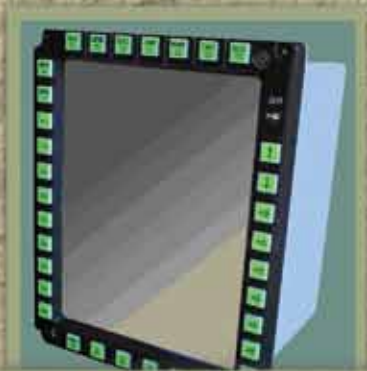


# Технология и конструирование в электронной аппаратуре



К статье  
«Жидкокристаллические мониторы  
для авиационной техники»

## 3(81) 2009

**Издательство «Политехперіодика»**  
представляет международный научно-технический журнал

## Техника и приборы СВЧ

Основан в 2007 г.

Зарегистрирован в ВАК Украины  
по разделу технических наук

Периодичность — 2 номера в год.  
Индекс 99584 в «Каталоге изданий Украины»

### Тематические рубрики:

Техническая политика  
Антенные и приемные устройства  
Электровакуумные приборы  
Твердотельные модули, приборы и устройства СВЧ  
Усилительные модули СВЧ  
Пассивные устройства и компоненты  
Проектирование и моделирование модулей СВЧ  
Применение техники СВЧ  
Измерительная аппаратура  
Техника СВЧ в биологии и медицине  
Надежность, долговечность  
Применение приборов и устройств нанoeлектроники  
Материалы и технология изготовления приборов СВЧ  
Развитие отрасли: исторический аспект



Рекомендации авторам по подготовке рукописей, в том числе по их оформлению, можно  
найти на сайте [www.tkea.com.ua](http://www.tkea.com.ua) или запросить в редколлегию по e-mail: [ndiorion@tsua.net](mailto:ndiorion@tsua.net)

Почтовый адрес издательства: Украина, 65044, г. Одесса-44, а/я 17.

E-mail: [tkea@optima.com.ua](mailto:tkea@optima.com.ua), web-сайт: [www.tkea.com.ua](http://www.tkea.com.ua),  
тел. +38 (048)728-18-50, 728-11-89, тел./факс 728-49-46

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ»

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер КВ 13418-2302ПР

Зарегистрирован в ВАК по разделам «Физико-математические науки», «Технические науки»  
Реферируется в УРЖ «Джерело» (г. Киев) и в Реферативном журнале ВИНТИ (г. Москва)



### ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

**В Украине** Отделения связи. «Каталог изданий Украины». Индекс 23785.  
Подписное агентство «Идея», [www.idea.com.ua](http://www.idea.com.ua). Индекс 11146.  
Подписное агентство «KSS», [www.kss.kiev.ua](http://www.kss.kiev.ua). Индекс 20363.  
**В России** Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141.  
**В Белоруссии** Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ». Индекс 71141.  
**В редакции «ТКЭА»** можно подписаться с любого номера.

Адрес редакции: Украина, 65044, г. Одесса, а/я 17.

E-mail: [tkea@optima.com.ua](mailto:tkea@optima.com.ua), web-сайт: [www.tkea.com.ua](http://www.tkea.com.ua),  
тел. +38 (048)728-18-50, 728-11-89,  
тел./факс 728-49-46.

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко, Н. М. Колганова,  
М. Г. Минкумская, М. С. Назарова.

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корещкая.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Журнал издается при поддержке  
ЗАО «Укрналит», НИИ «Орион»,  
ОАО «Меридиан» им. С. П. Королёва  
(г. Киев),  
НПП «Карат» (г. Львов),  
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.  
Печ. л. 8,0+1,0. Уч.-изд. л. 11,0. Тираж 500 экз. Заказ № 126.  
Издательство «Политехперіодика»  
(65044, г. Одесса-44, а/я 17).  
Отпечатано в типографии издательства «ART-V»  
(65091, г. Одесса, ул. Комитетская, 24а).

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР**

*К.т.н. В. М. Чмиль*

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

*К.т.н. Н. М. Вакив* (г. Львов)  
*Д.т.н. В. Н. Годованюк* (г. Черновцы)  
*К.т.н. А. А. Даиковский* (г. Киев)  
*Н. В. Кончиц* (г. Киев)  
*Д.т.н. В. П. Малахов* (г. Одесса)  
*Д.ф.-м.н. В. Ф. Мачулин* (г. Киев)  
*Д.т.н. М. К. Можар* (г. Киев)  
*В. А. Проценко* (г. Киев)  
*Е. А. Тихонова* (г. Одесса)

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

*Д.т.н. С. Г. Антошук* (г. Одесса)  
*Д.т.н. А. А. Ацеулов* (г. Черновцы)  
*Д.т.н. В. В. Баранов* (г. Минск)  
*К.т.н. Э. Н. Глушеченко*,  
зам. гл. редактора (г. Киев)  
*Д.т.н. В. В. Данилов* (г. Донецк)  
*Д.т.н. В. Т. Дейнега* (г. Одесса)  
*Д.ф.-м.н. В. А. Дроздов* (г. Одесса)  
*К.т.н. И. Н. Еримичой*,  
зам. гл. редактора (г. Одесса)  
*К.т.н. А. А. Ефименко*,  
ответственный секретарь (г. Одесса)  
*Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк* (г. Киев)  
*Д.т.н. С. Ю. Лузин* (г. С.-Петербург)  
*К.т.н. И. Л. Михеева* (г. Киев)  
*К.т.н. Ю. Е. Николаенко* (г. Киев)  
*Д.ф.-м.н. В. В. Новиков* (г. Одесса)  
*К.ф.-м.н. А. В. Рыбка* (г. Харьков)  
*К.т.н. В. В. Рюхтин* (г. Черновцы)  
*Д.ф.-м.н. М. И. Самойлович* (г. Москва)  
*Д.т.н. В. С. Ситников* (г. Одесса)  
*Д.х.н. В. Н. Томашик* (г. Киев)  
*Д.ф.-м.н. О. И. Шпотюк* (г. Львов)

**УЧРЕДИТЕЛИ**

Министерство промышленной политики  
Украины  
Институт физики полупроводников  
им. В. Е. Лашкарёва  
Научно-производственное  
предприятие «Сатурн»  
Одесский национальный  
политехнический университет  
Издательство "Политехперіодика"

Одобрено к печати Ученым советом ОНПУ  
(Протокол № 9 от 26.05 2009 г.)

