов, как «вспучивание» и «вздутие» покрытия, его растрескивание.

В Гомельском производственном объединении «Коралл» исследовано влияние режимов обработки поверхности ковара на качество сцепления с ним гальванического никелевого покрытия, используемого в качестве подслоя под золотое покрытие и как самостоятельное покрытие.

Удаление окисной пленки, образующейся на поверхности ковара в технологическом процессе производилось путем одно- или двухстадийного травления в 20% растворе соляной кислоты при температуре 50–55°C в течение 5–10 мин и в смеси соляной (150–200 мл/л) и азотной (50–100 мл/л) кислот в течение 10–30 с. Для стабилизации процесса травления в раствор добавлялись ингибирующие (гексаметилентетрамин) и выравнивающие (2-бутиндиол 1,4 и уайт-спирит) добавки. Качество подготовки поверхности ковара оценивалось по наличию на поверхности остатков окислов, продуктов травления, электролита, адсорбированных газов методом рентгеновского микроанализа поверхности с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ-200) с приставкой для микроанализа. В качестве гальванического покрытия использовался никель, осаждаемый из электролита следующего состава (г/л): NiSO₄ (150–200); Na₂SO₄ (50–70); H₃BO₃ (30); MgSO₄ (20); NaCl (5–10); pH составляла 4–5, температура 45–55°C, катодная плотность тока 1,2–1,5 А/дм².

Прочность сцепления никеля оценивалась под микроскопом после пятикратного изгиба, а также методом термического воздействия при температуре 420±50°C в течение 2 мин. Внутренние напряжения первого рода в покрытии исследовались с помощью дифрактометра ДРОН-3м с использованием графитового монохроматора на отраженном пучке α-излучения, длиной волны λ=15,4 нм.

Исследовано пять различных режимов обработки поверхности ковара после удаления с нее окисной пленки. Режимы обработки включали: химическое обезжиривание, промывку в горячей (50±5°C) проточной воде, химическое и электрохимическое декапирование в 25- и 50%-ных растворах соляной кислоты, одно- и двухстадийную промывку в холодной и горячей (50–60°C) деионизованной воде.

Анализ данных рентгеновского микроанализа поверхности ковара после травления и промыв-

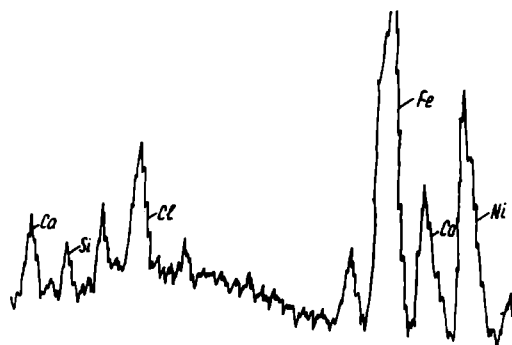


Рис. 1. Рентгенограмма поверхности ковара после травления и промывки в холодной проточной воде

ки в холодной воде (рис. 1) показал, что основными видами загрязнения являются соединения, содержащие хлор, кальций, кремний. Кроме того, выявлено присутствие углерода, кислорода, фтора, азота. Наличие на поверхности металла кремния и фтора в значительной степени обусловлено травлением стеклоизолятора в плавиковой кислоте. Введение операции декапирования в растворе соляной кислоты резко снижает загрязнение поверхности кремнием и фтором, а электрохимическое декапирование при плотности тока 0,8–1,0 А/дм² позволяет практически полностью удалить эти загрязнения (рис. 2). Кроме того, операция электрохимического травления, сопровождающаяся интенсивным выделением водорода, способствует очистке поверхности от остатков продуктов травления, травильного шлама. Применение двухстадийной каскадной промывки в деионизованной воде позволяет эффективно удалить растворимые продукты травления и остатки электролита (рис. 3) при относительно небольшом расходе воды.

Качество подготовки поверхности ковара перед нанесением гальванического покрытия в значительной степени предопределяет наличие в

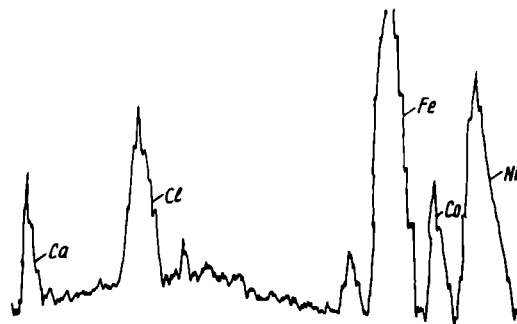


Рис. 2. Рентгенограмма поверхности ковара после электрохимического декапирования и промывки в холодной воде

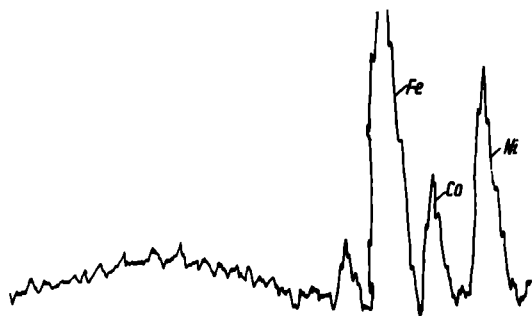


Рис. 3. Рентгенограмма поверхности кобальта после дополнительной промывки в деионизованной воде

покрытия внутренних напряжений первого рода. Загрязнения, адсорбированные газы, поры препятствуют формированию совершенной кристаллической структуры гальванических слоев, ведут к появлению дефектов в виде пор и включений, образованию неупорядоченного переходного слоя. Все это приводит к значительным локальным перенапряжениям. Установлено, что в никелевых покрытиях, независимо от режимов электролиза, возникают внутренние напряжения сжатия от $3 \cdot 10^6$ до $10 \cdot 10^6$ Н/м². Наибольшие значения внутренних напряжений выявлены на образцах со значительным загрязнением поверхности.

Влияние подготовки поверхности на прочность сцепления покрытия с подложкой выявило неоднозначность результатов, получаемых при испытаниях методами изгиба и термического воздействия. При испытаниях образцов, поверхность которых не имела значительных загрязнений, получена достаточно хорошая сходимость резуль-

татов. При этом образцы со значительными внутренними напряжениями первого рода ($6 \cdot 10^6$ Н/м² и выше) имеют до 30% отказов по «отслоению» и «вспучиванию» покрытия при обоих методах испытаний. Образцы с менее напряженным покрытием отказов практически не имеют.

Такое различие результатов, видимо, объясняется дополнительным влиянием режима электролиза на совершенство структуры слоев никеля и внутренние напряжения.

Испытание образцов, не прошедших эффективной обработки поверхности, методом изгиба выявляет 25—35% дефектных изделий, в то время как после термического воздействия отказы составляют до 80%. Очевидно, что нагрев образцов сопровождается газовыделением с загрязненными поверхностями, частичным разложением продуктов травления на границе раздела, и, как следствие, отслоением и «вспучиванием» покрытия. Следовательно, термический анализ прочности сцепления гальванического покрытия с подложкой, которая подвергалась глубокому травлению дает более достоверные результаты о качестве и надежности изделия.

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать метод термического воздействия как наиболее точный и простой при анализе качества сцепления гальванического покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Повышение качества сборки и монтажа интегральных схем/Л.П.Ануфриев, В.А.Емельянов, Л.К.Кушнер и др.— Электронная промышленность, 1990, вып. 5, с. 11—13.
2. Емельянов В.А., Михайлов Г.К., Ануфриев Л.П. Повышение надежности соединений в металло-стеклянных корпусах ИМС.— Электронная промышленность, 1991, вып. 7, с. 51.

Контроль приповерхностных слоев полупроводников методом локального плавления

В.А.ЛОГИНОВ, А.И.ПЛОТНИКОВ, С.И.РЕМБЕЗА

Метод локального плавления полупроводников в условиях импульсного нагрева может быть использован для качественной оценки поверхностных загрязнений, механических нарушений после обработки поверхности пластин и структурных дефектов после термообработки ионно-имплантированных образцов.

В связи с развитием субмикронной технологии и использованием мелкозалегающих активных структур все большее значение приобретает исследование поверхностных свойств полупроводников. Наряду с применением традиционных методов исследования необходимо развитие новых методик, основанных на последних достиже-

ниях в области изучения свойств полупроводников. К ним можно отнести комплекс методик, основанных на использовании эффекта локального поверхностного плавления полупроводников. В работах [1-4] сообщается о локальном характере зарождения жидкой фазы на поверхности полупроводников (Si, Ge, GaAs) при достижении порога плавления в условиях импульсного нагрева некогерентным излучением. В результате последующей кристаллизации расплавленных участков на поверхности формируются характерные фигуры, форма которых связана с кристаллографической ориентацией образцов. На плоскостях (111) и (100) образуются области локального плавления, соответственно, треугольной и квадратной формы. Дискретное зарождение жидкой фазы в условиях импульсного нагрева стимулируется поверхностными дефектами, поэтому количество центров плавления может характеризовать уровень дефектности поверхности полупроводников. Форма областей локального плавления контролируется анизотропией теплофизических свойств материала [1,3], которые в свою очередь зависят от кристаллической структуры полупроводника, поэтому отклонение от правильной огранки фигур плавления может нести информацию о структурном совершенстве приповерхностных слоев исследуемых объектов. Исследования показали, что плотность и форма областей локального плавления изменяется под влиянием различных воздействий. Ниже рассматриваются некоторые пути применения эффекта локального плавления для контроля приповерхностных слоев полупроводников.

Контроль поверхностных загрязнений полупроводников

В качестве объектов исследования использовались пластины монокристаллического кремния марки КЭФ-0,3 ориентации (111) диаметром 60 мм. Формирование областей локального плавления осуществлялось путем воздействия на образцы моноимпульсов излучения ксеноновых ламп. Длительность импульса составляла $\sim 0,5$ с, спектр длин волн некогерентного излучения $- 0,2-1,3$ мкм.

Наиболее интересным и сложным в проблеме локального плавления полупроводников является вопрос о природе центров зарождения жидкой фазы. В работе [4] сделано предположение, что плавление в условиях импульсного нагрева происходит на дефектах структуры полупроводников. Однако эксперименты, проводимые в Воронежском политехническом институте показали, что определяющую роль в процессе локального зарождения жидкой фазы полупроводников играют поверхностные примеси. Наиболее убедительным доказательством данного вывода является эксперимент по импульсному нагреву кремниевых пластин, подвергнутых выдержке на воздухе. Плотность центров плавления на образцах после стандартной очистки поверхности составляла $\sim 10^3$ см⁻²; в результате хранения пластин в течение недели плотность областей локального плавления возросла до $\sim 10^4$ см⁻². Поскольку выдержка пластин на воздухе не сопровождается внесением в материал каких-либо структурных дефектов, повышение плотности центров плавления связано с увеличением концентрации поверхностных примесей, адсорбированных кремнием из окружающей среды. К аналогичному результату приводит нанесение на поверхность кремниевых пластин углеводородной пленки; в этом случае плотность областей локального плавления возрастает от 10^3 (исходная поверхность) до $5 \cdot 10^5$ см⁻². Пове-

шение плотности центров плавления наблюдается также при загрязнении поверхности пластин пленкой технической воды. Приведенные результаты свидетельствуют о доминирующей роли поверхностных примесей в процессе локального зарождения жидкой фазы в условиях импульсного нагрева полупроводников. По-видимому, природа примесей, ответственных за образование зародышей жидкой фазы, может быть самой различной. Такими поверхностными примесями могут являться углеводородные комплексы, соли, металлические примеси, атомы тяжелых элементов. В работе [3] показано, что островки алюминия на поверхности монокристаллического кремния являются эффективными центрами плавления. Поэтому эффект дискретного поверхностного плавления может применяться для локального легирования полупроводников.

Полученные данные могут быть использованы для качественного экспресс-контроля чистоты поверхности полупроводников. Статистическая обработка результатов экспериментов по импульсному нагреву некогерентным излучением кремниевых пластин, заключительной стадией подготовки поверхности которых являлась химико-механическая полировка, показала, что при стандартной технологии очистки минимально достигаемая плотность центров плавления составляет $\sim 10^3$ см⁻². Превышение данной величины свидетельствует о недостаточно качественной очистке поверхности кремниевых пластин.

Контроль качества механической обработки поверхности полупроводников

Механические нарушения (царапины, сколы, ступени и др.), образующиеся в процессе обработки поверхности полупроводников, являются наиболее активными центрами адсорбции, поэтому качество подготовки поверхности может оказывать влияние на особенности локального плавления полупроводников в условиях импульсного нагрева.

Проведено исследование влияния качества механической обработки кремниевых пластин марки КДБ-10 диаметром 100 мм ориентации (111) на плотность областей локального плавления. Пластины подвергались механической полировке алмазными пастами АСМ-1/0, АСМ-2/1, АСМ-3/2, АСМ-5/3, АСМ-7/5, после чего их облучали моноимпульсами некогерентного излучения. В целях исключения влияния подготовки поверхности на результаты эксперимента все пластины в исходном состоянии были подвергнуты химико-механической полировке. Поскольку учитывалась природа центров плавления, все пластины перед импульсным нагревом отмывались в идентичных условиях. В результате воздействия излучения на поверхности пластин формировались области локального плавления, плотность которых зависела от дисперсности применяемого абразива (рис.1). Как следует из рисунка, плотность центров

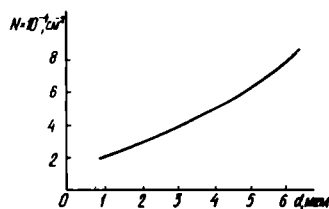


Рис.1. Зависимость плотности центров плавления от дисперсности абразива, применяемого для механической обработки пластин кремния

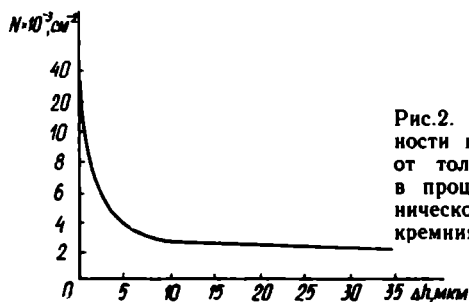


Рис.2. Зависимость плотности центров плавления от толщины удаляемого в процессе химико-механической полировки слоя кремния

плавления при использовании паст АСМ-1/0 и АСМ-7/5 по мере ухудшения качества механической обработки возрастает более, чем в 4 раза (от $2,3 \cdot 10^4$ до 10^5 см⁻²).

Проведено исследование зависимости плотности центров плавления от толщины слоя кремния, удаляемого на операции химико-механической полировки. После резки слитков на пластины последние подвергались шлифовке (толщина удаляемого слоя составляла 45 мкм), химико-динамическому травлению (16 мкм) и механической полировке алмазной пастой АСМ-2/1 (60 мкм). Затем проводилось химико-механическое удаление слоя кремния различной толщины, после чего пластины подвергались воздействию импульса некогерентного излучения. Из приведенной на рис.2 зависимости следует, что плотность центров локального плавления резко уменьшается на начальной стадии химико-механической обработки и затем при толщине удаленного слоя кремния, превышающей 5 мкм, практически не изменяется.

Следует остановиться на особенностях применимости эффекта локального плавления в качестве метода контроля механической обработки полупроводников. Экспериментально установлено, что этот метод может использоваться лишь для образцов, имеющих полированную поверхность; на шлифованных пластинах наблюдается спонтанное плавление одновременно всей поверхности, что обусловлено большой плотностью центров зарождения жидкой фазы.

Несмотря на то, что возможности рассматриваемого метода ограничены, из анализа полученных результатов следует перспективность использования эффекта локального плавления в качестве экспресс-метода контроля качества механической обработки поверхности полупроводников (процесс импульсного нагрева и измерения плотности фигур плавления занимает не более нескольких минут). Для проведения контроля с использованием образцов-спутников не требуется сложного оборудования, его характеризует простота и наглядность.

Контроль ионно-имплантированных слоев

Одна из актуальнейших задач ионной технологии — разработка режимов отжига слоев, нарушенных в результате внедрения легирующих примесей. После термообработки необходим контроль структуры ионно-имплантированных образцов. Отжиг радиационных дефектов сопровождается образованием дислокаций, дислокационных петель, плоскостных и линейных включений вакансий, междоузельных и примесных атомов. Большинство из сформировавшихся в процессе термообработки дефектов невозможно выявить в условиях произ-

водства с помощью простых приемов, таких как обработка образцов в селективных химических травителях. Наиболее полная информация о структурном совершенстве ионно-имплантированных слоев может быть получена путем проведения электронно-микроскопических исследований, однако широкое применение данного метода в производственных условиях затруднено в связи со сложностью оборудования и длительностью процесса контроля.

Выше отмечалось, что форма областей локального плавления зависит от кристаллической структуры полупроводника. Следовательно, можно ожидать проявления особенностей в формировании локальных областей жидкой фазы при импульсном облучении ионно-имплантированных образцов. С целью проверки данного предположения проводилась имплантация ионов бора с энергией 120 кэВ при дозе 100 мкКл/см² в пластины кремния марки КЭФ-0,3 ориентации (111). Послеимплантационный отжиг осуществлялся в среде азота при $T = 1333$ К в течение 70 мин. В результате импульсного нагрева исследуемых образцов на их поверхности формировались области локального плавления гексагональной формы, в то время как на исходных (неимплантированных) пластинах наблюдалось образование треугольных фигур плавления. Таким образом, большое количество дефектов отожженных ионно-имплантированных слоев увеличивает изотропию свойств кремния, что оказывает влияние на характер формирования областей локального плавления. Чем ближе фигуры плавления будут к треугольной форме (характерной для неимплантированного кремния), тем выше степень структурного совершенства отожженных ионно-имплантированных слоев. Следовательно, эффект локального плавления полупроводников в условиях импульсного нагрева может использоваться для качественной оценки уровня дефектности ионно-легируемых образцов.