**Электронные средства: исследования, разработки**

Непаяные контактные соединения в электронных печатных узлах.  
*Ефименко А. А., Собченко Д. Л.* 3

Моделирование электрических характеристик и расчет конструк-  
тивных параметров кремниевого стабилитрона с напряжением ста-  
билизации 6,5 В. *Дудар Н. Л., Сякерский В. С., Корытко Н. Н.* 10

К вопросу о минимизации числа межслойных переходов при трасси-  
ровке печатных плат. *Лузин С. Ю., Петросян Г. С., Полубасов О. Б.* 13

**Микропроцессорные устройства и системы**

Умножитель/делитель с повышенным быстродействием. *Синегуб Н. И.* 16

**Энергетическая электроника**

Кремний мультипористой текстуры для фотоэлектрических преоб-  
разователей солнечной энергии. *Ерохов В. Ю., Дружинин А. О.* 21

**Сенсоэлектроника**

Датчик угла поворота генераторного типа с элементом на поверх-  
ностных акустических волнах. *Летих Я. И.* 24

**Функциональная микро- и нанoeлектроника**

Квантовое ограничение закона Мура. *Джеймс Р. Пауэлл* 26

Арсенид-галлиевые  $p^+-n-p^+$ -структуры с обедняемой базовой об-  
ластью. *Каримов А. В., Ёдгорова Д. М., Абдулхаев О. А.* 28

Жидкокристаллические мониторы для авиационной техники. *Ковален-  
ко Л. Ф., Жураковский И. Ю., Сташевский В. В., Севастьянов В. В.* 32

**Технологические процессы и оборудование**

Формирование МОП-транзисторов с изоляцией активных элементов  
окисленным пористым кремнием. *Новосядлый С. П., Вивчарук В. М.* 35

Прибор и методы измерения параметров и степени однородности  
пленочных структур. *Макара В. А., Одарич В. А., Кепич Т. Ю., Пре-  
ображенская Т. Д., Руденко О. В.* 40

**Материалы электроники**

Прогнозирование параметров стеклокерамики со стеклокристал-  
лической матрицей для разных соотношений компонентов и режи-  
мов спекания. *Дмитриев М. В., Еримичой И. Н., Панов Л. И.* 47

Разработка сцинтилляторов на основе соединений  $A^{IV}B^{VI}$  для меди-  
цинского и технического радиационного приборостроения. *Стар-  
жинский Н. Г., Зеня И. М., Катрунов К. А., Рыжиков В. Д.* 51

**Метрология. Стандартизация**

От аттестации к мотивации. *Рудковский В. Н., Пик В. Н.* 59

**Библиография**

Анотации к статьям номера 62

Новые книги 20, 39, 61

В портфеле редакции 25

**Выставки. Конференции** 25, 58, 61, 3-я, 4-я стр. обл.

## ЗМІСТ

### Електронні засоби: дослідження, розробки

Непаяні контактні з'єднання в електронних друкованих вузлах. *Єфіменко А. А., Собченко Д. Л.* (3)

Моделювання електричних характеристик та розрахунок конструктивних параметрів кремнієвого стабілітрона з напругою стабілізації 6,5 В. *Дудар Н. Л., Сякерський В. С., Коритко М. М.* (10)

До питання про мінімізацію числа міжшарових переходів при трасуванні плат. *Лузін С. Ю., Петросян Р. С., Полубасов О. Б.* (13)

### Мікропроцесорні пристрої та системи

Помножувач/ділильник з підвищеною швидкодією. *Синегуб М. І.* (16)

### Енегетична електроніка

Кремній мультипористої текстури для фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії. *Єрохов В. Ю., Друзинін А. О.* (21)

### Сенсоелектроніка

Датчик кута повороту генераторного типу з елементом на поверхневих акустичних хвилях. *Леніх Я. І.* (24)

### Функціональна мікро- та наноелектроніка

Квантове обмеження закону Мура. *Джеймс Р. Пауел* (26)  
Арсенід-галієві  $p^+-n-p^+$ -структури з базовою областю, що збіднюється. *Каримов А. В., Йодгорова Д. М., Абдулхаєв О. А.* (28)

Рідкокристалічні монітори для авіаційної техніки. *Коваленко Л. Ф., Жураківський І. Ю., Сташевський В. В., Севастьянов В. В.* (32)

### Технологічні процеси та обладнання

Формування МОН-транзисторів з ізоляцією активних елементів окисленням пористим кремнієм. *Новосядлий С. П., Вівчарук В. М.* (35)

Прилад і методи вимірювання параметрів і ступеню однорідності плівкових структур. *Макара В. А., Одарич В. А., Кепич Т. Ю., Преображенська Т. Д., Руденко О. В.* (40)

### Матеріали електроніки

Прогнозування параметрів склокераміки із склокристалічною матрицею для різних співвідношень компонентів і режимів спікання. *Дмитрієв М. В., Єрмічой І. М., Панов Л. І.* (47)

Розробка сцинтиляторів на основі сполук  $A^{II}B^{VI}$  для медичного і технічного радіаційного приладобудування. *Старжинський М. Г., Зеня І. М., Катрунов К. А., Рижиков В. Д.* (51)

### Метрологія. Стандартизація

Від атестації до мотивації. *Рудковський В. М., Пік В. М.* (59)

## CONTENT

### Electronic means: investigations, development

Non-soldering contact connections for electronic printed circuit boards. *Yefimenko A. A., Sobchenko D. L.* (3)

The electric characteristics simulation and structural parameters calculation of Si based stabilatron with stabilizing voltage 6.5 V. *Dudar N. L., Syakerskiy V. S., Koritko N. N.* (10)

On minimizing the number of vias while routing printed circuit boards. *Luzin S. Yu., Petrosjan G. S., Polubasov O. B.* (13)

### Microprocessor devices and systems

Multiplier/divisor with rapid action. *Sinegub N. I.* (16)

### Power electronics

Porous silicon multitexture for photoelectric converter structures of solar energy. *Yerokhov V. Yu., Druzinin A. O.* (21)

### Sensoelectronics

The turn angle gauge of generating type with an element on surface acoustic waves. *Lepikh Ya. I.* (24)

### Functional micro- and nanoelectronics

Quantum restriction of the Moore law. *J. R. Pauell* (26)

Gallium arsenide  $p^+-n-p^+$ -structures with impoverished base area. *Karimov A. V., Yodgorova D. M., Abdulkhaev O. A.* (28)

Liquid crystal displays for aircraft engineering. *Kovalenko L. F., Zhurakovskiy I. Y., Stashevskiy V. V., Sevastyanov V. V.* (32)

### Technological processes and equipment

Formation of MOP-transistors with isolation of active elements by oxiden porous silicon. *Novosyadlyi S. P., Vivcharuk V. M.* (35)

Apparatus and methods for measuring of the film structures homogeneity degree. *Makara V. A., Odarych V. A., Kepich T. Y., Preobragenskaya T. D., Rudenko O. V.* (40)

### Materials of electronics

Forecasting of the parameters of glass-ceramics with glass-crystalline matrix for different proportions of components and sintering regimes. *Dmitriev M. V., Yerimichoy I. N., Panov L. I.* (47)

Development of scintillators on the basis of  $A^{II}B^{VI}$  compounds for radiation instruments used in medical and technical applications. *Starzhinskiy N. G., Zenya I. M., Katrunov K. A., Ryzhikov V. D.* (51)

### Metrology. Standartization

From appraisal to motivation. *Rudkovsky V. N., Pik V. N.* (59)

К.т.н. А. А. ЕФИМЕНКО, Д. Л. СОБЧЕНКО

Украина, Одесский национальный политехнический университет  
E-mail: aiefimen@gmail.com

Дата поступления в редакцию  
25.12 2008 г.

Оппонент д. т. н. С. Ю. ЛУЗИН  
(ООО «Эремекс», г. Санкт-Петербург)

## НЕПАЯНЫЕ КОНТАКТНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПЕЧАТНЫХ УЗЛАХ

*Рассмотрены варианты конструкторской реализации контактных электрических соединений выводов электронных компонентов в электронных печатных узлах без использования процесса пайки.*

Технологии монтажа электронных компонентов пайкой на печатные платы (ПП) присущ ряд недостатков, связанных со сложностью оборудования, большой энергоемкостью, экологической небезопасностью. К тому же, паяные соединения не обладают достаточной надежностью. Следует добавить, что технологический процесс пайки усложняется с принятием решения ЕвроСоюза, согласно которому электронное оборудование, а также электронные компоненты, поставляемые в страны ЕС, не должны содержать свинец. Введение бессвинцовой технологии пайки вызывает дополнительные проблемы, связанные с повышением температуры пайки.

Если проанализировать техпроцессы монтажа компонентов, можно прийти к выводу, что проблемы, в основном, связаны именно с пайкой. Естественно, возникает вопрос, а нельзя ли обойтись без нее? В настоящее время не случайно широкое распространение получили методы непаяного монтажа проводных электрических соединений в связи с их эффективностью (технологичность, производительность, надежность, экологическая чистота) [1—3].

Технологию монтажа печатных узлов непаяные методы также не обошли стороной. Но на сегодняшний день контактные соединения составляют лишь незначительную часть, хотя разработок в этом направлении достаточно много. Основные причины этого — значительные, в зависимости от используемых методов, размеры контактов, не позволяющие в полной мере реализовать все возможности микронной аппаратуры, и сложные технологические процессы, осуществить которые могут далеко не все предприятия.

Целью настоящей статьи является попытка ознакомить разработчиков электронной аппаратуры с такими методами — от широко известных и используемых в международных масштабах до фирменных разработок, которые известны ограниченному кругу специалистов.

Авторы надеются, что такое комплексное представление информации послужит дальнейшему развитию непаяных методов монтажа электронных компонентов на ПП.

Конструкции непаяных контактных соединений на печатных платах можно классифицировать следующим образом:

— контактные соединения, выполненные методом «press-fit» (прессовая посадка выводов компонентов в металлизированные отверстия ПП);

— контактные соединения, образованные за счет прижима под определенным давлением выводов компонентов к контактным площадкам ПП;

— контактные соединения, образованные за счет наращивания металла на выводы компонентов.

### Контактные соединения, выполненные методом «press-fit»

Этот метод возник в связи с необходимостью монтажа многоконтактных соединителей на ПП, хвостовики выводов которых одновременно должны были использоваться в качестве рабочей части штырей вилок или для накрутки проводов (рис. 1). Такие хвостовики во время монтажа не должны подвергаться действию припоя.

В первоначальной конструкции контактного соединения методом «press-fit» использовался хвостовик вывода соединителя прямоугольного сечения с диагональю, несколько большей диаметра металлизированного отверстия (рис. 2). Однако такое соединение требует соблюдения очень точных размеров штыря в поперечном сечении и диаметра металлизированного отверстия, что особенно трудно. В противном случае либо не выполняется условие обеспечения пластической деформации и удержания герметичности контактной зоны, либо в процессе запрессовки может повреждаться слой металлизации в отверстии. По этой причине появились разные конструктивные исполнения запрессовываемых штырей. Однако во всех случаях целью было создание упругого контакта, который, с одной стороны, должен обеспечивать требуемое давление при контактировании со стенками металлизированного отверстия, а с другой — образовывать некий компенсатор, который не позволил бы этому усилию превысить критическую величину, что таким образом предотвратит разрушение металлизированного отверстия.