Авторы благодарят Семенову Л.Г. и Огнева Л.Н. за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Faceted melting and superheating of crystalline Si irradiated with incoherent light /G.K.Celler, K.A.Jachson, L.E.Trimble et al. — Energy Beam Solid Interact. and Transient Therm. Processing. Symp., Boston, Mass., Nov. 14—17, 1983, Nev. York e.a., 1984, p. 409—415.
2. Local melting by nucleation on the surface of single crystalline silicon /K.-H.Heinig, M.Voelskow, J.Matthai et al. — Zentralinst. Kernforsh. Rossendorf, Dresden, 1985, N 555, Pt.1, p. 280—286.
3. H e i n i g K.-H. Effect local melting on semiconductor surface. — Zentralinst. Kernforsh. Rossendorf, Dresden, 1985, N 555, Pt. 1, p. 265—279.
4. В е р х о д а н о в С.П., Г е р а с и м е н к о Н.Н., М я с н и к о в А.М. Анизотропное плавление на дефектах структуры кремния. — Поверхность. Физика, химия, механика, 1988, № 5, с. 69—73.

Методология тестирования однокристальных микроконтроллеров серии К1814

А.Е.ВВЕДЕНСКИЙ, В.Н.ЗЛАТОПОЛЬСКИЙ, Г.К.ТРЕТЬЯКОВА,
М.Ю.ФИЛАТОВ, И.А.ШАДРИН

Специалистами ПО "Электроника" (г.Воронеж) разработан пакет программ автоматизированной генерации тестов "Протон" для микроконтроллеров серии К1814, позволяющий существенно снизить затраты на проектирование тестовых данных для измерительного комплекса 14КВК ФИЦЕ-10-004.

Однокристальные микроконтроллеры серии К1814 [1] предназначены для использования в массовых устройствах бытового и промышленного назначения. Необходимость обеспечить их низкую стоимость привела к минимизации на кристалле дополнительных аппаратных средств поддержки тестирования БИС, поскольку они выполняют вспомогательные функции, причем только на этапе отбраковки микросхем. На этапе эксплуатации эти функции становятся излишними и при больших объемах производства вызывают неоправданную избыточность затрат. Минимизация вспомогательных средств обеспечения тестирования на кристалле увеличивает начальные затраты на разработку тестов. Однако при большом объеме выпуска изделий и сокращении стоимости их изготовления за счет уменьшения площади кристалла можно достигнуть положительного экономического эффекта. Разработка же программных средств, обеспечивающих автоматизацию подготовки тестов, снижает ее трудоемкость и существенно минимизирует полную себестоимость микросхем.

При разработке подсистемы тестирования микроконтроллеров были использованы следующие основные принципы:

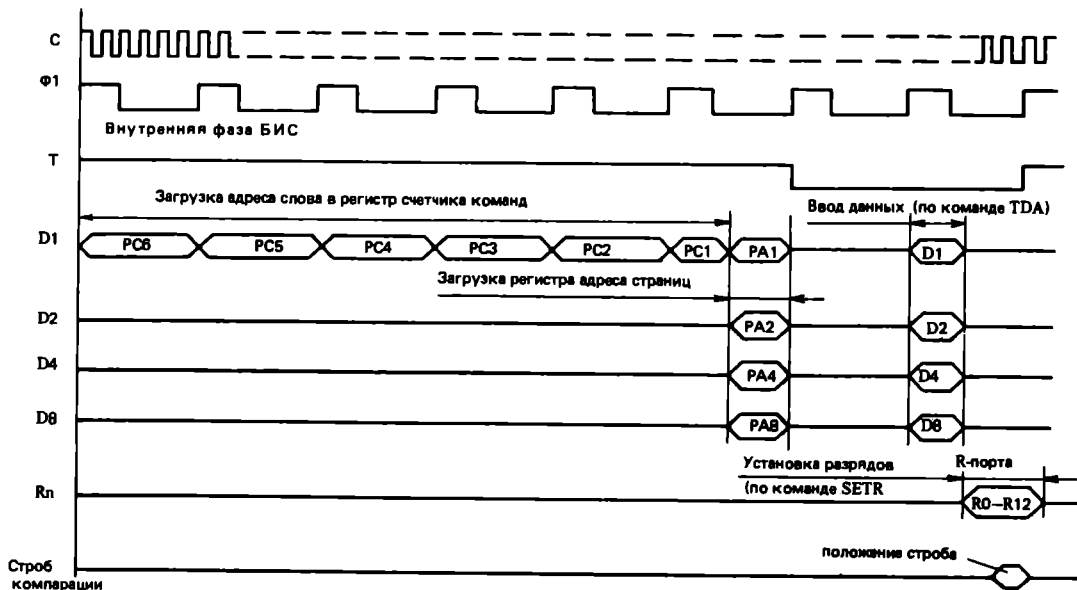
1. Выполнение тестирования процессора, ОЗУ и схем ввода/вывода выполняется программным путем командами микроконтроллера в рабочем режиме. Тестовый режим используется для задания последовательности команд, обеспечивающих проверку БИС, а также для выполнения функций контроля, которые не реализуются программным путем, а именно – проверки ПЗУ программы и счетчика команд.

2. Совмещение аппаратными средствами функций основного рабочего и тестового режимов. Например, использование D-порта для ввода данных в рабочем режиме и для ввода адреса команд в ПЗУ – в тестовом.

3. Совмещение аппаратными средствами нескольких функций тестового режима. Так, например, регистр счетчика команд используется как для ввода адреса команды в ПЗУ, так и для вывода кода команды на внешний вывод для контроля.

4. Построение аппаратных средств в расчете на совмещение функций. Так, счетчик команд построен нестандартно в виде сдвигающего регистра с обратными связями, что позволяет использовать регистр в тестовом режиме для последовательного ввода и вывода информации.

Перевод микроконтроллера в тестовый режим производится низким уровнем сигнала на входе "Т" (см. рисунок). При этом блокируется выполнение команд,



Типовая временная диаграмма адресации и выполнения команды в тестовом режиме

автоматически считываемых из ПЗУ на шину команд, и разрешается выполнение следующих операций:

1. Адрес слова ПЗУ программы может быть последовательно загружен в регистр счетчика команд через вывод *D1* БИС. Каждый бит вводится по фазе $\Phi 1$.

2. Адрес страницы ПЗУ может быть параллельно загружен в регистр адреса страницы через выходы *D1-D8*. Загрузка производится по фазе $\Phi 2$ в инверсном виде.

3. Слово команды под управлением вывода *D2* может быть параллельно считано с шины команд в расширенный до восьми разрядов регистр счетчика команд.

4. Содержимое сдвигающего регистра последовательно выводится на вывод *Q7*. Одновременно возможна последовательная загрузка в регистр нового адреса по *p.1*.

Функциональный контроль микроконтроллера производится путем ввода в тестовом режиме адресов команд и переключения в рабочий режим на время выполнения одной или нескольких последовательных команд. Типовая временная диаграмма цикла адресации и исполнения одной команды приведена на рисунке. Проверка ПЗУ программы осуществляется вводом адресов команд, считывания их в сдвигающий регистр и вывода с контролем на выводе *Q7*.

Так как разные модификации микроконтроллеров специального назначения различаются масочно-программируемыми ПЗУ программы и выходной ПЛМ *Q*-порта, то для каждого типа специализированного микроконтроллера необходимо формировать свои тестовые данные. Учитывая достаточно большое число элементов на кристалле и сложные временные диаграммы, при подготовке тестов необходимо использовать автоматизированные средства генерации тестов. Однако применение универсальных программ типа "Траис-Т" [2] в данном случае оказывается неэффективным, так как они не позволяют учитывать встроенные средства поддержки тестирования, а также относительно постоянную структуру БИС при различных ПЗУ и ПЛМ. В связи с этим был разработан пакет программ автоматизированной генерации тестов "Протон" специально для микроконтроллеров серии K1814. Пакет позволяет на основе файлов описания ПЗУ и ПЛМ в соответствии с унифицированными алгоритмами контроля формировать тестовые данные для контрольно-измерительного комплекса 14КВК ФИЦЭ-10-004.

При разработке унифицированных алгоритмов контроля использовались следующие принципы:

1. Модульность построения системы тестов, т.е. каждый частный тест направлен на проверку отдельного блока микроконтроллера.

2. Разделение тестов на две группы: контроль неизменяемых блоков и масочно-программируемых блоков БИС.

3. При контроле неизменяемых блоков:

– использование минимального подмножества команд (21 команда без ограничения на значения литералов в кодах команд; на пользователя наложено требование обязательного присутствия этих команд в ПЗУ программы);

– максимальное исключение из тестов команд с константами для задания начальных данных регистров в ОЗУ и использования для этого данных, вводимых через *D*-порт;

– использование для контроля промежуточных данных *R*-порта, как не связанного с изменяемой ПЛМ.

В состав пакета входят:

– программы предварительной подготовки данных,

формирующие таблицы, включающие адреса команд и подпрограмм, значения операндов, размеры групп последовательно-выполняемых команд и контрольную информацию;

– параметризованные описания типовых временных диаграмм (циклов) и описания тестов на расширенном языке ассемблера, допускающем указание информации на портах микроконтроллера и тип цикла;

– программа формирования тестовой макропоследовательности в соответствии с описаниями тестов на расширенном ассемблере и использованием справочных данных. Тестовая макропоследовательность представляет собой последовательность типовых параметризованных циклов с фактическими значениями параметров;

– специализированный макрогенератор, транспирующий формат макропоследовательности в дочный формат на входном языке измерителя. Программа универсальна и с успехом применяется при подготовке тестовых данных для других типов микропроцессорных БИС;

– программа генерации тестов контроля ПЗУ с оптимизацией использования памяти генератора произвольной последовательности измерителя.

Все исходные, промежуточные и результирующие данные представляются в текстовых форматах, что позволяет разработчику тестов на любом этапе контролировать или корректировать данные, а также оперативно строить новые тесты, например для проведения анализа. Пакет программ "Протон" реализован в ОС ПРОС на ПЭВМ "Электроника 85" и в ОС Рафос на мини-ЭВМ "Электроника 100-25", входящей в состав измерителя 14КВК ФИЦЭ-10-004, что также способствует оперативной коррекции и отладке тестов.

Процесс формирования теста можно проиллюстрировать примером, в котором выполняются следующие операции:

- ввод данных с *D*-порта в аккумулятор;
- пересылка аккумулятора – *Y*-регистр;
- установка разряда *R*-порта, адресуемого *Y*-регистром.

Описание теста на расширенном ассемблере включает mnemonic обозначения команд (КОП), значения данных, вводимых через *D*-порт, контрольные значения на выходах *R*-и *Q*-портов, выводе *Q7* и имеет вид:

КОП	D-порт	R-порт	Q-порт	Q7	Тип цикла
TDA	7	-	-	-	1
TAY	-	-	-	-	1
SETR	-	7	-	-	1

Адресация и исполнение каждой команды производится в соответствии с временной диаграммой (см. рисунок). Параметризованное описание этой диаграммы имеет вид:

```

REM TEST
PATTERN 144
P 26 (144:0)
P 11 (36:1) (12:0) (36:1) (12:0) (36:1) (12:0)
P 7 (18:1) (12:0) (6:1) (6:0) 111 (9:0) (18:1) (6:1) 111 (21:0)
(30:1) (12:0)
P 8 (42:0) 111 (84:0) 111 (12:0)
P 9 (42:0) 111 (84:0) 111 (12:0)
P 10 (33:0) 111 (45:0) 111 (60:0)
P 29 (144:0)
P 30 (144:0)
P 31 (144:0)
P 36 (144:0)

```

P 37 (144:0)
 P 38 (144:0)
 P 39 (144:0)
 P 40 (141:0) (3:1)
 P 1 (144:0)
 P 2 (144:0)
 P 3 (144:0)
 P 4 (144:0)
 P 5 (144:0)
 P 52 (143:0)
 END

Номера выводов Pn измерителя соответствуют номерам выводов БИС в корпусе, P 52 – строб компарации.

Шестнадцатиразрядные формальные параметры с именами А – Н используются для описания изменяющейся информации. В соответствии формальным параметрам поставлены следующие переменные:

A [0..5] – значения счетчика команд (PC);
 B [0..3] – значения регистра адреса страниц (PA);
 C [0..3] – значения данных вводимых через D-порт;
 D [0..12] – значения на выходах R-порта;
 G [0] – установка строба компарации.

При формировании справочных таблиц для каждой команды вычисляется ее адрес в ПЗУ: значения счетчика команд (PC) и регистра адреса страниц (PA). Для данного примера примем следующие десятичные значения адресов:

TDA – PC=57 PA=6 (PA=9)

TAY – PC=29 PA=7 (PA=8)

SETR – PC=31 PA=8 (PA=7)

В результате работы программы формирования тестовой макропоследовательности описание теста преобразуется к следующему виду:

```
*REM TEST
*PATTERN 144
;PC,PA,D, R,  --,--строб
;A, B, C, D,  E,F,G, H, /тип цикла
D57,D9,D7,D0  ,--,,D0,-,/SIKL1.IZM
D28,D8,D0,D0  ,--,,D0,-,/SIKL1.IZM
D31,D7,D0,D128,-,--,,D0,-,/SIKL1.IZM
END
```

*текст выводится в выходной файл; ; комментарий;
 D префикс десятичной системы счисления; – "пустое" значение параметра; /SIKL1.IZM имя файла описания параметризованной временной диаграммы

Программа макрогенератор формирует тест в формате измерителя 14КВК ФИЦЕ-10-004:

P 26 (48:1)
 P 11 (36:1) (12:0)
 P 7 (6:AC[5]) (6:AC[4]) (6:AC[3]) (6:AC[2]) (6:AC[1]) (3:AC[0]) (3:AC[0]) (6:0) (3:AC[0]) (3:0)
 P 8 (33:0) (3:AC[1]) (6:0) (3:AC[1]) (3:0)
 P 9 (33:0) (3:AC[2]) (6:0) (3:AC[2]) (3:0)
 P 10 (33:0) (3:AC[3]) (6:0) (3:AC[3]) (3:0)
 P 29 (45:0) (3:DC[0])
 P 30 (45:0) (3:DC[1])
 P 31 (45:0) (3:DC[2])
 P 36 (45:0) (3:DC[3])
 P 37 (45:0) (3:DC[4])
 P 38 (45:0) (3:DC[5])
 P 39 (45:0) (3:DC[6])
 P 40 (45:0) (3:DC[7])
 P 1 (45:0) (3:DC[8])
 P 2 (45:0) (3:DC[9])
 P 3 (45:0) (3:DC[10])
 P 4 (45:0) (3:DC[11])
 P 5 (45:0) (3:DC[12])
 P 52 (47:0) 0[0]

Примечание. Номера выводов Pn измерителя соответствуют номерам выводов БИС в корпусе, P52 – строб компарации.

Микроконтроллеры серии K1814 разработаны с учетом минимизации на кристалле аппаратных средств поддержки тестирования, что снизило затраты на изготовление кристаллов, но усложнило разработку тестов. Разработанный пакет программ автоматизированной генерации тестов "Протон" позволяет существенно снизить затраты на проектирование тестовых данных для измерительного комплекса 14КВК ФИЦЕ-10-004. Пакет применялся при проектировании тестов для микроконтроллеров типа КП1814ВЕ4 – КР1814ВЕ9. Трудоемкость разработки и отладки тестовой последовательности с применением пакета программ составляет 2–3 рабочие смены, в результате формируется тестовая последовательность длиной 42–44 тысячи векторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Однокристалльные 4-разрядные микро-ЭВМ серии K1814 / В.Н.Златопольский, И.Е.Лобов, А.И.Стойнов, И.А.Шадрин. — Микропроцессорные средства и системы, 1985, № 1, с. 3–10.
2. Пакет программ «ПРАЦИС-Т», регистрационный номер 589.7545471.75701-01.

Дополнительную информацию по материалу, изложенному в статье, можно получить в ПО «Электроника» по адресу: 394007, г.Воронеж, Ленинский просп, 119а. Тел. 22-95-64.

Петров В.С., Прокопьев Е.П., Соколов Е.М.
 Анализ математических моделей скорости роста аморфных пленок a:Si:H в силиановых плазменных смесях пониженного давления и синергетические эффекты в проблеме окисления кремния. — Рукопись деп. в ЦНИИ "Электроника", 1993, №P-5476.

В рамках гидродинамической теории течения газовой смеси вблизи критической точки и теории пограничного слоя в диодной ячейке реактора предложены одномерные модели роста пленок a-Si:H на различных подложках в условиях ВЧ тлеющего разряда в силиановых плазменных смесях пониженного давления. Принято, что рост пленок обусловлен массопереносом SiH₂ и SiH₃ радикалов. Получены и проанализированы аналитические выражения зависимостей скорости роста V_p от основных параметров процесса X и геометрических параметров K диодной ячейки реактора, удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными значениями V_p(X) и V_p(K). Обсуждаются возможности синергетического подхода к окислению кремния, согласно которому толщина слоя окисла SiO₂ претерпевает неравновесный фазовый переход второго рода в зависимости от параметров внешней среды.

УДК 539.234.25:546.28:533.72

ДЕПОНИРОВАНИЕ

Контроль качества микросеток в процессе производства

В.А.АВТОНОМОВ, Ю.Ф.ЛУКОВ, Б.И.СЕДУНОВ,
В.В.УЗДОВСКИЙ, Н.В.УЗДОВСКАЯ

Для контроля параметров и обнаружения дефектов микросеток в метизном производстве сотрудниками МИЭТа на основе полупроводниковых многоэлементных фотоприемников разработаны устройства на ПЗС, сопряженные с персональной ЭВМ типа IBM PC. Применение таких устройств позволяет контролировать качество микросеток в процессе производства на всех станках металлотацкого цеха без их остановки.