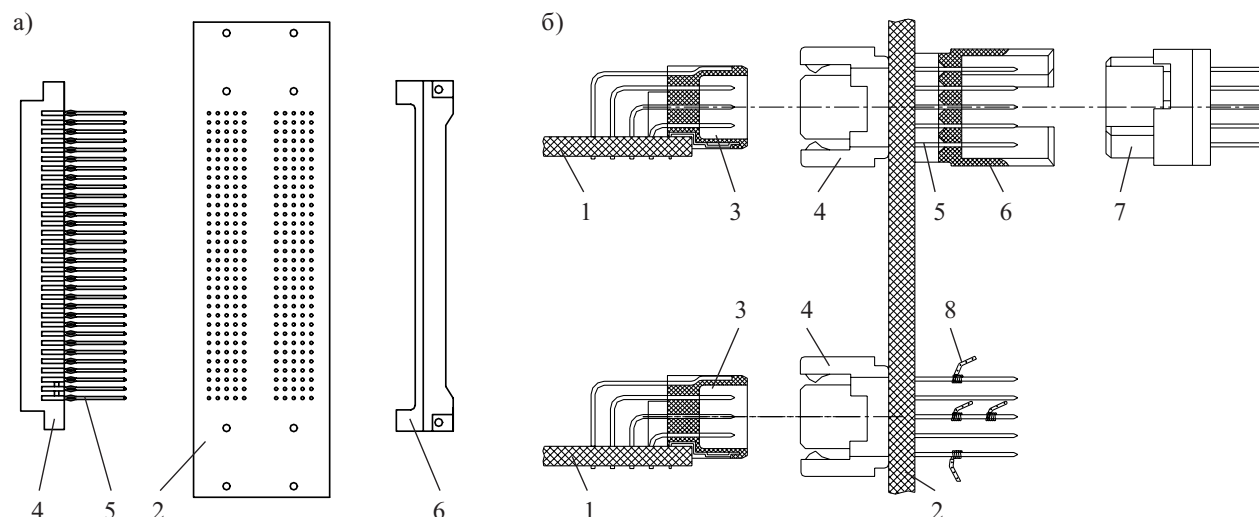


Рис. 1. Электрические соединители до монтажа (а) и после монтажа (б):

1 — ПП электронного модуля; 2 — соединительная ПП; 3 — вилка соединителя; 4 — розетка соединителя; 5 — хвостовик вывода розетки — контактный штырь вилки; 6 — колодка, предназначенная для образования вилки; 7 — розетка; 8 — контактное соединение накруткой

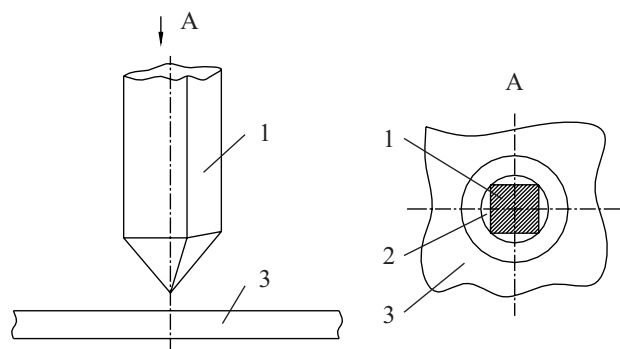


Рис. 2

1 — хвостовик вывода; 2 — металлизированное отверстие; 3 — основание ПП

Наиболее известным является конструктивное решение запрессовываемого контакта под названием «игольное ушко». Таким «ушком» является продольное отверстие в штыре, которое позволяет изменять размер контакта в поперечном сечении и таким образом компенсировать излишнее усилие при запрессовке контактов (рис. 3).

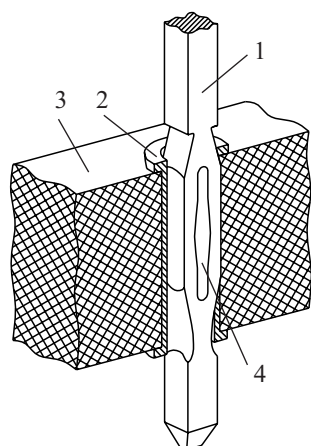


Рис. 3. Контакт, запрессованный в металлизированное отверстие ПП: 1 — запрессовываемый контакт; 2 — контактная площадка на металлизированном отверстии; 3 — основание ПП; 4 — отверстие типа «игольное ушко»

Такие контакты широко используются и в настоящее время ведущими фирмами, выпускающими электрические соединители [4, 5].

Существует достаточное количество вариантов формы контактов для запрессовки в металлизированные отверстия ПП. Некоторые из них, наиболее часто используемые в соединителях, представлены на рис. 4 [6]. Здесь и на других рисунках раздела обозначено: 1 — запрессовываемый контакт; 2 — металлизированное отверстие; 3 — основание ПП; 4 — контактная площадка.

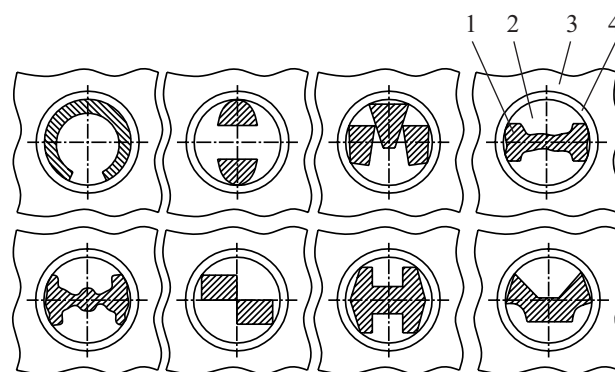


Рис. 4. Поперечное сечение рабочей части контактов для запрессовки различной формы

Форма контактов выбирается такой, чтобы компенсировать размерные погрешности отверстий. При запрессовке они подвергаются упругой и отчасти пластической деформации. Соотношение этих видов деформации и, соответственно, надежность контактных соединений определяется такими конструктивными факторами как соотношение размеров контакта и металлизированного отверстия и форма поперечного сечения контакта, в том числе количество контактных точек. Большая поверхность контакта усложняет процесс запрессовки, малая — снижает надежность контактного соединения. Компромиссным решением

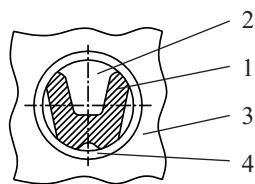


Рис. 5. Контакт в форме лодочки

может быть увеличение количества контактных точек при относительно небольшой площади контактирования.

На рис. 5 представлена V-образная форма сечения контакта со скругленными краями. Контакт имеет форму лодочки, на дне которой расположены два параллельных кия. При запрессовке образуется четыре контактных участка [7].

Ниже, на рис. 6 приведен вариант конструктивно выполнения контактного штыря П-образного сечения в средней части, которая запрессовывается в металлизированное отверстие ПП. Особенностью контакта является то, что при его запрессовке боковые поверхности деформируются, принимают форму поверхности отверстия и таким образом надежно фиксируются в нем [8].

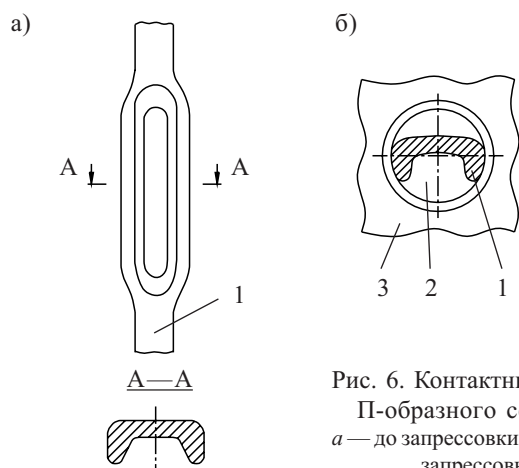


Рис. 6. Контактный штырь П-образного сечения:  
а — до запрессовки; б — после запрессовки

На рис. 7 представлена конструкция контакта для надежного электрического соединения его упругой монтажной части с металлизированным отверстием ПП [9].

В монтажной части контакта круглого сечения при запрессовке производится относительный сдвиг по диаметральной плоскости обеих половинок контакта. Внешний размер упругих половинок до запрессовки превышает диаметр металлизированного отверстия ПП

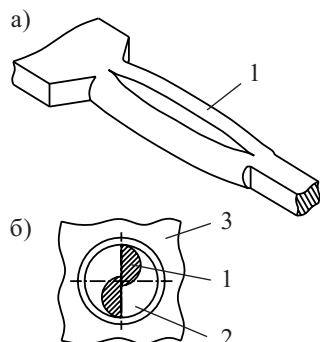


Рис. 7. Контактный штырь круглого сечения:  
а — до запрессовки; б — после запрессовки

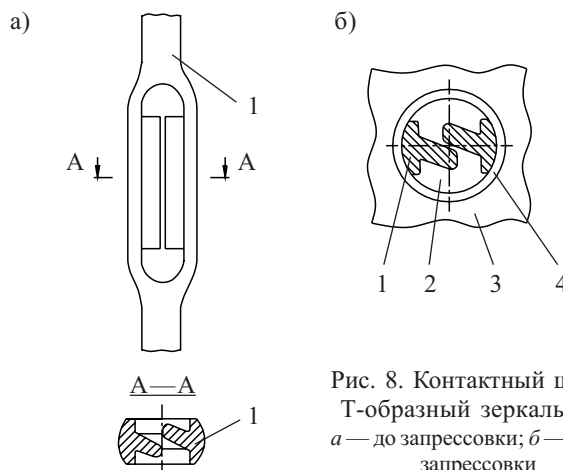


Рис. 8. Контактный штырь Т-образный зеркальный:  
а — до запрессовки; б — после запрессовки

— таким образом гарантируется электрическое соединение контакта с ПП. В то же время, подвижность половинок контакта не приводит к разрушению слоя металлизации в отверстии при запрессовке контакта.

Аналогичное конструктивное решение имеет контакт, представленный на рис. 8 [10].

Надежное электрическое соединение контакта с металлизированным отверстием ПП обеспечивается за счет упругой деформации утолщенного центрального участка контакта, который имеет поперечное сечение в виде пары зеркально расположенных Т-образных фигур.

На рис. 9 [11] представлены два варианта конструкции штыревых контактов, также предназначенных для запрессовки в металлизированные отверстия печатных плат утолщенным участком, который образуется путем раздвоения части контакта узкой продольной щелью и скругления углов на этом участке (вариант а). В результате поперечное сечение утолщения приобретает форму пары радиально расположенных симметричных секторов круга, отделенных друг от друга по дуге на 20—30°.

Надежное электрическое соединение контактного штыря с металлизированным отверстием ПП достигается за счет упругой деформации утолщенного центрального участка штыря.

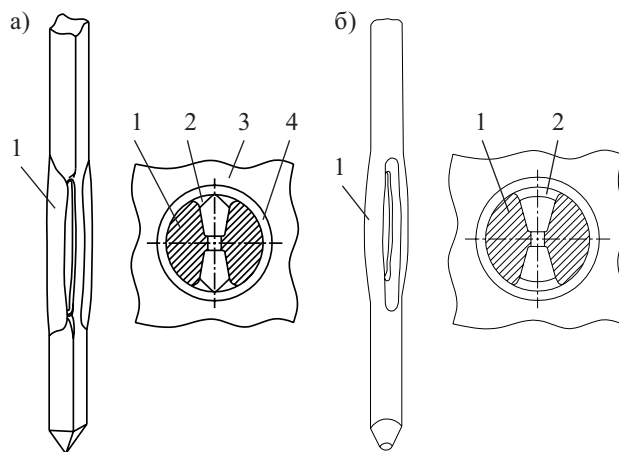


Рис. 9. Контактные штыри квадратного (а) и круглого (б) сечения с утолщенной центральной частью