При изготовлении микросеток на металлотацких станках необходимо контролировать ряд параметров и определять наличие дефектов микросеток. Контролируют следующие параметры: периоды нитей по утку и основе, неоднородности указанных периодов, средняя толщина нитей, неоднородности толщины нитей.

Дефекты полотна микросетки включают: слипание нитей (2 нити в зуб), пропуск нити, наличие петель (галочек).

С развитием полупроводниковой электроники появилась возможность создать многоэлементные фотоприемники, обладающие высокими метрологическими качествами и хорошо сопрягаемые с ЭВМ. На базе приборов с зарядовой связью (ПЗС) разработаны датчики и устройства ввода информации в ЭВМ [1, 2]. Однако применение ПЗС для контроля качества микросеток приводит к сокращению избыточности информации, вводимой в ЭВМ. Устранить этот недостаток позволяет регулярное расположение нитей под прямым углом друг к другу.

Измерение параметров сеток в одном из направлений требует усреднения сигналов в перпендикулярном направлении, чтобы избавиться от паразитного эффекта модуляции сигналов перпендикулярными нитями [3–5]. Это усреднение можно провести вводом цилиндрической [5] линзы в оптическую систему и суммированием сигналов по строкам или столбцам матрицы ПЗС [2, 5].

Усреднение сигналов сводит двумерный массив к одномерному, облегчая последующую обработку информации.

Устройство контроля качества микросеток состоит из оптической системы с опорным приспособлением, устанавливаемым непосредственно на контролируемый участок микросетки матричного многоэлементного фотоприемника, осветителя, генератора тактовых импульсов и микропроцессорного устройства обработки видеосигнала. Матричный многоэлементный фотоприемник содержит фоточувствительную часть, выходной регистр и выходной усилитель.

Рассмотрим схему измерения параметров микросеток с использованием ПЗС. С одной стороны от микросетки расположен протяженный источник света типа лампы дневного света, устанавливаемой в металлотацких станках для визуального контроля качества сетки. С другой – оптическая система, проецирующая изображение нитей на матричный или линейный ПЗС. При использовании линейного ПЗС в оптическую систему вводят цилиндрическую линзу, образующая цилиндра которой параллельна линейке ПЗС. Для контроля продольных и поперечных нитей линейку ПЗС следует поворачивать на 90°. Использование матрицы ПЗС позволяет отказаться от цилиндрической линзы и от поворота прибора в процессе измерений.

Оптическую систему выбирают так, чтобы изображение нити накрывало не менее пяти элементов ПЗС вдоль направления, перпендикулярного нити. Однако с увеличением размера изображения нити уменьшается ширина захвата контролируемой части полотна микросетки, поэтому наиболее оптимальным решением является смена или перестройка оптической системы при изменении типа контролируемой сетки.

Время экспозиции ПЗС выбирают так, чтобы максимальный сигнал был близок к верхнему пределу линейного диапазона светосигнальной характеристики. При этом достигается максимальное отношение сигнала к шуму и отсутствие нелинейных искажений сигнала.

Типичное значение верхнего предела линейности для ПЗС составляет 1 мДж/м², поэтому в зависимости от мощности осветителя и светосилы объекта выбирают время экспозиции, соответствующее указанной величине экспозиции в освещенных участках изображения.

Генератор тактовых импульсов, используемый для опроса матрицы ПЗС, имеет два режима работы. В пер-

вом суммируются заряды нескольких строк в выходном регистре матрицы и только после этого считываются сигналы выходного регистра. Во втором — регистр опрашивается после переноса в него зарядов каждой строки, но в выходном усилителе суммируются сигналы от нескольких элементов регистра.

Предложенный способ реализован в устройстве контроля, содержащем матричный многоэлементный фотоприемник типа К1200ЦМ1, оптическую систему с коэффициентом трансформации от 3:1 до 1:3, генератор тактовых импульсов, работающий в двух режимах.

В первом режиме при считывании накопленных сигналов из фоточувствительной части матрицы переносят 16 строк матрицы в выходной регистр при неизменных потенциалах фаз выходного регистра, после чего считывают содержимое выходного регистра с тактовой частотой 1 МГц. Амплитудно-модулированные импульсы с амплитудой до 0,5 В поступают из выходного усилителя матрицы в микропроцессорное устройство обработки, содержащее аналого-цифровой преобразователь, интерфейс связи с ЭВМ и персональную ЭВМ типа IBM PC.

Во втором режиме переносят содержимое очередной строки матрицы в выходной регистр и затем считывают содержимое выходного регистра с тактовой частотой 1 МГц, причем опрос выходного усилителя производят через каждые 16 мкс, что обеспечивает накопление сигналов от 16 элементов выходного регистра. Далее сигнал через упомянутый аналого-цифровой преобразователь и интерфейс связи поступает в персональную ЭВМ типа IBM PC.

С помощью IBM PC осуществляют адаптивное компарирование сигнала на уровне половины размаха модуляции импульсов. Адаптивность компарирования предназначена для компенсации неравномерности освещения контролируемого участка и коэффициента передачи оптической системы по полю зрения. После компарирования определяют величину периодов модуляции импульсов, соответствующую отдельным нитям.

Непосредственная установка устройства контроля на контролируемый участок микросетки позволила уменьшить погрешность измерения периода не менее чем на порядок, что достигнуто в результате устранения вибраций сетки относительно устройства контроля.

Введение режимов суммирования строк и столбцов по сравнению с обычным режимом поэлементного опроса матрицы привело к устранению паразитных модуляций сигнала нитями, перпендикулярными контролируемыми.

Контроль за ориентацией матрицы относительно нитей микросетки осуществлялся по величине максимального размаха модуляции импульсов, которая определялась с помощью персональной ЭВМ. Допустимый угол отклонения от оптимальной ориентации составлял $\pm 5^\circ$.

Средний период продольных и поперечных нитей определялся следующим образом. Последовательности переменных сигналов, соответствующие изображению продольных и поперечных нитей микросетки, преобразовались в импульсный сигнал путем компарирования средней величины переменных сигналов с заданным опорным сигналом, затем сравнивали импульсный сигнал различной длительности, соответствующий различным дефектам качества микросетки, с импульсным сигналом, определяемым эталонным или средним периодом микросетки. Средний или эталонный период

соответствовал бездефектной структуре контролируемой микросетки. По отклонению среднего периода микросетки от текущего делались выводы о качестве микросеток. С помощью предложенного способа удалось обнаружить такие дефекты, как рассека, пропуск нити, галочка, а также другие с достаточной точностью, которая более чем на порядок превышала характерные линейные размеры микросеток.

Устройство испытано на металлорежущих станках типа СР-100 и позволило проводить измерения без остановки станка при изготовлении сеток с толщиной нити от 22 до 400 мкм. С помощью одного устройства, сопряженного с ЭВМ типа IBM PC, оказалось возможным контролировать по очереди работу всех станков цеха, перевоза устройство на специальной тележке от станка к станку. Ошибка при измерении периода нитей не превышала 1%.

Устройство использовали и для контроля готовой продукции, снятой со станка. При этих измерениях принимались меры по устранению деформации микросетки, влияющей на точность измерения.

Для контроля качества микросетки по всей ширине полотна разработано приспособление, позволяющее с помощью шагового двигателя перемещать измерительное устройство поперек полотна микросетки с накоплением информации в памяти ЭВМ от всех кадров по ширине полотна.

Проведенные исследования позволяют вести дальнейшую разработку по двум направлениям:

- портативный прибор для выборочного контроля параметров микросеток на различных станках в процессе их работы и для контроля готовой продукции;
- прибор, установленный на станке, позволяющий контролировать параметры микросетки в процессе ее изготовления по всей ширине полотна и сигнализировать об отклонениях от технических требований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Секен К., Томпсет М. Приборы с переносом заряда. — М.: Мир, 1978, 350 с.
2. Йесперс П., Ван де Виле Ф., Уайт М. Полупроводниковые формирователи сигналов изображения. — М.: Мир, 1979, 573 с.
3. А.с. № 1679307 (СССР). В.А.Автономов, Н.Ф.Глушченко, Ю.Ф.Луков, Б.И.Седунов, В.В.Уздовский, Н.В.Уздовская. — Оpubл. в Б.И., 1992, № 35.
4. А.с. № 1679219 (СССР). В.А.Автономов, Н.Ф.Глушченко, Ю.Ф.Луков, Б.И.Седунов, В.В.Уздовский, Н.В.Уздовская. — Оpubл. в Б.И., 1992, № 35.
5. А.с. № (СССР). В.А.Автономов, Ю.Ф.Луков, Б.И.Седунов, В.В.Уздовский, Н.В.Уздовская, Б.С.Чижов — Оpubл. в Б.И., 1992, № 39.

Дополнительную информацию по вопросам, содержащимся в статье, можно получить по телефону в Москве: 532-98-58.

Контроль давления в электровакуумных приборах неразрушающим способом

М.Ю.СОКОЛОВ, Ю.Г.МЫЧКОВСКИЙ

Для повышения надежности работы электровакуумных приборов необходимо совершенствование методов контроля их герметичности. Такой метод, основанный на зависимости параметров импульсного газового разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях, разработан специалистами НПО "ТермоВак". Достоинство метода — возможность использования для широкого класса электровакуумных приборов, так как для зажигания импульсного разряда используются внутренние и дополнительные или только дополнительные электроды.

Одним из направлений повышения надежности работы электровакуумных приборов является разработка и совершенствование способов контроля их герметичности, в частности, методов неразрушающего контроля давления.

В настоящее время известно несколько таких методов, однако все они имеют ограниченную область применения из-за жесткой взаимосвязи между возможностью измерения давления и конструкцией исследуемого прибора. Например, один из методов [1] основан на эффекте накопления ионов в межэлектродном промежутке вакуумного диода при протекании тока высокой частоты. Использование же его в электровакуумных приборах другой конструкции затруднено.

Для измерения давления в вакуумных системах широкое распространение получил метод с использованием параметров самостоятельного газового разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях [2]. Однако его применение для контроля давления неразрушающим способом возможно только в электровакуумных приборах, конструкция которых подобна конструкции магнитных преобразователей: ячеек Пеннинга, магнетронной или инверсно-магнитной систем.

В названных методах контроль давления осуществляется с использованием электродов, являющихся составной частью конструкции электровакуумных приборов, что и предопределяет ограниченность области применения. Очевидно, что для решения области применения необходима разработка такого способа, реализация которого не была бы жестко связана с конструкцией электровакуумного прибора. Для этого метода возможно, например, использовать внешние электроды, не связанные конструктивно с исследуемым прибором. Но при этом между анодом и катодом будет находиться диэлектрическая оболочка электровакуумного прибора, что не позволит осуществлять измерения по приведенной выше схеме [2], так как электрическая цепь в этом случае будет разомкнута не только вакуумным промежутком, но и диэлектриком.

Отмеченное препятствие можно устранить, если использовать импульсный газовый разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях. В этом случае давление можно измерять по параметрам импульсного газового разряда: значению тока, длительности горения или интенсивности свечения разряда.

Проиллюстрируем вышесказанное на примере наиболее часто встречающегося электровакуумного прибора двухэлектродной конструкции, представляющего собой стеклянный цилиндр (диаметр 26 мм, высота 40 мм), закрытый с торцов металлическими дисками. Он помещается в дополнительный цилиндрический электрод (ДЭ), являющийся анодом (рис.1), (катодом служат металлические диски прибора). Вокруг прибора создано магнитное поле, составляющее примерно 0,1 Тл, вектор индукции которого направлен вдоль оси стеклянного цилиндра. В момент подачи на анод положительного напряжения 2–10 кВ с достаточно крутым фронтом внутри прибора создаются условия для зажигания импульсного газового разряда. При прочих равных условиях момент зажигания разряда зависит от длительности нарастания электрического поля. Для обеспечения воспроизводимости результатов измерений момент зажигания разряда должен наступить после выхода

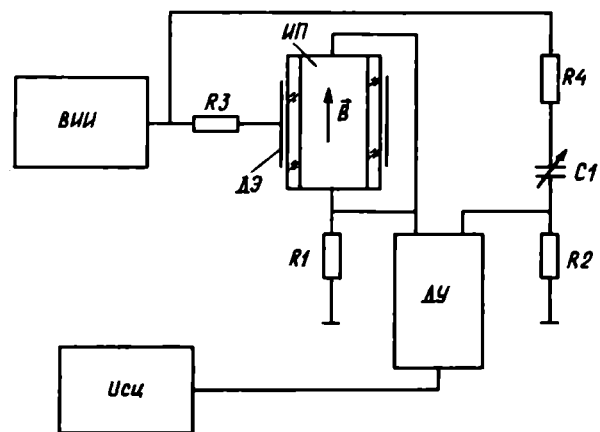


Рис. 1. Электрическая схема измерения прибора: ВВИ — высоковольтный импульсный источник, ИП — исследуемый прибор, ДЭ — дополнительный электрод, ДУ — усилитель дифференциальный, Осц — осциллограф

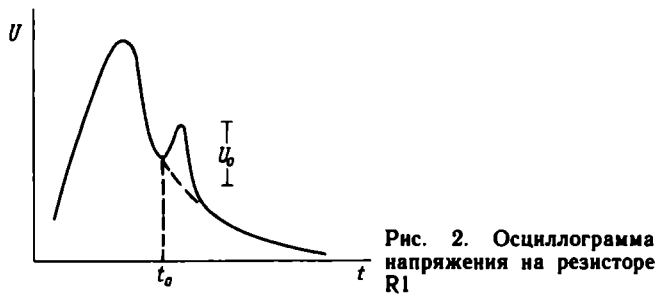


Рис. 2. Осциллограмма напряжения на резисторе R1

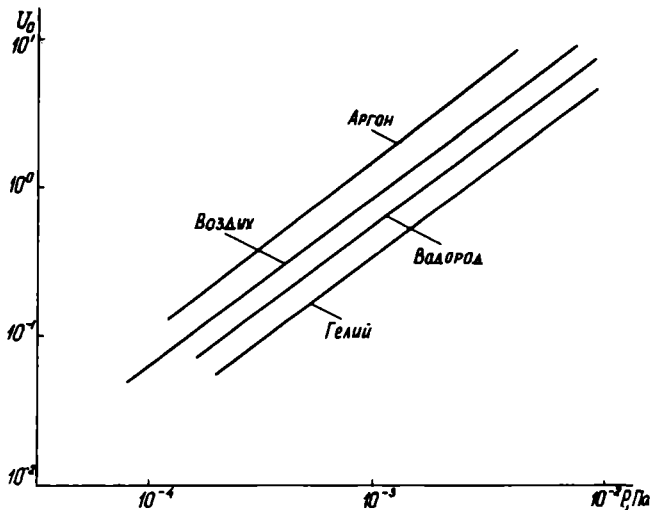


Рис. 3. Зависимость напряжения от давления в исследуемом приборе для различных газов

напряжения на номинальное значение. В описанном примере это условие достигается, когда скорость нарастания напряжения составляет 2 кВ/мс. Длительность импульса высокого напряжения — 30 мс.

По мере горения разряда на внутренней поверхности стеклянного цилиндра создается отрицательный поверхностный заряд, который компенсирует внешнее электрическое поле, что в свою очередь, приводит к погасанию разряда.

Из электрической схемы измерений (см.рис.1) видно, что ток импульсного газового разряда измерялся на резисторе R1 по осциллограмме напряжения (рис.2). До момента зажигания разряда (t_0) ток, протекающий через резистор R1, определяется током зарядки емкости, образованной дополнительным электродом и дисковыми катодами. При $t > t_0$ ток представляет собой сумму двух токов: тока зарядки емкости и тока импульсного газового разряда. Для выделения тока импульсного газового разряда использована компенсационная схема с компенсирующим элементом, состоящим из резисторов R2, R4 и конденсатора C1.

Данные измерения давления в исследуемом приборе для различных газов: аргона, воздуха, водорода и гелия представлены на рис.3. ($R3 = R4 = 3,9$ Мом, $R1 = R2 = 1,45$ Ком, коэффициент усиления усилителя

около 660, амплитуда импульсного высоковольтного напряжения примерно 8 кВ). В процессе измерений было установлено, что линейная зависимость тока импульсного газового разряда от давления сохраняется до давления 1 Па.

Для обеспечения надежного зажигания импульсного газового разряда во всем исследуемом диапазоне давлений использовался радиоактивный источник, излучение от которого направлялось на исследуемый прибор.

Таким образом, для измерения давления в электровакуумных приборах неразрушающим методом можно использовать импульсный газовый разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях, причем одно из полей, электрическое или магнитное, должно быть импульсным.

Для зажигания импульсного газового разряда применяют электроды, содержащиеся в исследуемом приборе, и дополнительные электроды или только дополнительные электроды. Следовательно, использование импульсного разряда позволяет контролировать давление также в приборах, не содержащих электродов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ошихин А.С., Базылев В.К., Коротченко В.А. Высокочастотный компенсационный способ измерения давления в вакуумных диодах. — Электронная техника. Сер.8, 1980, вып. 5.
2. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. — М.: Высшая школа, 1982.

По интересующим вопросам обращайтесь по адресу
109052, Москва, ул. Нижегородская, 29.
НПО «ТермоВаку», А/О ВНИИЭТО.

Олеськив Б.С. Удаление адсорбированной влаги с поверхности кристалла. — Рукопись деп. в ЦНИИ "Электроника", 1993, №Р-5474.

Рассматриваются аспекты применения электромагнитного излучения для разрыва связей адсорбированных молекул агрессивных функциональных групп на поверхности кристалла.

УДК 661.384.3

ДЕПОНИРОВАНИЕ

Тонкопленочные резисторы

Р.Б.БЕНДЕРЕ, Г.П.ЕЛФИМОВА, Я.В.КАЛНАЧ, К.К.ОЗОЛОС

В Латвии, на предприятии "Альфа" на основе нового резистивного материала — сплава марки РС6012 разработаны тонкопленочные резисторы, которые удовлетворяют повышенным требованиям, предъявляемым к новым сериям преобразователей информации.