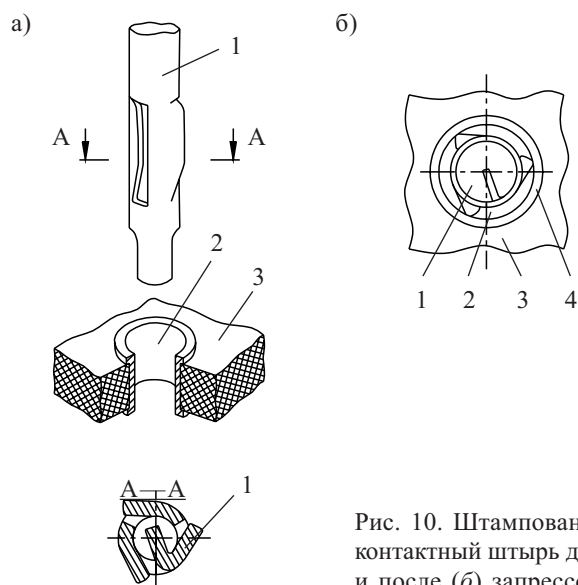


Рис. 10. Штампованный контактный штырь до (а) и после (б) запрессовки

Особенностью контактного штыря, представленного на **рис. 10**, является то, что изготавливается он штамповкой из листового материала. Контактное электрическое соединение образуется за счет пластической деформации металлизированного отверстия ПП элементами штыря [12].

Контакт имеет цилиндрическое утолщение в средней части с тремя эластичными отогнутыми наружу лепестками. Последние создают с металлизированным отверстием печатной платы газонепроницаемое электрическое соединение.

Многообразие конструктивных решений контактных соединений штырей с металлизированными отверстиями печатных плат позволяет сравнивать их по различным критериям. При этом особое значение имеет критерий надежности. Надежность зависит от многих факторов, в том числе и от мер по предотвращению возможного разрушения контактов.

На **рис. 11** представлено контактное соединение штыря с металлизированным отверстием ПП [13].

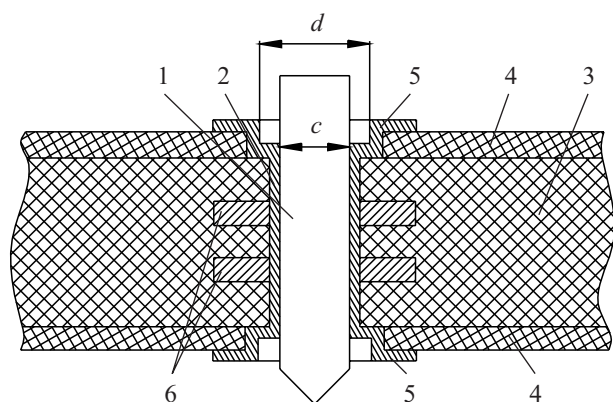


Рис. 11. Контактное соединение повышенной надежности: 1 — контактный штырь; 2 — металлизированное отверстие; 3 — основание ПП из стеклотекстолита; 4 — дополнительные слои основания ПП из смолы; 5 — внешние контактные площадки; 6 — внутренние контактные площадки

Конструкция обеспечивает повышенную надежность контактного соединения за счет предотвращения разрушения металлизированного отверстия в течение продолжительного времени работы. Это решается за счет использования дополнительных слоев из смолы, имеющей пониженное механическое сопротивление, а также ступенчатой формы отверстия, когда диаметр на входе и выходе отверстия ( $d$ ) больше диаметра в основной части отверстия ( $c$ ).

Следует обратить внимание на одну из последних разработок контактов для запрессовки — контакт Multispring, предложенный компанией Molex (**рис. 12**) [6]. Форма контакта учитывает недостатки предыдущих вариантов и, в первую очередь, предназначена для использования в электрических соединителях, соответствующих стандарту DIN 41612.

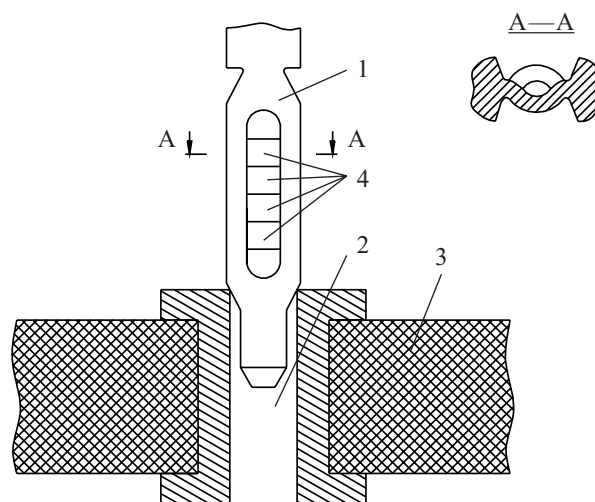


Рис. 12. Контакт Multispring:

1 — запрессовываемый контакт; 2 — металлизированное отверстие; 3 — основание печатной платы; 4 — подпружиненные элементы

Качество электрического контактирования очень сильно зависит от допустимых отклонений сопрягаемых линейных размеров контактных штырей и металлизированных отверстий ПП. В описываемой разработке [6] при диаметре металлизированного отверстия 1 мм допускаются предельные отклонения  $+0,09$  мм и  $-0,06$  мм, что значительно повышает вероятность получения качественных соединений. Этот показатель соответствует лучшим конструктивным вариантам контактных соединений [4, 5].

Особенностью этой разработки является применение четырех подпружиненных элементов (рис. 12). За счет них обеспечиваются следующие преимущества и показатели контактных соединений:

- герметичность соединения, что положительно сказывается на долговременной стабильности контактного сопротивления;
- минимальный риск образования механических повреждений при запрессовке;
- надежное удержание в ПП;
- высокая устойчивость к вибрациям;
- возможность неоднократной установки одного и того же контакта в ПП.