Характеристики преобразователей информации в значительной степени определяются параметрами прецизионных резисторных матриц, состоящих из тонкопленочных резисторов (ТПР). Разработка новых серий преобразователей информации предъявляет к параметрам ТПР повышенные требования, что приводит к необходимости использовать для создания ТПР новые резисторные материалы, в частности сплав РС6012.

Резисторные пленки на окисленную кремниевую подложку наносят ионно-плазменным распылением мишени сплава в среде аргона при температуре 250°C. В качестве контактов используют пленку алюминия толщиной примерно 1 мкм, нанесенную магнетронным методом. Формирование рисунка контактов и резисторов осуществляют фотохимической гравировкой с использованием химического и ионно-химического травления соответственно. Изотермический отжиг ТПР проводят в среде азота при температурах 450—550°C с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$ в течение 30 мин.

Значение температурного коэффициента сопротивления (ТКС) резисторов определяют в интервале температур -60 — $+125^\circ\text{C}$ с точностью $\pm 5\%$. Значение удельного поверхностного сопротивления (ρ_{SH}) резистивных пленок измеряют четырехзондовым методом. Толщину резистивных пленок (h) определяют эллипсометрическим методом на фотоэлектрическом лазерном эллипсометре ЛЭФ-2 при длине волны $\lambda = 632,8$ нм [1]. Качественный состав поверхности пленок исследуют методом оже-спектроскопии на исследовательском комплексе [2].

Оже-спектроскопические исследования показали, что резисторные пленки толщиной около 40 нм после нанесения покрыты поверхностным слоем толщиной 3—5 нм, содержащим кроме составляющих (Co, Si и Cr) еще углерод и кислород. При этом кислород не связан с хромом или кобальтом, а в основном находится в соединении Si_xO_y . В нижележащих слоях количество кислорода снижается примерно в 5 раз, однако

остается на уровне 5%. Элементный состав пленки примерно соответствует заданному: Si — 30, Co — 60 и Cr — 10 мас. %.

Эллипсометрические измерения на пленках сплава РС6012 выявили постоянные преломления ($n = 2,96$) и поглощения ($k = 2,36$), используемые для определения толщины пленок. После отжига в среде азота при 510°C в течение 30 мин эти постоянные уменьшаются на 26 и 4,2% соответственно. Зависимость $\lg \rho_{SH} = f(\lg h)$ имеет линейный характер, а $\lg \rho_{VH} = f(\lg h)$ еще не достигает стадии насыщения (рис.1). Это указывает, что процесс образования сплошной пленки не закончен.

Зависимости относительного изменения удельного поверхностного сопротивления резистивных пленок и значения ТКС (в интервале температур 20—125°C) тонкопленочных резисторов, отожженных при разных температурах, от удельного поверхностного сопротивления после нанесения приведены на рисунках 2 и 3. На кривых этих рисунков можно выделить две области: 1) $\rho_{SH} < 0,6$ кОм/квadrat, в которой параметры пленок изменяются незначительно, и 2) $\rho_{SH} > 0,6$ кОм/квadrat, в которой наблюдается сложная зависимость параметров. Различие в

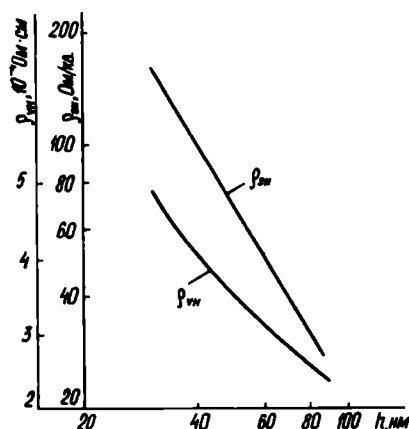


Рис.1. Зависимость удельного поверхностного и объемного сопротивлений резистивных пленок после нанесения от толщины

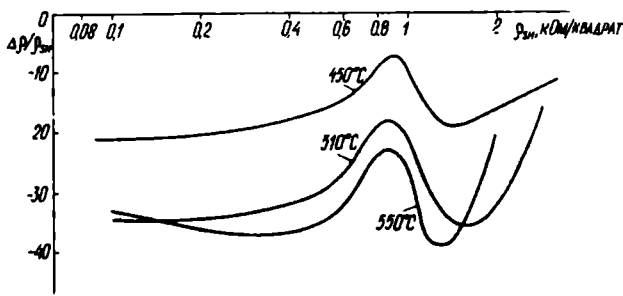


Рис. 2. Зависимость относительного изменения удельного поверхностного сопротивления резистивных пленок, отожженных при разных температурах от удельного поверхностного сопротивления после нанесения

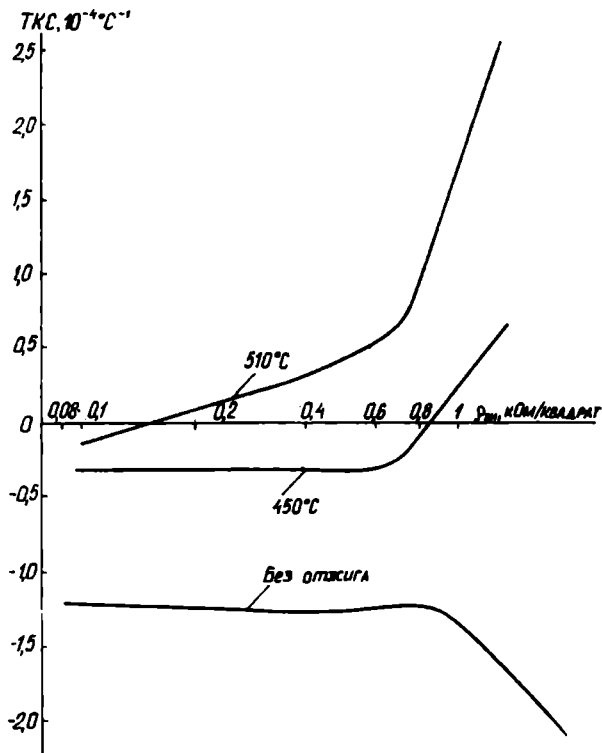


Рис. 3. Зависимость ТКС тонкопленочных резисторов, отожженных при разных температурах, от удельного поверхностного сопротивления после нанесения

зависимостях в этих областях можно объяснить различием в структурах и в процессах, протекающих при отжиге пленок, и, как следствие, в механизмах прохождения носителей заряда.

С повышением температуры отжига ($T_{отж.}$) значение ТКС возрастает, причем его наибольшее изменение наблюдается у пленок во второй области (см. рис.3). В интервале температур $-60 \div +20^\circ\text{C}$ характер хода зависимостей аналогичен показанному на рис.3. Однако значения ТКС более положительные при $(0,3-0,5) \cdot 10^{-4} \text{C}^{-1}$, чем в интервале $(1,25-2,0) \cdot 10^{-4} \text{C}^{-1}$. Это указы-

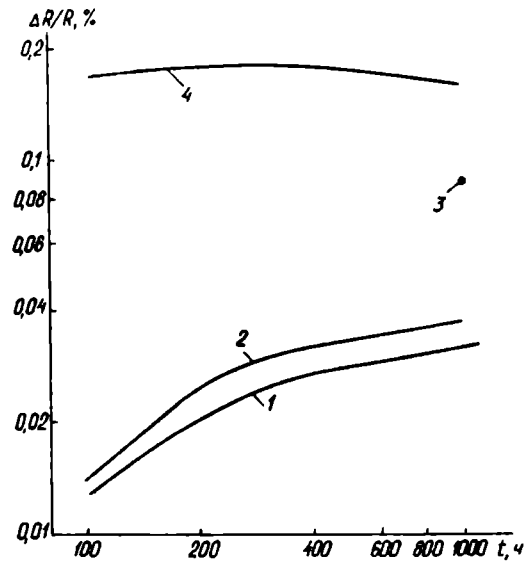


Рис. 4. Зависимость нестабильности тонкопленочных резисторов с разным значением ρ_{SH} от времени испытаний: 1 — без нагрузки, $\rho_{SH} \approx 0,1 \text{ k}\Omega/\text{cm}^2$; 2 — нагрузка $115 \text{ Вт}/\text{см}^2$, $\rho_{SH} \approx 1 \text{ k}\Omega/\text{cm}^2$; 3 — без нагрузки; 4 — нагрузка 30 Вт

вает на нелинейность температурной зависимости сопротивления и различие в механизмах проводимости в разных интервалах температур.

При $T_{отж.} > 550^\circ\text{C}$ значение $\Delta q/q_{SH}$ уменьшается по абсолютной величине с последующим переходом на положительные значения. Это объясняется увеличением расстояния между кристаллитами в результате роста размеров кристаллитов или их окисления, о чем свидетельствуют оже-спектроскопические исследования.

Изменения сопротивления пленок и значения ТКС резисторов преимущественно происходят в первые 10 мин отжига. Это свидетельствует о том, что основные процессы структурообразования в пленках уже завершились. При продолжении отжига появляются отличия в поведении параметров пленок для каждой области величин ρ_{SH} . В первой области заметные последующие изменения параметров начинаются через 60 мин отжига. Во второй — характер изменений параметров существенно зависит от температуры отжига и значения ρ_{SH} . Если после $T_{отж.} = 400^\circ\text{C}$ в течение 180 мин изменение параметров пленок с $\rho_{SH} = 1$ и $2 \text{ k}\Omega/\text{cm}^2$ незначительно, то при $T_{отж.} = 510^\circ\text{C}$ изменение параметров продолжается в течение всего времени отжига (до 240 мин), причем наиболее резкие изменения происходят у весьма тонких пленок, т.е. с $\rho_{SH} = 2 \text{ k}\Omega/\text{cm}^2$. Так как в обеих областях величин ρ_{SH} с увеличением времени отжига у пленок наблюдается уменьшение сопротивления, то можно предположить, что продолжается процесс кристаллизации с привлечением дополнительного количества кристаллитов в электроперенос.

Результаты испытаний при температуре 125°C приведены на рис.4. Меньшей нестабильностью обладают ТПР с $\rho_{SH} \approx 0,1 \text{ k}\Omega/\text{cm}^2$, что

обусловлено их большей толщиной ($h \approx 40$ нм) по сравнению с ТПР, имеющим $\rho_{sh} \approx 1$ кОм/квadrat ($h \approx 5$ нм), причем нестабильность ТПР возрастает, если приложить электрическую нагрузку. Это указывает на чувствительность нестабильности резисторов к температуре, так как их температура повышается в результате выделения джоулева тепла.

Следовательно, ТПР на основе сплава РС6012 обладают малым значением ТКС ($< \pm 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) и значением временной нестабильности сопротивления ($< 0,04\%$), соответствующим требованиям, предъявляемым к прецизионным резисторным матрицам быстродействующих преобразо-

вателей информации, в которых эти резисторы были использованы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ ионно-химического травления полупроводниковых структур с резисторными пленками методом эллипсометрии / Р.Б.Бендере, Я.Ф.Ермолаев, Р.П.Калныня и др. — Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1989, вып. 3, с. 45—48.

2. Сверхвысоковакуумная установка для комплексного изучения поверхностей и сверхтонких пленок твердого тела / А.Б.Бергс, Я.В.Калнач, Л.В.Квасков, И.А.Фелтынь. — Изв. АН Латв. ССР. Сер. физ. и техн. наук, 1981, № 4, с. 122—125.

Акционерное общество «Альфа»
226037, г.Рига, ул.Бривибас, 372.

Датчики измерения тока

О.А.БОЛОТИН, Г.Я.ПОРТНОЙ, А.В.РОЖНОВ

В филиале ВНИИэлектромеханики разработаны и освоены различные миниатюрные типы датчиков измерения тока (ДИТ), используемые в различных областях. ДИТ предназначены для измерения постоянных, переменных и импульсных токов без разрыва цепи. Гальваническая развязка их входных и выходных цепей достигается использованием в конструкции специального полупроводникового датчика Холла, который измеряет магнитную индукцию, создаваемую протекающим током.

Датчики предназначены для комплектации инверторов, тиристорных преобразователей, выпрямителей

и могут быть использованы в системах управления электродвигателями, контурах регулирования устройств автоматики или следящих систем. Их основные достоинства:

- гальваническая развязка между первичной и измерительной цепями;
- компенсация температурного дрейфа нулевого паразитного сигнала;
- защита измерительной цепи от возможных перегрузок в ней;
- минимальные энергопотребление, габариты и масса.

Характеристика	ДИТ-50	ДИТ-100	ДИТ-150	ДИТ-750	ДИТ-80
Диапазон измеряемых токов, А	0—50	0—100	0—200	0—750	0—80
Диапазон рабочих температур, $^\circ\text{C}$	—50—80	—50—80	—50—80	—50—80	—10—70
Время задержки выходного сигнала, мкс	1	1	1	1	—
Скорость нарастания выходного сигнала, А/мкс	50	50	50	50	500
Погрешность измерения, не более, %	1	1	1	1	5
Потребляемая мощность, Вт	1,5	1,5	2	4	0,5
Диапазон воспроизводимых частот, кГц	0—50	0—50	0—50	0—50	0—20
Входное сопротивление схемы обработки, не менее, кОм	20	20	20	5	5
Выходное напряжение датчика, В	1	1	2	7,5	3
Габаритные размеры, мм	50x55x73	57x65x75	54x72x95	68x90x101	41x20x20
Размеры отверстия под токовую шину, мм	5x14	$\varnothing 8$	12x18	$\varnothing 20$	$\varnothing 6$
Масса, г	70	70	130	300	15

Филиал Всесоюзного научно-исследовательского института электромеханики (ФВНИИЭМ),
Московская обл., г. Истра

Применение ионно-лучевой технологии в медицине

П. СИОШАНСИ

На протяжении последних нескольких лет применение ионных пучков для обработки поверхности медицинских протезов все сильнее привлекает внимание специалистов. Существует несколько методов, основанных на применении ионных пучков:

— ионная имплантация проводится с целью повышения прочности и износостойкости нового поколения титановых сплавов, а также для уменьшения износа сочленяемых полиэтиленовых деталей, используемых в универсальных ортопедических суставных протезах. Фирма Spire успешно внедряет технологию ионной имплантации и ежегодно обрабатывает несколько тысяч искусственных коленных чашек и тазобедренных суставов (техника фирмы Spire получила торговую марку IONGUARD, "ионная защита");

— доказана высокая эффективность ионной имплантации и с точки зрения повышения коррозионной стойкости сплавов на основе кобальта-хрома, традиционно используемых в ортопедических протезах. Эта область применения представляет особый интерес, поскольку в этом случае могут быть решены проблемы, связанные с выделением ионов, присущих таким сплавам;

— ионное травление (фрезерование используется для получения сильно текстурированной поверхности для прорастания тканей в различные приспособления, от пористых ортопедических имплантатов и вводимых через кожу средств до искусственной ткани, технология должна оказать большое влияние на эту область применения;

— появились сведения о пригодности технологии ионной имплантации для решения задачи улучшения биосовместимости и фиксации ткани к металлическим деталям. Эта проблема заслуживает особого внимания в будущем.

В последние несколько лет значительное внимание уделялось применению ионной имплантации для селективного изменения поверхностных свойств материалов. Этот метод опробовался в различных промышленных сферах, в частности ионная имплантация "пробыла нишу" и в области технологии биоматериалов, а также промышленной обработки медицинских приспособлений. Эта технология с успехом применяется при обработке протезов благодаря следующим характерным особенностям:

— ионная имплантация не приводит к изменению размеров материала и может быть использована для обработки готовых изделий;

— имплантация проводится при низкой температуре и поэтому не наблюдается ухудшения усталостной прочности приспособлений;

— процесс не приводит к изменению внешнего вида, цвета или морфологии поверхности устройств. Это особенно важно по эстетическим соображениям:

— процесс хорошо управляем и результаты его воспроизводимы;

— обработка поверхности придает протезным устройствам значительную коррозионную стойкость и усталостную прочность;

— процесс ионной имплантации совместим с требованиями, которые предъявляются к среде чистых комнат, необходимых для работы с готовыми медицинскими деталями.

Достоинства процесса оправдывают дополнительные затраты на него и ионно-лучевая обработка биоматериалов и протезов начинает находить широкое применение в медицине в целом и в частности в промышленности ортопедических имплантатов.

В статье рассмотрены наиболее результативные применения исследования ионно-лучевой обработки материалов и потенциальные возможности этого процесса.

Ортопедические имплантаты на основе титана. Титан и его сплавы как один из самых биосовместимых материалов становятся основными претендентами на замещение сплавов на основе кобальта-хрома, традиционно используемых в качестве ортопедических имплантатов. До последнего времени низкая износостойкость титана в условиях абразивного и адгезивного износа препятствовала более широкому применению его сплавов.

Процесс ионной имплантации особенно эффективен при решении задачи улучшения износостойкости титановых поверхностей. Вместе с тем он способствует снижению износа сочленяемых деталей из полиэтилена, контактирующих со сплавом в универсальных ортопедических суставных протезах. Проблема такого контактирования также важна, как и проблема износа титана, и привлекает большое внимание специалистов.

При проведении ионной имплантации на поверхность суставных элементов для замены коленных и тазобедренных сочленений используют безопасные элементы, такие как углерод и азот. Приспособления, обработанные имплантацией ионов углерода или азота, если они выпускаются как "совершенно эквивалентные" необработанным титановым изделиям, могут продаваться на американском рынке без заключения Управления по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов. Ионная имплантация, проводимая в тщательной контролируемых условиях, позволяет обрабатывать титановые элементы, без изменения отделки поверхности и внешнего вида. Общий вид ортопедических устройств, их эстетическое оформление имеют для потребителя очень важное значение. Хирурги и предполагаемые пациенты плохо принимают устройства, которые обесцвечены или имеют неоднородную окраску, поскольку это свидетельствует о недостаточно хорошем контроле за процессом их изготовления. Метод ионной имплантации представляет

собой чистый вакуумный процесс, вполне пригодный для обработки готовых изделий и исключаящий вне-сение загрязнений. Ионная имплантация является последней операцией по обработке ортопедических устройств перед их упаковкой и стерилизацией.

Метод имплантации ионов углерода, азота и аналогичных элементов оказался очень эффективным при решении задачи улучшения общих свойств сплавов на основе титана. Бучанан и Вильямс [1,2] в лабораторных исследованиях получили в результате ионной имплантации значительное (в 10000 раз) уменьшение коррозионного износа сплавов на основе титана. Цанг с сотрудниками [3] весьма тщательно изучали имплантацию ионов азота в сплавы титана: проведенные ими сравнения износостойкости имплантированного азотом титана, обычных неимплантированных образцов и традиционных сплавов кобальта-хрома, используемых в ортопедических протезах, показали, что износостойкость имплантированных титановых деталей ниже, чем сплавов на основе кобальта-хрома и значительно лучше, чем износостойкость необработанного титана. Цанг сообщает также, что в КНР опытные имплантации на базе титановых сплавов уже используются в экспериментах. В результате проведенных измерений получены и опубликованы данные, свидетельствующие о значительном улучшении коррозионной стойкости [4] и усталостной прочности [5] при больших нагрузках для сплавов Ti-6Al-4V, имплантированных ионами углерода и азота.

Фирма Spire провела обширные независимые исследования износостойкости сплава Ti-6Al-4V [6, 7], имплантированного ионами различных элементов: углерода, азота, кислорода, бора, аргона и т.п. Полученные результаты показали, что улучшение износостойкости титана связано с увеличением его микротвердости. Поэтому микротвердость была выбрана в качестве основного критерия при подборе режима ионной имплантации, обеспечивающей наилучшую износостойкость. Для обработки универсальных суставных протезов на базе сплава Ti-6Al-4V был успешно разработан процесс IONGUARDTM, (так, фирма Spire назвала запатентованную ионно-лучевую технологию, используемую для оптимального воздействия на ортопедические имплантаты). В настоящее время процесс IONGUARD применяется при изготовлении в плановом порядке нескольких тысяч суставных имплантатов ежегодно.

Ортопедические имплантаты на базе сплава кобальт-хром. Сплавы на основе кобальта-хрома традиционно используются в ортопедических протезах. Это объясняется чрезвычайно высокими твердостью и износостойкостью материала наряду с отличной коррозионной стойкостью сплава. Однако некоторые клинические исследования показали присутствие в определенных органах пациентов, пользовавшихся ортопедическими средствами длительное время, высокой концентрации кобальта, хрома и других элементов, входящих в сплав. Токсичность и канцерогенность этих веществ (особенно кобальта, хрома и никеля) вызывают беспокойство всего общества ортопедов. Эту проблему обостряет новое поколение устройств с пористой поверхностью для прорастания костей. Площадь поверхности такого средства с пористой поверхностью увеличивается и степень воздействия жидкости тела усиливается. Таким образом, в устройствах нового поколения соответственно усложняется проблема выделения ионов.

Известно, что метод имплантации ионов азота очень эффективен для решения проблемы увеличения коррозионной стойкости сплавов на основе кобальта-хрома.

Хром хорошо известен как элемент, удерживающий азот, а поверхность образуемого нитрида хрома при потенциале коррозии обеспечивает самозащиту и значительное уменьшение коррозионного тока. Специалисты фирмы Spire при финансовой поддержке Национального института здравоохранения провели широкие исследования в этой области. Полученные результаты очень важны [8] и стимулируют проведение дальнейших работ в этой области. По своему значению возможность снижения степени выделения ионов сплавом кобальт-хром за счет имплантации ионов азота равна или даже превосходит вклад данного процесса в решение проблемы износа сплавов на основе титана.

С различной степенью успеха исследовалась имплантация ионов благородных металлов, таких как платина или золото, в сплав кобальт-хром. В частности, заслуживает внимания имплантация ионов платины. Поляризационные испытания коррозии показали [8], что введение в сплав кобальт-хром ионов платины не только изменяет коррозионный потенциал и снижает коррозионный ток, но и приводит к образованию на поверхности гидратного фосфата кадмия, который может служить биосовместимым слоем.

Улучшение защитных свойств и биосовместимости.

Ионная имплантация — удобный метод нанесения защитных покрытий на поверхность металлических протезов. Ее применение для эффективной и воспроизводимой пассивации поверхности материалов на основе титана способствует их биосовместимости. Недавние исследования, проведенные в Гарвардской медицинской школе [10], показали значительное улучшение воспроизводимости и отсутствие деградации клеточ на культурах тканей, выращенных на образцах титана, подвергнутого ионной имплантации. Результаты других работ по улучшению биосовместимости имплантированных образцов противоречивы и пока не получили подтверждения. В этой области следует провести более систематизированные исследования.

Текстурирование поверхности с помощью ионных пучков. В протезном производстве существует потребность в деталях с высокой степенью пористости. Пористая поверхность протезов обеспечивает прорастание в них тканей и в ряде случаев — ее прочное механическое сцепление с приспособлением.

Процессы на базе ионных пучков (ионное травление, реактивное ионное травление и т.п.) пригодны для формирования [9] сильно текстурированных поверхностей протезов. Более того, технологии на основе пучков элементарных частиц, как правило низкотемпературные, имеют важное преимущество перед обычными металлургическими процессами (такими, как например, синтезирование), проводимыми при высокой температуре и ухудшающими усталостную прочность сплавов.

С целью оценки пригодности в ортопедии процесс ионного травления использовался для формирования текстурированной поверхности, состоящей из ямок и выступов. На образцах из чистого титана и пластмассы, предназначенных для подкожного вживления, были получены поверхности с высокой степенью пористости (диаметр пор более 50 мкм). Процессы ионной обработки использовались для увеличения площади поверхности наконечников сердечных электродов, предназначенных для пациентов с вживленными кардиостимуляторами. С помощью этих процессов изготавливались небольшие фильтры для вживляемых систем подачи лекарственных препаратов.

Другие области применения. Метод ионной имплан-

талии применялся также для обработки пластин, сжимающих тазобедренные суставы пластины и костные пластины, для пациентов с переломами тазобедренной или трубчатой кости. Эти пластины изготавливаются из нержавеющей стали (марки 316L) и часто выходят из строя вследствие механической усталости материала при больших нагрузках и деформирующих циклах. Имплантация ионов легких элементов, таких как бор, углерод и особенно азот весьма эффективно повышает усталостную прочность этих сплавов при большом числе деформирующих циклов.

Внутричелюстные имплантаты и зубные штифты, обычно изготавливаемые из чистого титана или сплавов на основе титана, также подвергались ионной имплантации для повышения усталостной прочности этих элементов. Кроме того, благодаря этому процессу повышается коррозионная стойкость внутричелюстных протезов при одновременном улучшении биосовместимости.

С помощью ионных процессов обрабатывались различные хирургические инструменты, в том числе

зубные и костные боры, хирургические ножницы и скальпели, хирургические приспособления на основе титана. Основная цель такой обработки — предотвращение угрозы коррозии инструментов и сохранение острой режущей кромки.

Выводы. Практика и многочисленные исследования подтверждают перспективность для улучшения износа и коррозионной стойкости, а также усталостной прочности ортопедических имплантатов. Особый интерес эта технология представляет с точки зрения медицинской промышленности, для которой первостепенное значение имеет целостность размеров, чистота поверхности и эстетический вид конечного изделия.

Процессы ионной обработки применяются для формирования текстурированных и пористых поверхностей протезов и вспомогательных приспособлений. Ожидается, что эта технология внесет большой вклад в протезирование.

зарубежная электронная техника

Анализ целенаправленно отобранных результатов зарубежных исследований процесса ионной имплантации в неполупроводниковые материалы с целью повышения их коррозионной стойкости составляет предмет данной статьи.

Ионная имплантация, как и диффузия, относится к процессам внедрения в твердые вещества атомов других веществ. Эти процессы из-за низкой производительности и высокой стоимости применяются только в полупроводниковом производстве, для которого характерно использование очень малого количества легирующих веществ. Причем легирование полупроводниковых материалов в первую очередь стремятся проводить с помощью диффузии, которая по сравнению с ионной имплантацией более выгодна в отношении удельных затрат средств и энергии на единицу перенесенного и внедренного вещества. Ионная имплантация используется только в случаях, когда такие ее положительные особенности, как высокая контролируемость процесса внедрения, низкие температуры и др., обеспечивают увеличение выхода годных изделий или придают им новые свойства. Исходя из этого, перспектива применения процесса ионной имплантации для защиты от коррозии элементов конструкций представляется сомнительной. Тем не менее она существует, и можно назвать ряд случаев, где этот процесс — единственно возможный способ такой защиты. Одним из примеров может служить рассмотренная в статье обработка поверхности линейных шаговых двигателей. Подобными примерами изобилует электронное и другие производства, где повышение коррозионной стойкости некоторых элементов конструкции путем изменения с помощью ионной обработки структуры поверхностного слоя в определенных местах повышает их ресурс и окупает большие затраты.

В статье впервые рассматриваются возможности расширения сферы использования ионной имплантации, и данная работа может инициировать соответствующие исследования в нашей стране и способствовать их выполнению.

Обращая на себя внимание несколько спорное использование автором самого термина "ионная имплантация" который он применяет и к процессам, фактически не сводящимся к внедрению одних веществ в другие. Правильнее их было бы назвать процессами обработки ионами высокой энергии. Однако благодаря идентичности выполнения таких процессов с процессами ионной имплантации допустимо обозначать их привычным термином, имея в виду при этом не физику, а технологию.

Я. А. Райхман, д-р техн. наук.

Повышение коррозионной стойкости материалов ионной имплантацией

В.В.НОВОХРОСТ

Технологический процесс ионной имплантации, широко используемый в производстве современных ИС, может с успехом применяться для повышения коррозионной устойчивости элементов конструкций в условиях, когда оправдывается его высокая стоимость.

Коррозия — поверхностный процесс, и изменить характер ее протекания может модификация тонкого приповерхностного слоя. Для ее осуществления возможно использование ионной имплантации, изменяющей в первую очередь именно поверхность образца. Этот метод относится, однако, к числу наиболее дорогих, энергоемких и низкопроизводительных. Поэтому промышленное применение ионной имплантации экономически оправдано только в микроэлектронике, площади изделий которой весьма малы.

Тем не менее, существует ряд производств, в которых ионная имплантация целесообразна (как, например, при изготовлении уникальных химических реакторов), а в некоторых случаях является единственно возможным технологическим процессом для повышения коррозионной стойкости изделий. Хороший пример этого — системы координатных перемещений на линейных шаговых двигателях, широко используемых в прецизионном технологическом оборудовании. Статор и двигатели таких систем представляют собой зубчатую структуру из электротехнической стали, пазы которой заполнены эпоксидной смолой. Малый зазор между двигателями и статором (5–15 мкм) не позволяет применять покрытия для защиты от коррозии, а наличие эпоксидной смолы не допускает использования высокотемпературных плазменных процессов для модификации поверхностного слоя. Решить проблему защиты таких изделий от коррозии может только ионная имплантация.

Использование этого метода для снижения скорости коррозии может осуществляться по нескольким направлениям [1]:

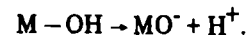
- изменение протекания катодного процесса путем введения в состав поверхностного слоя изделия веществ, оксиды которых имеют характеристики, отличные от характеристик оксидов матрицы;

- создание в процессе имплантации на поверхности изделий соединений, обладающих повышенной коррозионной стойкостью (бориды, карбиды, нитриды);

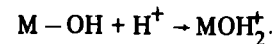
- повышение в приповерхностном слое концентрации веществ с высокой коррозионной стойкостью (Cr, Ti, Ta);

- модификация структуры поверхности, приводящая к переходу межкристаллитной и питтинговой коррозии в однородную, создание аморфных поверхностных слоев (питтинговая, т.е. пятнистая коррозия протекает наиболее быстро).

Для каждого направления необходимо подбирать соответствующие пары ион — матрица и режимы имплантации. Так, питтинговая коррозия в металлах в пассивном состоянии рассматривается как процесс проникновения активных анионов (например, хлора) сквозь пленку оксида, которая содержит гидроксильную группу и взаимодействие их с поверхностью металла. При значении pH раствора, большем некоторой величины, происходит диссоциация с возникновением избыточного отрицательного заряда на поверхности, что затрудняет взаимодействие с ней анионов:



В растворе с меньшим значением pH на поверхности в результате диссоциации появляется избыточный положительный заряд, что облегчает последующую реакцию окисления:



Величина pH, при которой диссоциации не происходит и поверхность остается нейтральной, называется pH_z нулевого заряда. Она зависит от вида металла, входящего в оксид, и характеризуется потенциалом начала питтинга. При этом чем выше величина pH_z , тем выше и соответствующий потенциал (рис. 1). При образовании оксида нескольких различных металлов соответствующая величина pH_z равна средневзвешенному значению pH_z составляющих оксидов [2]. Отсюда можно сделать вывод о возможности модификации свойства поверхности путем введения в ее состав вещества с подобранными значениями pH_z . В этом направлении выполнялись исследования зависимости скорости коррозии алюминия от имплантации веществ с различными значениями pH_z [3]. Имплантация проводилась

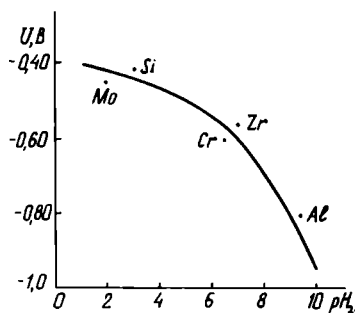


Рис.1. Зависимость величины потенциала начала питтинга V от pH_z нулевого заряда для различных металлов [1]

Изменение величины потенциала питтинга алюминия при имплантации различных ионов

Вид иона	Концентрация примеси в мишени		pH оксида
	4 ат%	12 ат%	
Mo	-0,56	-0,545	1,8- 2,1
Si	-0,64	-0,340	1,8- 2,2
Nb	-0,68	-0,585	2,8
Zr	-0,66	-0,410	5,5- 6,3
Cr	-	-0,565	6,2- 6,3
Zn	-	-0,950	9,2-10,3
Mg	-	-0,700	12,4

при энергии ионов 65 кэВ, что обеспечивало создание модифицированного слоя толщиной приблизительно в 500Å с содержанием примеси в 4 и 12 ат.% в зависимости от дозы имплантации. Существовавший на поверхности до имплантации слой оксида алюминия толщиной 21–43Å после имплантации сохранялся. Потенциостатические испытания проводились в 0,1M растворе NaCl с pH = 5,8. Полученные зависимости потенциала питтинга от вида имплантированных ионов и соответствующего pH_z показали, что с уменьшением величины pH_z снижается потенциал питтинга и, следовательно, растет коррозионная стойкость (см. таблицу).

Попытки создания в приповерхностном слое металла соединений с помощью имплантации ионов химически активных элементов – бора, азота и фосфора – предпринимались с учетом того, что скорость коррозии зависит от энергии поверхностной связи, а в химических соединениях величина этой энергии выше, чем в чистых материалах. Исследования показали, что при имплантации ионов азота в железо возникают химические соединения и величина анодного тока пассивации снижается в 100 раз [4]. При этом образуются соединения Fe_2N и Fe_4N , причем отмечено, что при увеличении дозы интенсивность сигнала, соответствующего Fe_4N , снижается, а сигнала, соответствующего Fe_2N , – возрастает.

Анализ коррозионной стойкости проводился измерением анодного тока пассивации в 0,2M растворе HAc–NaCl с pH = 6,4. Установлено, что облучение с дозой 5×10^{16} см⁻² не оказало заметного влияния на коррозионную стойкость. При дозе 2×10^{17} см⁻² величина анодного тока снизилась в 10 раз по сравнению с неимплантированным образцом, а при дозе 5×10^{17} см⁻² – в 100 раз. Объясняется этот эффект большей величиной энергии связи у нитрида железа и соответствующим повышением уровня энергии активации коррозии.

Однако не всегда имплантация ионов химически активных веществ улучшает коррозионные свойства. Например, при облучении бором мишени из никеля величина тока пассивации монотонно возрастает при увеличении дозы имплантации [5]. Причина этого – в том, что образование на поверхности соединений типа Ni_xB_{1-x} затрудняет возникновение в процессе коррозии промежуточных соединений NiOH или NiHSO₄, ответственных за зарождение пассивирующих оксидных пленок.

Исследования процесса имплантации химически активных ионов в сложные по составу мишени связаны с большими трудностями из-за разнообразия протекающих при этом процессов. Наряду с образованием различных соединений с компонентами сплава может протекать их сегрегация, что приводит к нарушению однородности структуры и соответствующему увеличению скорости коррозии. Так, при облучении сплава VTi84 ионами В, С, и N отмечен рост коррозионной стойкости при термоциклировании, а при облучении ионами Pd – ее снижение [6].

Не дала положительного результата также имплантация ионов Hf и Sm в сплавы VTi84 и VT9 [7]. Сопротивление к коррозии при термоциклировании после имплантации снижалось в 1,5–4 раза. При этом отмечалось также ухудшение в 2–3 раза жаростойкости для температуры 550°C и примерно такое же снижение эрозионной стойкости.

Защитой от коррозии может служить оксид имплантируемого вещества. При имплантации ионов Се в сталь 32Ni-20Cr образование SeO_2 на поверхности приводило к замедлению окисления компонентов стали и увеличению содержания Cr в продуктах коррозии [8].