Известны и другие конструктивные решения электрических контактных соединений, которые образуются запрессовкой контактных штырей в металлизированные отверстия ПП [14, 15].

Общей особенностью всех рассмотренных вариантов контактных соединений являются достаточно большие размеры, что ограничивает их применение в качестве выводов миниатюрных электронных компонентов.

### Контактные соединения, образованные за счет прижима

Соединения такого рода образуются за счет плотного соприкосновения контактирующих поверхностей. Качество контакта, как известно, зависит от эффективной площади контактирования множества точек и силы прижима контактирующих поверхностей. В зависимости от того, как реализуются эти факторы, существует несколько конструктивных вариантов контактных соединений на ПП без использования пайки:

— для увеличения эффективной площади контактирования в качестве компенсатора неплоскостности контактирующих поверхностей используется эластомерный вкладыш;

— в качестве промежуточного контактного элемента, и в то же время компенсатора неплоскостности, используется эластомерный брусок с токопроводящими областями;

— для значительного увеличения локального контактного давления используется прижим с врезанием.

Наиболее часто применяются контактные соединения первой группы — с использованием эластичных вкладышей.

В качестве примера на рис. 13 представлено конструктивное решение электрического соединения печатных плат

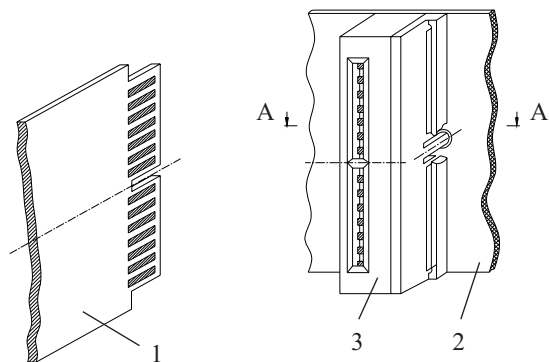
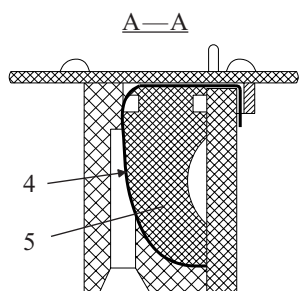


Рис. 13. Электрическое соединение печатных плат соединителем, монтируемым без пайки:

1 — ПП электронного модуля; 2 — соединительная ПП; 3 — розетка соединителя; 4 — групповой контактный элемент на основе гибкого печатного кабеля; 5 — эластичный вкладыш



чатных плат посредством соединителя, монтируемого без пайки [16].

Печатная плата электронного модуля 1 и соединительная плата 2 электрически соединяются посредством розетки 3, в которой в качестве группового контактирующего элемента используется гибкий печатный кабель 4 с расположенными на нем токопроводящими дорожками-контактами. Контакты прижимаются к аналогичным дорожкам-контактам: с одной стороны — на ПП 1, с другой стороны — на соединительной ПП 2. Эластичный вкладыш 5 выполняет роль компенсатора неплоскостности контактирующих поверхностей и создает относительно равномерное давление в местах контактных соединений. Таким образом создаются условия для образования газонепроницаемых соединений с большой площадью контактирования и необходимым давлением.

Использование эластомерного бруска с токопроводящими областями. Такое конструктивное решение электрического соединения электронных компонентов с печатной платой появилось в связи с необходимостью соединять тонкопленочные контактные площадки малогабаритных бескорпусных жидкокристаллических индикаторов с контактными площадками ПП (рис. 14).

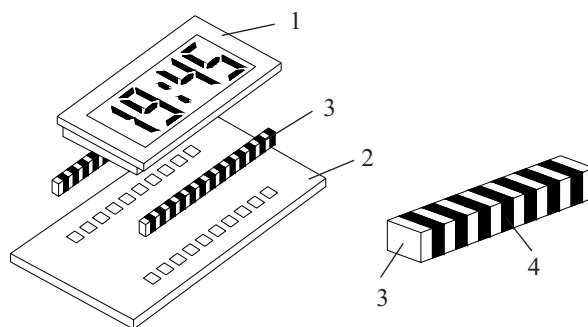


Рис. 14. Электрическое соединение контактирующих поверхностей с помощью эластомерного бруска:

1 — электронный компонент (индикатор); 2 — коммутационная ПП; 3 — эластомерный брусок; 4 — токопроводящая область

Проблема состояла в невозможности выполнения пайкой надежного контактного соединения напыленных на подложке индикатора контактных площадок с контактными площадками ПП напрямую или посредством проводников.

Эту проблему решает использование эластомерных брусков с токопроводящими областями, которые электрически соединяют расположенные напротив контактные площадки ПП и индикатора. Свойство эластичности материала бруска позволяет скомпенсировать все неровности и создать надежные газонепроницаемые контактные соединения.

Очевидно, что такое конструктивное решение требует применения дополнительных контактных элементов (эластомерных брусков), а большей частью — и крепежных элементов, однако решена важная задача электромонтажа бескорпусных электронных компонентов в миниатюрной электронной аппаратуре без

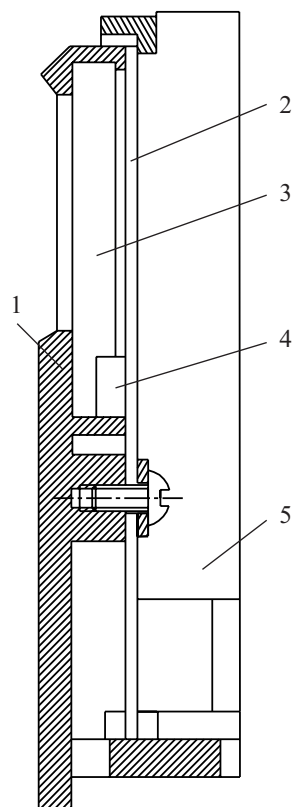


Рис. 15. Установка и монтаж ЖКИ в радиоэлектронном блоке:  
1 — передняя панель с окном; 2 — ПП; 3 — ЖКИ; 4 — эластомерный брусочек; 5 — рамка для крепления

использования пайки и с обеспечением ремонтопригодности.