Отмечалось положительное влияние имплантации фосфора и бора на коррозионную стойкость стали 304 и 306 [9]. После облучения образцов обнаружена аморфизация поверхности. Потенциостатические испытания их в 0,5M растворе H₂SO₄ показали снижение

плотности тока при имплантации фосфора. Имплантация бора на поведение стали в этом растворе заметного влияния не оказала. При исследовании имплантированных образцов в растворе NaCl результат оказался противоположным: уменьшение анодного тока наблюдалось для образцов, имплантированных бором. Снижает скорость коррозии и имплантация ионов азота в сталь [10].

Исследовалось влияние имплантации азота на коррозионную стойкость системы Co–Cr–W–C [11]. Пленки такого состава получали магнетронным распылением на подложках из нержавеющей стали 2Cr13. Имплантация проводилась ионами азота энергией 190 кэВ до доз $(4-8) \cdot 10^{16}$ см⁻². В результате обработки коррозионная стойкость образцов улучшалась, причем эффект усиливался с увеличением дозы. Это связано с возникновением на поверхности катодных областей на основе нитридов, что одновременно приводит к снижению площади анодных участков. Однако при возможном образовании соединений типа WN (или W(CH)) снижается стойкость к питтингу, поскольку вольфрам является в данной системе ингибитором питтингообразования. Поэтому наряду с повышением стойкости к общей коррозии с ростом дозы может возрастать опасность появления питтинга.

Увеличивается также стойкость к коррозии стали 304 при имплантации в нее азота [12]. На результаты имплантации азота на коррозионную стойкость сталей 908 и 909 влияет состав мишени [13]: в стали 908, где содержится 3,8% Cr при отсутствии Co, после имплантации обнаружено образование соединения CrN. Потенциодинамические испытания, проведенные в 0,01M растворе NaCl, показали сдвиг потенциала коррозии в положительную сторону, питтинга не обнаружено. Имплантация в сталь 909, содержащую 12,73% Co и не содержащую Cr, не привела к возникновению новых соединений, величины потенциала и тока коррозии

остались практически прежними. Питтинг не исчез после обработки, хотя величина его снизилась вдвое.

Введение ионной имплантацией материалов, обладающих повышенной коррозионной стойкостью (хрома, титана, молибдена, палладия и др.) в приповерхностный слой имеет по сравнению с традиционными металлургическими методами ряд преимуществ. В процессе имплантации поверхность находится в сильно неравновесных условиях, что дает возможность получать соединения, далекие от стехиометрии, в которых концентрация ингибитора может быть повышена в несколько раз. Имплантация позволяет изменять свойства поверхностного слоя образца без изменения свойств массива, при этом глубина модифицированного слоя может плавно изменяться, а его свойства могут формироваться с учетом конкретной задачи. Не возникает и проблем адгезии модифицированного слоя, как при использовании защитных покрытий иных типов. Наконец, изменению подвергается лишь приповерхностный слой, что резко снижает требуемое для защиты количество дорогих материалов.

Рост коррозионной стойкости обнаружен при имплантации тантала в сталь М50 [14]. Имплантация ионов энергией 80 кэВ велась до доз $5 \times 10^{16} - 4 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Анодный ток растворения в 0,5M NaCl снизился в два раза, а потенциал на 0,5–0,7 В.

При имплантации титана в сталь 52100 выявлен рост коррозионной стойкости в растворе 1M H_2SO_4 [5]. Однако при высоких токах поляризации развивался питтинг по неоднородности титана, проникавший под пассивную пленку.

Имплантация ионов Ti, Cr, Al, и Cu в низколегированную сталь HSLA-80 привела к снижению анодного тока растворения [16]. Критический ток пассивации в случае имплантации ионов хрома до дозы $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ снизился на 2,5 порядка. Имплантация велась ионами энергией 125 кэВ до доз $5 \times 10^{16} - 4 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

Для повышения коррозионной стойкости титана часто используется имплантация палладия, однако сведения о результатах этого процесса носят несколько противоречивый характер. Так, при имплантации ионов палладия энергией 40 кэВ до дозы $3 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ в сплав VTi84 получен отрицательный результат [6]. В то же время в других случаях при коррозионных испытаниях по методике незамкнутого контура обнаружено снижение скорости общей коррозии более чем на три порядка [17]. Имплантация проводилась ионами энергией 90 кэВ до дозы 10^{16} см^{-2} , испытания – в 1M H_2SO_4 при 100°C.

При этом в процессе коррозии концентрация палладия на поверхности за счет селективного растворения выросла с 5 до 20%.

В процессе коррозии важную роль играет структура поверхности, равномерность распределения легирующих элементов и состояние приповерхностного слоя. Скорость коррозии может изменяться как при изменении шероховатости поверхности [18], так и при внесении напряжений в приповерхностный слой.

Исследовалась коррозионная стойкость пленок TiN, полученных различными способами – эпитаксией из пара или ионным осаждением – до и после имплантации ионами иттрия энергией 75 кэВ. Стойкость пленок, полученных методом ионного осаждения, превосходила стойкость эпитаксиальных пленок за счет большей их плотности и однородности. На облученных пленках отмечено возникновение текстуры по (112) TiN и минимальная скорость коррозии [19].

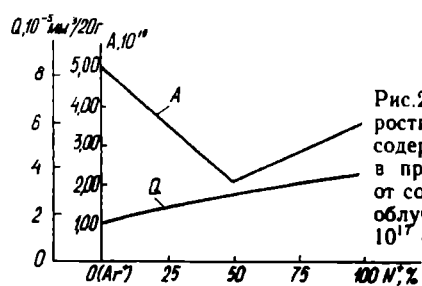


Рис.2. Зависимость скорости коррозии A [31] и содержания водорода Q в приповерхностном слое от состава пучка (энергия облучения 60 кэВ, доза 10^{17} см^{-2})



Рис.3. Потенциостатические кривые при облучении Ti ионами N и Ar до различных доз: 1 – неимплантированный Ti; 2 – N + Ar, $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$; 3 – N, $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$; 4 – N + Ar, 10^{18} см^{-2} [31]

При использовании имплантации в целях внесения структурных изменений в поверхность предпочтительно применение ионов инертных газов. Их химическая инертность предотвращает образование соединений в процессе имплантации, а достаточно большая атомная масса вызывает возникновение заметных радиационных эффектов: образование дефектов, радиационно-стимулированную диффузию.

Облучение ионами аргона приводит к двойному увеличению стойкости к питтингу у следующих материалов: Cu, Mo, Ta, Ni [20]. Проводилось также измерение зависимости эффективности имплантации в никель для снижения скорости образования оксида и накопления водорода в приповерхностном слое от состава имплантируемых ионов. Облучение велось ионами аргона и азота энергией 60 кэВ до дозы 10^{17} см^{-2} , при этом доля ионов азота в пучке изменялась от нуля (чистый Ar) до 100%. Результаты эксперимента показывают (рис. 2), что скорость коррозии монотонно уменьшается при увеличении доли аргона в пучке.

Имплантация смеси ионов аргона и азота в титан приводит к снижению тока коррозии, причем снижение более существенно при большей дозе имплантации (рис. 3). Имплантация чистых ионов азота при той же дозе вызывает уменьшение не тока, а потенциала коррозии. Это может быть связано с различием механизма влияния этих ионов: имплантация азота приводит к возникновению соединений, что повышает энергию активации коррозии, но мало сказывается на скорости ее протекания; имплантация аргона, внося дополнительные изменения структуры, приводит к изменению скорости процесса.

Облучение меди и циркония ионами геллия и аргона также вызывает увеличение коррозионной стойкости [21]. Облучение меди ионами аргона приводит к снижению скорости анодного растворения более чем на порядок [22].

Выполненные исследования указывают на существенное влияние ионной имплантации на коррозионную устойчивость металлических материалов. Это влияние зависит от типа материала, типа имплантируемых ионов,

их энергии и дозы облучения. При этом в одних случаях коррозионная стойкость увеличивается, в других — уменьшается. Можно сделать общие заключения о влиянии определенных типов ионов (химически активных, ионов инертных газов, ионов металлов) на скорость протекания коррозионного процесса и причинах этого влияния (образование химических соединений, изменения структуры поверхности, изменение поверхностной энергии связи), однако для прогнозирования конкретных результатов для определенных пар ион — матрица достаточно отработанной теории не существует. Нет и необходимого количества экспериментальных данных. Поэтому при использовании ионной имплантации для повышения коррозионной стойкости конструктивных элементов в большинстве случаев приходится проводить экспериментальный поиск.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mc.Cafferty E. Ion beam processing of metal surfaces for improved corrosion resistance. — *Nuclear Instruments and Methods in Physics*, 1991, B56/57, p. 639—643.
2. Parks G.A. Equilibrium concepts in natural water systems. — *Advanced Chemical Series*, 1969, vol. 67, p. 121.
3. Naitishan P.M. Surface charge consideration in the pitting of ion-implanted Al. — *Journal of the Electrochemical Society*, 1988, vol. 135, N 2, p. 321—326.
4. Li Yi. The mechanical and corrosion behaviour of iron implanted with N⁺. — *Vacuum*, 1989, vol. 39, N 2/4, p. 263—266.
5. Takadom I. Electrochemical behaviour of boron-implanted nickel surfaces. — *Surface and Coating Technology*, 1991, vol. 46, N 1, p. 103—109.
6. Шулов В.А. Влияние термоциклирования и солевой коррозии на состав ионно-легированных поверхностных слоев сплава ВТ 184. — *Защита металлов*, 1990, т.26, N 6, с. 948—953.
7. Рябчиков А.Н. Влияние ионной имплантации Ni и Sn на физико-химический состав поверхностных слоев и свойства титановых сплавов. — Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц. — В кн.: Материалы 2-й Всесоюзной конференции, Свердловск, 21—24 мая 1991 г., т.3, с. 23—25.
8. Stroosnijer M.F. Influence of cerium implantation on the nucleation and growth of corrosion products

on alloy 800H in a mixed sulphidizing/oxidizing environment. — *Oxides of Metals*, 1991, vol. 35, N 1/2, p. 19—33.

9. Clayton C.R., Wang Y.-F. — In: *Passivity of metals and semiconductors*. Ed. M. Froment, Elsevier, 1983, p. 305—307.
10. Tarkowski P. Influence N⁺ implantation on corrosion process in steel. — *Physica Status Solidi*, 1989, N 112(a) p. 353—360.
11. Nigkang Huang. Microanalyses of ion-beam mixed Co—Cr—W—C film on stainless steel before and after corrosion behaviors. — *Journal of Nuclear Materials*, 1991, vol. 183, N 1—2, p. 96—104.
12. Chabrol C. Application de l'implantation ionique a l'amolioration de la resistance a la corrosion localisae par crevasse de l'acier inoxydable 304L. — *Mem. et etud. Sci. rev. met.*, 1991, vol. 88, N 9, p. 550—557.
13. Sridharan K. Elevated temperature nitrogen ion implantation of incoloy alloys 908 and 909 using the plasma source in implantation process. — *Materials Science and Engineering, A*, 1990, vol. 128, N 2, p. 259—268.
14. Hangel C.M. The effect of Ta ion implantation on the agucous corrosion resistance of M50 bearing steel. — *Port Electrochemical Acta*, 1991, N 9, p. 19—22.
15. Hubler G.K., Trzaskoma P.P. — In: *Ion implantation into Metals*, eds. Ashworth V., Grant W.A., Pergamon, Oxford, 1982, p. 24.
16. Singh A. Electrochemical corrosion behaviour of ion-implanted HSLA-80 steel. — *Corrosion*, 1990, vol. 46, N 5, p. 367—375.
17. McCafferty E. Electrochemical behaviour of Pd-implanted Ti. — *Journal of the Electrochemical Society*, 1978, vol. 125, N 11, p. 1892—1897.
18. Жуков Н.П. Курс коррозии и защиты металлов. — М.: Металлургия, 1968, с. 194—196.
19. Jin Zhujing Correlation of structure and corrosion resistance of Itrium modified ion plated coatings. — *Associated Italian Metals*, 1990, p. 251—258.
20. Radjabov T.D. Improvement of the corrosion properties of metals by ion implantation. — *Vacuum*, 1988, vol. 38, N 11, p. 979—985.
21. Зеленский В.Ф. Влияние ионной имплантации инертных газов на коррозию металлов и сплавов. В кн.: *Радиационное материаловедение. Труды Международной конференции по радиационному материаловедению*. — Алушта, 22—25 мая 1990, т.7, с. 92—97.
22. Ошеч Е.К. Ионно-стимулированная пассивация Cu, имплантированной ионами Ag. — *Защита металлов*, 1991, т.27, № 3, с. 471—474.

Монолитные ИС мм-диапазона для автомобильных устройств

По данным фирмы Alpha Industries (США), монолитные ИС мм-диапазона, разработанные за последние 10 лет для таких военных программ, как SADARM (системы обнаружения и поражения бронетанковой техники), СОИ и MIMIC, могут найти широкое применение в автомобильных системах связи и радиолокаторах средств предотвращения столкновений, массовое производство которых будет освоено через три-пять лет.

В связи с сокращением военных программ в США большое внимание уделяется освоению гражданских областей применения СВЧ ИС. Большой интерес для сбыта таких схем представ-

ляет рынок автомобильных систем связи и радиолокаторов средств предотвращения столкновений, которым выделены две полосы частот в V(50—75 ГГц) — и W(75—110 ГГц)-диапазонах соответственно (см. таблицу).

По мнению специалистов фирмы Alpha Industries, в приемных устройствах систем связи между автомобилем и автодорожной станцией могут найти применение разработанные в рамках военных программ монолитные схемы маломощного предусилителя, управляемого напряжением генератора, умножительной цепочки, смесителя на субгармониках и маломощного УПЧ.

Маломощный предусилитель на псевдо-

морфном НЕМТ с затвором длиной 0,1 мкм обеспечивает на частоте 60 ГГц коэффициент шума менее 4 дБ и коэффициент усиления 12 дБ. Управляемый напряжением генератор с рабочей частотой 7,5 ГГц, выходной мощностью 10 дБм и практически линейной зависимостью частоты от напряжения пригоден для применения в системе ФАПЧ.

Параметры автомобильных СВЧ устройств

Параметры	Системы связи между автомобилем и автодорожным устройством и между автомобилями	Радиолокаторы предотвращения столкновений
Диапазон частот, ГГц	63—64	76—77
Ширина полосы, ГГц	1	0,1 (при частотной модуляции непрерывного сигнала) 0,5 (при импульсной модуляции)
Выходная мощность, дБм	3—16	16—20
Тип модуляции	Частотная или фазовая	Частотная непрерывного сигнала или импульсная
Скорость передачи информации	Несколько мегабит в секунду	—

Четырехкристальная усилительно-умножительная цепочка на полевых транзисторах с затвором на основе барьера Шотки длиной 0,25 мкм и шириной 400 мкм присоединяется к управляемому напряжением генератору для обеспечения на выходе сигнала на частоте 30 ГГц, служащего для возбуждения смесителя на субгармониках. Эта цепочка содержит усилитель на частоту 7,5 ГГц с коэффициентом усиления 12 дБ, удвоитель частоты на 7,5/15 ГГц с потерями преобразования 7 дБ, балансный удвоитель частоты на 15/30 ГГц с потерями преобразования 4 дБ и двухкаскадный балансный усилитель на частоту 30 ГГц с коэффициентом усиления 15 дБ. В настоящее время в качестве альтернативы разрабатываются варакторные умножители.

Для уменьшения числа монолитных ИС в приемном устройстве был использован смеситель, работающий на субгармониках, что позволило устранить умножитель на 30/60 ГГц и усилитель на частоту 60 ГГц без заметного ухудшения шумовых характеристик приемного устройства. Смеситель

на двух антипараллельных диодах Шотки с последовательным сопротивлением 8 Ом и емкостью 0,035 пФ имеет потери преобразования 6—7 дБ в полосе частот 10%. Предполагается, что потери преобразования могут быть уменьшены на 1—2 дБ путем оптимизации структуры диода с целью уменьшения его последовательного сопротивления и емкости. Для возбуждения смесителя требуется мощность гетеродина 6 дБм.

В передатчиках радиолокаторов систем предотвращения столкновений могут использоваться монолитные СВЧ ИС, разработанные ранее для «интеллектуальных» средств поражения и систем самонаведения ракет. К этим схемам относятся управляемый напряжением генератор, усилитель мощности и умножитель (при работе передатчика на высших гармониках).

Управляемый напряжением генератор Ka-диапазона (26,5—40 ГГц) содержит полевой транзистор с затвором на основе барьера Шотки длиной 0,25 и шириной 400 мкм, включенный по схеме с общим истоком, и два варактора со сдвоенной меза-структурой (один — для перестройки частоты, другой — для температурной компенсации). Сдвоенная меза-структура диода (вместо планарной) выбрана для уменьшения его последовательного сопротивления и увеличения добротности резонатора. Это позволило снизить уровень фазовых шумов генератора. Выходная мощность генератора 6 дБм, диапазон перестройки — 600 МГц, температурная стабильность — ± 1 МГц/°C, уровень фазовых шумов на частоте, отстоящей от несущей на 1 МГц, равен 100 дБ/Гц.

Усилитель мощности Ka-диапазона выполнен на четырех мощных полевых транзисторах с затвором на основе барьера Шотки длиной 0,25 и шириной 400 мкм. Выходная мощность усилителя 3 Вт. Потери преобразования умножителя на частоту 77 ГГц, выполненного на варакторах со сдвоенной меза-структурой емкостью 0,3 пФ, равны 8 дБ. При использовании этого умножителя на выходе передатчика может быть достигнута мощность 10—20 дБм.

При работе передатчика на основной гармонике в управляемом напряжением генераторе и усилителе мощности рекомендуется использовать псевдоморфные НЕМТ, коэффициент усиления которых превышает 7 дБ на частоте 60 ГГц. Прогнозируемый коэффициент усиления на частоте 77 ГГц превышает 6 дБ.

Microwave J., 1992, v. 35, N 5, pp. 189, 190
Microwave J., 1992, v. 35, N 2, pp. 22, 24, 26,
27, 28, 32

Машинное зрение в технологических процессах

В.М.ВАЛЬКОВ

В 90-х годах ожидается расширение применения систем (подсистем) машинного зрения в производстве изделий электроники. В связи с этим В.М.Вальков — специалист, известный в области создания автоматизированных систем управления техническими процессами, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ЛЭТИ, рассматривает эту проблему в технологическом плане и делает попытку систематизировать задачи, решаемые с помощью машинного зрения, анализирует последовательность типовых процедур при их решении и предлагает совокупность аппаратных средств для автоматического контроля с помощью средств машинного зрения.

Возрастающая роль технологии в материальном производстве, интенсификация технологических процессов (ТП), внедрение новых «наукоёмких» технологий, повышение требований к качеству выпускаемой продукции требуют создания и внедрения принципиально нового технологического оборудования, совершенных средств автоматизированного или автоматического управления и контроля. Для крупномасштабных производств необходима реализация концепции CIM (computer integrated manufacturing) — высокоэффективного производства, в котором технологические и информационные процессы, управление материальными потоками интегрируются с помощью локальной сети компьютеров. Это вызывает интерес к использованию средств и методов машинного зрения (computer vision), заменяющих человека, в частности в операциях контроля качества (контроль внешнего вида, размерный контроль и т.п.), а также в точных сборочных, монтажных и некоторых других видах технологических операций, которые выполняются вручную или работник выступает в роли «ассистента» промышленных роботов (ПР) и более сложных автоматизированных технологических комплексов (АТК).

Проблемами распознавания и обработки видеoinформации применительно к различным сферам человеческой деятельности в развитых странах мира занимаются уже несколько десятков лет. При этом практическая результативность исследований зависит от сложности задач. Применительно к технологическим процессам в общем множестве задач распознавания зрительных образов можно выделить подмножество доста-

точно простых, где не требуется мощного сенсорного аппарата, каким являются глаза человека, взаимодействующие с его мозгом.

На предприятиях монотонную, вредную для зрения работу выполняет большое число контролеров, которые не могут обеспечить необходимую достоверность контроля из-за субъективности оценки и быстрой утомляемости в своем стремлении достичь или превысить так называемые «нормы выработки» [1]. Таким образом, в сфере материального производства существует много операций технического контроля, которые реально и полезно автоматизировать с помощью систем (подсистем) машинного (технического — СТЗ) зрения*.

Другую тоже значительную группу задач, для решения которых в АТК применяют машинное зрение, составляют процессы с точным позиционированием эффекторов (инструмента) манипуляторов ПР. Видеосенсоры играют роль «глаза» при выполнении соответствующими ПР, например, функции пространственного манипулирования предметом труда и (или) инструментом. Удачные реализации задач этой группы можно отметить в производстве изделий электроники, в первую очередь микроэлектроники, а также в автомобилестроении и некоторых других отраслях

Основной задачей систем (подсистем) машинного зрения в рассматриваемой области (рис.1) является распознавание объектов, т.е. реализация процесса, при котором входные данные представляют изображение (или несколько изображений), а выходная информация — описание изображения или сцены в какой-нибудь форме [2]. Возможность практической реализации указанных задач определилась не только и не столько относительной простотой алгоритмов распознавания, ориентированных в основном на представление «двумерной» сцены, сколько успехами электронной промышленности в создании и про-

* В соответствии с РД 110871-92 (автоматизированный контроль внешнего вида, термины и определения) понятие СТЗ является более общим по отношению к системе машинного (компьютерного) зрения, поскольку задача распознавания или контроля может решаться не только аппаратно-программными, но и только аппаратными оптико-электронными средствами различного уровня сложности.

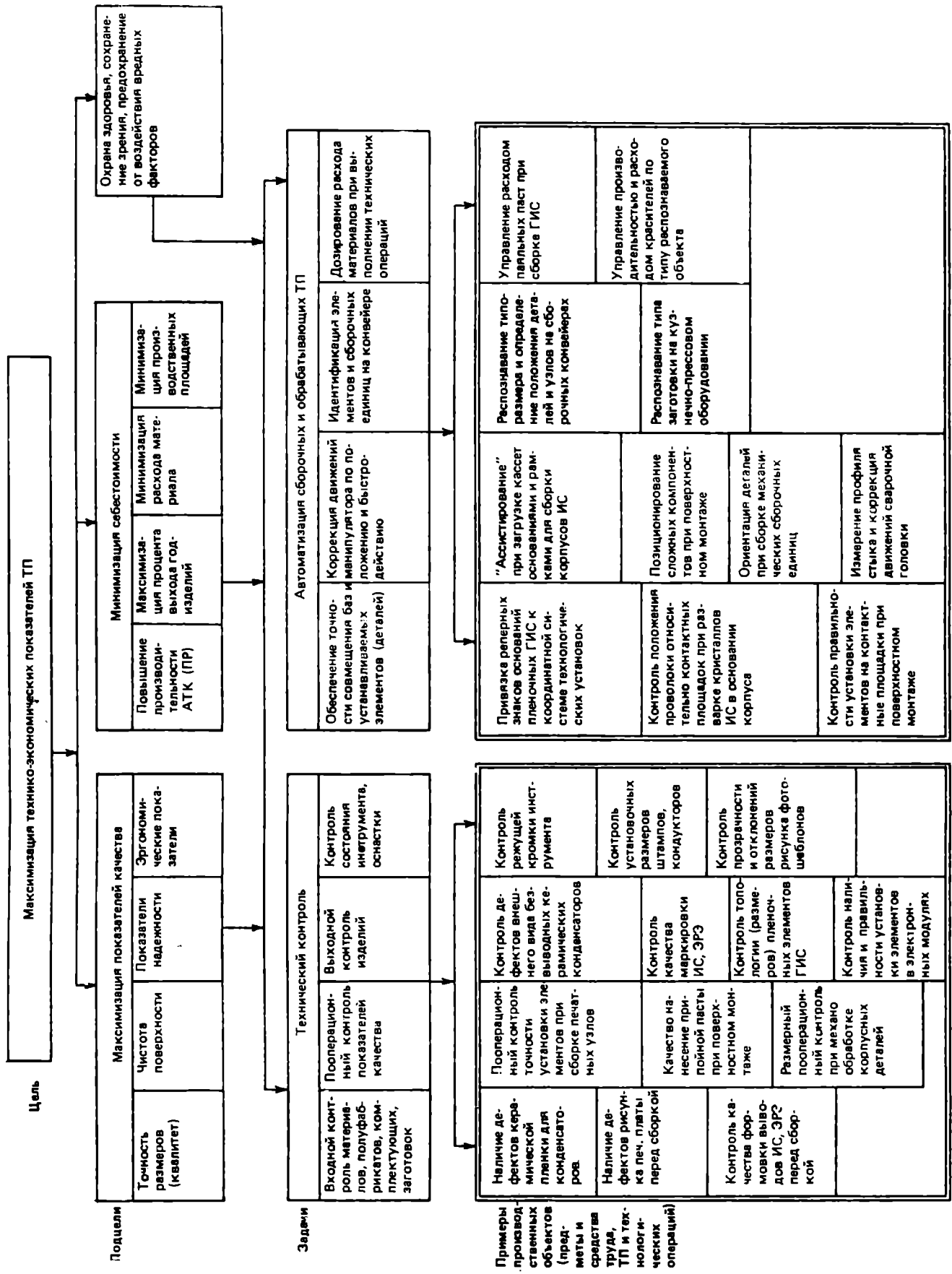


Рис. 1. Иерархия производственных целей и задач, решаемых с помощью машинного зрения

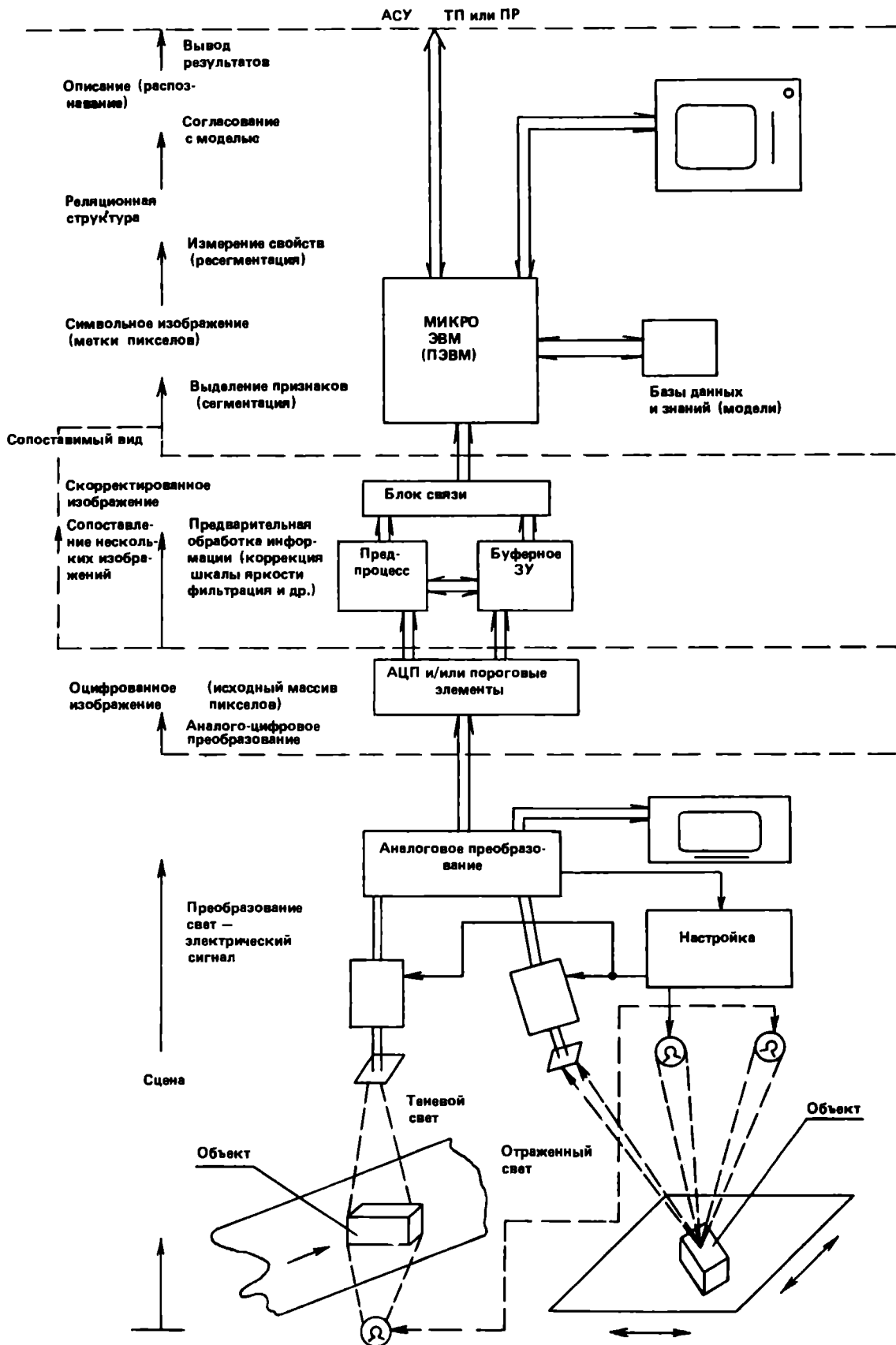


Рис. 2. Последовательность типовых процедур при решении задач распознавания изображений

мышленном выпуске относительно дешевых средств микропроцессорной техники и видеосенсорных устройств (видеокамер, высокочувствительных фотоприемных модулей, измерительных лазеров и др.). Термин «машинное зрение» (зрение, использующее ЭВМ) в отличие от термина «техническое зрение», появился, когда однокристалльные микроЭВМ, построенные на классических принципах ЭВМ фон Неймана, стали массовым средством автоматизации решения задач управления ТП. Благодаря своим технико-экономическим показателям они становятся основным компонентом комплекса технических средств АСУТП.

Уже первые опыты применения машинного зрения в производстве показали, что для практического решения ряда актуальных проблем в этой сфере уровень технических характеристик выпускаемых компонентов систем недостаточен. В частности, для контроля за выполнением технологических операций на высокопроизводительных автоматических линиях не хватает производительности микроЭВМ (микроУВК) с последовательным выполнением команд комплекса программ распознавания — необходимы предпроцессоры, осуществляющие предварительную обработку видеoinформации, СБИС, реализующие параллельно-конвейерную обработку данных, быстродействующие АЦП и др. [3].

Для решения задач распознавания изображений проводятся типовые процедуры, осуществляемые с применением аппаратно-программных средств, практически доступных в настоящее время для реализации задач рассматриваемого класса (рис.2). Для многих конкретных задач приближение понимания процедур анализа и распознавания еще далеко до уровня интеллекта человека [4]. Именно с этим связано утверждение об отставании достижений в математическом обеспечении (модели и алгоритмы) систем машинного зрения от уровня успехов микроэлектронной реализации компонентов систем. В то же время следует уделять особое внимание совершенствованию сенсорных подсистем. Для расширения области применения машинного зрения в технологии необходимы сенсорные компоненты, обеспечивающие более высокую разрешающую способность, возможность распознавания трехмерных изображений, восприятия цвета и др. Из новшеств в сенсорной технике называют компоненты, использующие структуризованный свет (например, на триангуляционном принципе) рентгеновские лучи (для скрытых трехмерных объектов и дефектов), высокочувствительные цветные телекамеры, высокочувствительные фотоприемные модули для движущихся изображений и сцен с малым уровнем освещенности [4—6].

В 90-х годах прогнозируется расширение использования машинного зрения в ТП производства лекарств, медицинского инструмента, переработки пищевых продуктов и особенно в АТК по выпуску электронных приборов и компонентов

электронных систем.

Как отмечается в [7], для электронных фирм «надежным бизнесом» являются такие применения машинного зрения, как

- выходной контроль электронных компонентов, многокристалльных подложек и многокристалльных модулей;
- пооперационный контроль при изготовлении электронных компонентов и узлов (модулей);
- обеспечение обработки видеoinформации в роботизированных технологических комплексах;
- чтение символической (например, маркировки надписей на таре) и графической информации.

Опыт исследований и разработок по применению машинного зрения в ТП (см. рис.1), накопленный в электронной промышленности, может быть удачно использован в других отраслях. Однако процент промышленного внедрения этих результатов пока крайне мал. В то же время, когда, например, выяснилось, что прецизионную сборку кристаллов ИС высокой степени интеграции невозможно с необходимой производительностью выполнять без СТЗ, российские инженеры оперативно и успешно применили их в автоматах разварки выводов кристаллов в корпусах [8], что и по сей день является в отечественной промышленности наиболее эффективным серийным применением машинного зрения в ТП. Если сейчас доминирующим методом монтажа печатных узлов и электронных модулей становится монтаж на поверхность и при этом считается необходимым автоматизировать с помощью СТЗ контроль нанесения припойной пасты через трафарет, позиционирование сложных компонентов (многовыводных корпусов БИС, СБИС), контроль узлов после пайки [9], то не вызывает сомнения, что эти задачи будут также решены успешно и оперативно.

Следует подчеркнуть, что предприятия российской электронной промышленности выпускают практически все необходимые компоненты для производства подсистем машинного зрения, которые могут решать задачи распознавания различной сложности, а отдельные НИИ и КБ в уже сложившейся кооперации с рядом вузов РФ и организаций РАН создали большой задел по математическому и программному обеспечению в данной области. Здесь только надо не забыть, как отмечалось в [7], что надежность «бизнеса машинного зрения» может быть обеспечена при обязательном тесном взаимодействии и соглашениях производителей, потребителей и представителей их коммерческих служб с одной стороны, и разработчиков и изготовителей систем (подсистем) машинного зрения с другой.

В общем же успехи в этой области зависят от хода экономических реформ, процессов реконструкции предприятий (в том числе конверсии на предприятиях ВПК), а также темпов автоматизации базовых ТП, сертификации систем качества и аттестаций производств.

1. В а л ь к о в В.М. Состояние и перспективы применения систем технического зрения в автоматизированных производствах. — ЛДНТП, 1989, с. 4—6 (Материалы научно-технического семинара 21—22 сентября).

2. Р о з е н ф е л ь д А. Машинное зрение: Основные принципы — Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (пер. с англ.), 1988, т.76, № 8, с. 10—16.

3. СБИС для распознавания образцов и обработки изображений (пер. с англ.) / Под ред. К.Фу. — М.: Мир, 1988, 248 с.

4. Machine Vision in the 1990 s: Applications and How to Get There. — Machine Vision and Applications, 1991, vol. 4, N 2, p. 113—126.

5. Г о ш Дж. Быстродействующая точная система распознавания цвета. — Электроника (пер. с англ.), 1992, № 5—6, с. 15—16.

6. Высокочувствительные фотоприемные модули / А.И.Хатунцев, В.Н.Крутлин, А.Н.Марков, В.А.Фролов. — Электронная промышленность, 1992, вып. 2, с. 43—46.

7. S t o o p e r C.W. Machine Vision Trends Entering the 90 s. — Machine Vision and Applications, 1991, vol. 4, N 2, p. 126—127.

8. Высокоэффективная СТЗ промышленного робота. / В.П.Крылов, Ю.В.Алетурин, Э.М.Славинский и др. — ЛДНТП 1989 (Материалы научно-технического семинара 21—23 сентября).

9. М э н г и н Ч.-Г., М а к к л е л а н д С. Технология поверхностного монтажа: Пер. с англ. — М.: Мир, 1990, 276 с.

Графический процессор

А.М.ПЕТУХ, А.Ф.ТАКСА, Д.Т.ОБОДНИК, И.Е.ОЛИФЕРОВИЧ,
В.А.ДЕНИСЮК

Как аппаратно-программное средство отображения информации графический процессор является неотъемлемой частью вычислительных комплексов. Основные его функции — интерполяция в двумерном пространстве участка прямой линии, окружности и вычерчивание символов. Условно графический процессор разбит на две составные части: линейно-круговой интерполятор и генератор знаков. Кроме того, в его составе координатные счетчики (по двум координатам).

Метод круговой интерполяции основан на использовании памяти двоично-нормированных дуг окружностей с последующим их масштабированием. С использованием симметрии окружности [1] возможно хранение информации о каждой 1/8 части окружностей с нормированными радиусами, равными 2 пикселей (i изменяется от 1 до 11). Погрешность метода круговой интерполяции не хуже одного дискрета. Воспроизводятся окружности и дуги окружностей радиусов до 2047 пикселей.

При линейной интерполяции используется метод оценочной функции, не требующий работы с удвоенными приращениями координат и обеспечивающий максимально возможную точность интерполяции (0,5 дискрета) [2]. Вычерчиваются отрезки прямых линий в координатном пространстве 4096×4096 пикселей.

Генератор знаков обеспечивает выдачу знаков в форматах 6×7 и 7×9 с кодированием по ДКОИ-8 [3]. Кроме того, возможна заливка прямоугольника и окружности (полоса и круг).

Структурная схема графического процессора включает в себя память знаков и дуг окружностей, сумматор, блок регистров, координатные счетчики, мультиплексоры, а также блок управления.

Методы, положенные в основу функционирования графического процессора, и используемая элементная база (ИС серий 533 и 1533) обеспечивают быстродействие до 5 МГц при реализации процессора на плате 170×200 мм с двухсторонним монтажом компонентов.

Без изменения принципиальной схемы, микропрограммным путем реализуется любой иной набор знаков и воспроизведение эллипсов и дуг эллипсов. Незначительные дополнения — 1—2 корпуса ИС — обеспечивают возможность заливки прямоугольного треугольника с горизонтальным катетом и трапеции с горизонтальными основаниями, а дополнительные 3—5 корпусов позволяют осуществлять заливку произвольного треугольника.

Принимаются заявки на техническую документацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фолл Дж., ван Дэм А. Основы интерактивной машинной графики. — М.: Мир, 1985.

2. А.с. 920636 (СССР). Линейный интерполятор / А.М.Петух, Д.Т.Ободник, Н.М.Панич, Н.А.Сидорова. Оpubл. в БИ, 1982, № 14, с. 194.

3. ГОСТ 19768-74. ДКОИ.

Винницкий политехнический институт.
296021, г. Винница, Хмельницкое ш., 95.
Тел. (04322) 2-57-18.

Минский приборостроительный завод

«ОПТРОН»

**ПРОДУКЦИЯ
СЕГОДНЯШНЕГО
ДНЯ ПО ЦЕНАМ
ДНЯ ВЧЕРАШНЕГО**



БО-11 — БЛОК ОХЛАЖДЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

двухконтурная система
коррозионная стойкость внутреннего контура
максимальная величина теплосъема не менее 4 кВт
Цена 30 тыс.руб.



ЛАЗЕРНЫЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ «ТИТАН»

активный элемент — сапфир с титаном
перестройка длины волны излучения от 720 до 870 нм
ширина линии излучения не более 3 нм
наличие запасного активного элемента
Цена 25 тыс.руб.



ИЗМЕРИТЕЛЬ ТОЛЩИНЫ «УРАН-5»

бесконтактный метод измерения
возможность измерения толщины фасонных поверхностей
микронная точность
контроль размеров на попадание в поле допуска (по эталонному образцу)
цифровая индикация результатов измерения
высокая производительность
Цена 25 тыс.руб.

220141, Минск, ул. Жодзинская, 38,
Приборостроительный завод «Оптрон».
Тел. (0172) 640-517, 643-174.
Факс 638-257.
Телетайп 300-178 ТАМР.

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА
ИНТРОН  **INTRON**
Плюс Plus, Ltd.

Повысить процент выхода годных печатных плат Вам поможет —

**ИНТРОМЕТ - ВИХРЕТОКОВЫЙ
БЕСКОНТАКТНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ
ТОЛЩИНЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ
В ОТВЕРСТИЯХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ.**

С помощью ИНТРОМЕТА можно:

- * Быстро и точно измерить толщину медного слоя на любом этапе технологического процесса (затяжка, предварительная и окончательная гальваническая металлизация, до и после травления рисунка)
- * Обнаружить дефекты металлизации (поперечные трещины, непокрытые участки и т.д.)
- * Контролировать отверстия в двусторонних и многослойных печатных платах
- * Контролировать толщину медного слоя под защитным слоем сплава «олово-свинец»
- * Контролировать качество готовой продукции

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

	ИТМ-11	ИТМ-12
Толщина медного покрытия, мкм	5—50	5—50
Диаметр контролируемого отверстия, мм	0,8/1,0/ /1,3	0,6—1,5
Толщина печатной платы, мм	1,0/1,5/ /2,0	0,8—2,0
Погрешность измерения, мкм	5,0	—
Разрешающая способность, мкм	—	1,0

**ИНТРОМЕТ аттестован
Госстандартом.**

**ГАРАНТИРУЕМ ВЫСОКОЕ
КАЧЕСТВО ПРИБОРОВ И СЕРВИС
В ТЕЧЕНИЕ ВСЕГО СРОКА
СЛУЖБЫ.**

Адрес: 105835 Москва, Красноказарменная ул. 14.
ИНТРОН Плюс. Телефон: 362-56-38 (круглосуточно),
362-74-98. Телефакс: (095)-361-16-20
Телекс: 411610 MEI SU

МАЛОШУМЯЩИЕ СВЧ ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ НА GaAs

в корпусном и бескорпусном исполнении

находят широкое применение

- в усилительных и усилительно-преобразовательных устройствах наземной и спутниковой связи,
- телевидении,
- радиоастрономической и радиометрической аппаратуре

Тип транзистора	Максимально допустимые значения режимов работы				Ток утечки затвора при $U_{зи} = -1,5$ В, мкА, не более
	Напряжение сток-исток, В	Напряжение затвор-исток, В	Напряжение затвор-сток, В	Постоянная рассеиваемая мощность, мВт	
АП354А-5	3,5	2,5	5,0	100	0,3
АП354Б-5	3,5	2,5	5,0	100	0,3
АП354В-5	3,5	2,5	5,0	100	0,3
АП354Г-5	3,5	2,5	5,0	100	0,3
АП354А-2	3,5	2,5	5,0	100	0,3
АП354Б-2	3,5	2,5	5,0	100	0,3
АП354В-2	3,5	2,5	5,0	100	0,3
АП354Г-2	3,5	2,5	5,0	100	0,3
АП355А-5	3,5	2,5	5,0	70	0,3
АП355Б-5	3,5	2,5	5,0	70	0,3
АП355В-5	3,5	2,5	5,0	70	0,3
АП355Г-5	3,5	2,5	5,0	70	0,3
АП356А-5	3,5	2,5	5,0	45	0,3
АП356Б-5	3,5	2,5	5,0	45	0,3
АП356В-5	3,5	2,5	5,0	45	0,3
АП356Г-5	3,5	2,5	5,0	45	0,3
АП356Д-5	3,5	2,5	5,0	45	0,3
АП356А-2	3,5	2,5	5,0	45	0,3
АП356Б-2	3,5	2,5	5,0	45	0,3
АП356В-2	3,5	2,5	5,0	45	0,3
АП357А-5	3,5	2,0	4,5	30	0,3
АП357Б-5	3,5	2,0	4,5	30	0,3
АП357В-5	3,5	2,0	4,5	30	0,3
АП357Г-5	3,5	2,0	4,5	30	0,3
АП358А-5	3,5	2,0	4,5	30	0,3
АП358Б-5	3,5	2,0	4,5	30	0,3
АП358В-5	3,5	2,0	4,5	30	0,3
АП358Г-5	3,5	2,0	4,5	30	0,3
АП358Д-5	3,5	2,0	4,5	30	0,3

По вопросам приобретения обращайтесь по адресу:
252148, Киев-148. пр. 50 лет Октября, 26, НПО "Сатурн".

НПО

САТУРН

г. Киев

Электрические параметры при $T_{окр} = 25 \pm 10$ С			Режим измерения, $K_{ш}$, $K_{ур.опт}$			Примечания
Крутизна характеристики, мА/В, не менее	Коэффициент шума, $K_{ш}$, дБ, не более	Оптимальный коэффициент усиления по мощности, $K_{ур.опт}$, дБ, не менее	Напряжение сток-исток, В	Ток стока, мА	Частота, ГГц	
50	1,0	13,0	2,5	7...40	3,6	Чип
50	0,8	13,0	2,5	7...40	3,6	Чип
50	0,6	13,0	2,5	7...40	3,6	Чип
50	0,5	13,0	2,5	7...40	3,6	Чип
50	1,0	13,0	2,5	7...40	3,6	Корп. КТ-21
50	0,8	13,0	2,5	7...40	3,6	Корп. КТ-21
50	0,6	13,0	2,5	7...40	3,6	Корп. КТ-21
50	0,5	13,0	2,5	7...40	3,6	Корп. КТ-21
30	1,55	10,0	2,5	5...20	8,0	Чип
30	1,3	10,0	2,5	5...20	8,0	Чип
30	1,0	10,0	2,5	5...20	8,0	Чип
30	0,8	10,0	2,5	5...20	8,0	Чип
20	2,04	7,5	2,5	3...15	12,0	Чип
20	1,76	7,5	2,5	3...15	12,0	Чип
20	1,46	8,0	2,5	3...15	12,0	Чип
20	1,3	8,5	2,5	3...15	12,0	Чип
20	1,2	8,5	2,5	3...15	12,0	Чип
20	1,76	8,0	2,5	3...15	12,0	Корп. КТ-21
20	1,5	8,5	2,5	3...15	12,0	Корп. КТ-21
20	1,3	8,5	2,5	3...15	12,0	Корп. КТ-21
15	2,5	6,5	2,5	3...10	18,0	Чип
15	1,95	6,5	2,5	3...10	18,0	Чип
15	1,76	7,0	2,5	3...10	18,0	Чип
15	1,5	7,0	2,5	3...10	18,0	Чип
7	5,5	5,0	3,0	2...8	37,0	Чип
7	4,3	5,0	3,0	2...8	37,0	Чип
7	3,4	5,5	3,0	2...8	37,0	Чип
7	2,7	6,0	3,0	2...8	37,0	Чип
7	2,3	6,0	3,0	2...8	37,0	Чип

Телекс 131266 KODER SU
 Факс (044) 477-62-08
 Телефоны: (044) 478-06-81
 478-07-63

СКИТ

— система классификации и измерения транзисторов

Поставка "под ключ".

Изготовитель — машиностроительный комплекс А/О "ALFA", имеющий тридцатилетний опыт обеспечения серийного производства высокопроизводительным контрольно-измерительным оборудованием.

От стандартных систем, применяемых на предприятиях микроэлектроники, СКИТ выгодно отличаются малые габариты и малое потребление энергии, высокое быстродействие, возможность работы как с ручным, так и с автоматическим заданием режимов, возможность цифropечати значений параметров и показаний счетчиков.

Микропроцессорное управление системы позволяет оперативно приспосабливать ее к требованиям заказчика.

СКИТ можно использовать в лабораторных типовых испытаниях и в цеховых условиях.

Строгие требования, предъявляемые к контрольно-измерительному оборудованию предприятиями А/О "ALFA", успешно удовлетворяют работающие на них 20 таких систем, контролирующих транзисторы КТ3107, КТ326, КТ3109, КТ644 и транзисторные пары КТС3103, 2ТС393, 159НТ1 и др.

Измеряемые параметры		Режимы измерения	
Обратные токи $I_{кб0}, I_{эб0}, I_{кзк}$	10 нА...100 мкА	Напряжение при контроле обратных токов	1...140 В
Пробивные напряжения $U_{кб0}$ проб'		Ток при контроле пробивных напряжений	1...1000 мкА
$U_{эб0}$ проб', $U_{кзк}$ проб'	1...140 В	Ток эмиттера при измерении $h_{21э} + 1$	1 мкА...1,5 А
Граничное напряжение $U_{кэ0 гр}$	1...100 В	Напряжение на коллекторе	0,2...30 В
Коэффициент передачи тока $h_{21э} + 1$	1...1000	Ток $I_{б}, I_{к}$ при измерении $U_{нас}$	1 мА...1,5 А
Напряжение насыщения $U_{кэ нас}, U_{бэ нас}$	0,05...5 В	Длительность теста	5 мс или 20 мс
Разность напряжений база-эмиттер $U_{бэ}$	1...15 мВ	Число программ	32
Отношение коэффициентов передачи $(h_{21э} + 1) 1$		Габаритные размеры	580x580x1570 мм
$(h_{21э} + 1) 2$	0,01...1,599	Питание	220 В, 50 Гц
Погрешность измерения	+5%	Потребляемая мощность	не более 130 ВА
		Масса	не более 105 кг

Система обеспечивает независимую работу четырех измерительных постов. 15 групп классификации. 32 рабочих программы, одновременно хранящихся в ПЗУ. Минимальное время измерения 5 мс. Производительность при средней программе 10 тестов — 18 тыс/ч. Цифровая индикация результатов с возможностью цифropечати. Конструктивное исполнение блочное.

**СКИТ ПОМОЖЕТ ВАМ СРАЗУ РЕШИТЬ ВСЕ ПРОБЛЕМЫ
КОНТРОЛЯ ВАШЕЙ ПРОДУКЦИИ.**

Цена договорная.

Получить дополнительные сведения о системе и информацию по вопросам заключения договоров можно по адресу:

ул. Бривибас 372, Рига, LV-1006, Латвия, А/О "ALFA"
Телефоны: (0132) 520311 Е.Д. Старчевой
(0132) 552959 П.П.Тарвид (вед. конструктор)
Факс (0132) 520-817.

Совместное предприятие ИНТЕХ это: JOINT VENTURE (INTECH GmbH)

**Интегральные микросхемы, полупроводниковые приборы и
пассивные компоненты**

ИНТЕХ — официальный дистрибьютор Симес АГ — отделения полупроводников (**Siemens AG, Bereich Halbleiter**) и отделения пассивных компонентов и электровакуумных ламп (**Siemens AG, Bereich Passive Bauelemente und Roehren**)

На базе тесного сотрудничества с известными в Западной Европе дистрибьюторскими фирмами ИНТЕХ окажет помощь в приобретении продукции и других мировых фирм в области ИМС, ППР, ОПР и комплектующих.

Специальное технологическое оборудование для микроэлектроники, полупроводниковой, пленочной и гибридной техники от ведущих европейских фирм:

Centrotherm Elektrische Anlagen GmbH + Co

— термо-диффузионное оборудование, **CVD**, эпитаксия, системы манипулирования, оборудование для чистых помещений, конвейерные и специальные печи;

НАМАТЕСН Halbleiter-Maschinenbau und Technologie GmbH

— оборудование для фотолитографии, жидкого травления/очистки полупроводниковых пластин, фотошаблонов, компакт-дисков-CD, подложек.

ИНТЕХ имеет контакты с фирмой **Limited**

— оборудование для ионной имплантации, вакуумного напыления и распыления.

ИНТЕХ поможет в приобретении технологического оборудования **Second hand**.

Специальные и вспомогательные материалы для микроэлектроники, полупроводниковой, пленочной и гибридной техники от ведущих мировых производителей:

Hoechst AG — резисты для фото- и электронной литографии, особо чистые химические реактивы, системы очистки и транспорта жидких химикатов;

Heraeus Quarzglas GmbH — кварцевые трубы и носители, загрузки, лабораторные кварцевые приборы, нагревательные элементы;

Balzers Limited — подложки для фотошаблонов, мишени из металлов.

На основе контактов с посредническими фирмами, например **W.I.H.C. Erfurt** **ИНТЕХ** окажет помощь в приобретении любых других материалов.

Лицензии, технологический know how, проектирование и сооружение производственных линий, кооперация.

Экология, защита окружающей среды в микроэлектронике.

Товарищество с ограниченной ответственностью ИНТЕХ приглашает к сотрудничеству в указанных областях и готово рассмотреть любые предложения на основе взаимной выгоды.

125565, Moskau,
Flotskaja ul., 1
Russische Foderation
Tel./Fax: (095) 465-10-01

125565, Москва,
Флотская ул., 1,
Российская Федерация.
Тел./Факс (095) 456-10-01

Телетайп ЭВДА 101049

Факс 27103

Телефоны:

Отдел сбыта: 74133; 21221

Отдел главного технолога: 74048; 21221; 21616

Отдел главного конструктора: 74042

Заместитель директора по общим вопросам: 74002; 20169

399740

г. Елец,
АО "Энергия"



АО · Э · Н · Е · Р · Г · И · Я

Е · Л · Е · Ц

ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ
ЭЛЕМЕНТЫ
И БАТАРЕИ

ГАРАНТИЙНЫЙ СРОК ХРАНЕНИЯ 9 МЕСЯЦЕВ
НОМИНАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ 7 ВОЛЬТ

**БАТАРЕЯ
5МЦ376Я**

ДАТА ИЗГОТОВЛЕНИЯ:

ХРАНЕНИЯ 9 МЕСЯЦЕВ
НАПРЯЖЕНИЕ 15 ВОЛЬТ

376Я

**БАТАРЕЯ
ПРИБОЙ-2С**

20 09 92 821

ИНСТРУКЦИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ

БАТАРЕЯ
15-10-У-13

БАТАРЕЯ
25-ПМЦГУ-3004

СДЕЛАНО В СССР

2-02