Примером использования этого конструктивно-технологического решения является установка жидкокристаллического индикатора 3 в радиоэлектронном блоке (рис. 15) [17], который монтируется на ПП 2 с использованием эластомерного бруска 4. При этом обеспечивается расположение ЖКИ в окне передней панели блока 1, а механическое крепление всей этой структуры выполняется с помощью рамки 5 и винтовых соединений.

**Прижим с врезанием.** Пример контактного соединения вывода (это может быть вывод электронного компонента) с контактной площадкой односторонней ПП (а) и двухсторонней ПП (б) представлен на рис. 16 [18].

В этом конструктивном варианте соединения имеется направляющая выступающая заостренная часть

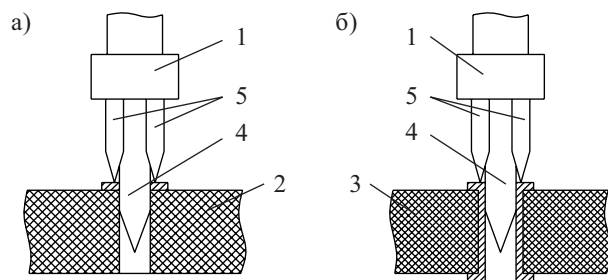


Рис. 16. Контактное соединение с врезанием:  
1 — контактный вывод; 2 — односторонняя ПП; 3 — двухсторонняя ПП; 4 — направляющая часть вывода; 5 — контактирующие части вывода

4, которая входит в обычное либо металлизированное отверстие ПП. Множество копьевидных частей 5, расположенных вокруг направляющей части, предназначено для образования множества точек контактирования с ПП путем врезания в контактную площадку под действием усилия прижима.

#### Контактные соединения, образованные за счет наращивания металла на выводы электронных компонентов

Речь идет о непосредственном присоединении проводников электронного блока к контактным площадкам интегральных схем (ИС), которые представлены в бескорпусном исполнении. Это можно осуществить благодаря технологии «внутреннего монтажа» [19—23]. Электрический монтаж, выполненный по этой технологии, имеет значительные преимущества: снижается влияние паразитных явлений, увеличивается быстродействие ИС и повышается их надежность.

Конструкция функционального модуля, выполненного по технологии «внутреннего монтажа», представлена на рис. 17 [20]. Основа модуля 1 из анодированного алюминия или керамики содержит прямоугольные отверстия 2, в которые вкладывают кристаллы ИС 3. Они фиксируются с помощью диэлектрического слоя, например полиимидной пленки 4, которая приклеивается к верхней плоскости основы и верхней стороне кристаллов, содержащих контактные площадки.

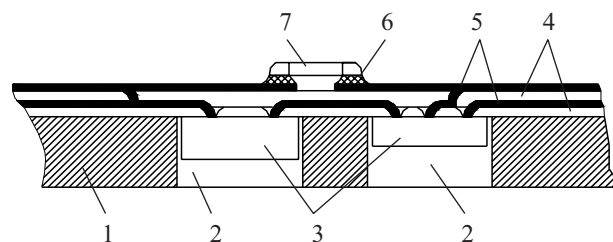


Рис. 17. Сечение функционального модуля с «внутренним монтажом»:

1 — основа модуля (металл, керамика); 2 — прямоугольные отверстия; 3 — кристаллы ИС; 4 — слой диэлектрика; 5 — токоведущие дорожки; 6 — галтель паяного соединения; 7 — пассивный электронный компонент

Методом ионного травления в полиимидной пленке формируются отверстия, которые вскрывают контактные площадки ИС. Далее, используя трафарет, прорези-линии которого соответствуют топологии слоя, формируют токоведущие дорожки 5 из меди методом сплошного напыления. Таким образом без пайки и сварки получается электрическое соединение контактных площадок ИС с токоведущими дорожками коммутационной платы 1.

Для создания второго и последующих коммутационных уровней вновь поочередно наносятся аналогичным образом диэлектрические и проводящие слои. При этом одновременно с формированием последующего уровня топологии платы формируются переходные соединения верхнего и нижнего уровней.

Пассивные электронные компоненты 7 монтируются на плату с помощью пайки.

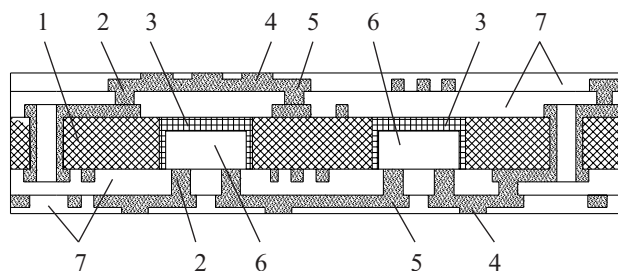


Рис. 18. Сечение функционального модуля с «внутренним монтажом» ИС на двухсторонней ПП:

1 — базовая двухсторонняя ПП; 2 — столбики для межуровневых соединений; 3 — наполнитель (эпоксидная смола); 4 — контактные площадки; 5 — токоведущие дорожки; 6 — ИС; 7 — полимерная пленка

Функциональный модуль, изготовленный по технологии «внутреннего монтажа», имеет, кроме указанных выше, неоспоримые преимущества по таким показателям как размеры, масса, виброустойчивость, экологичность.

Другим примером использования технологии «внутреннего монтажа» является конструктивно-технологическое решение функционального модуля с встраиванием электронного компонента в виде бескорпусной ИС в основание коммутационной платы (рис. 18) [23].

Здесь в базовой двухсторонней ПП 1, выполненной позитивным комбинированным методом, пробиваются прямоугольные отверстия, в которые контактными площадками вниз устанавливаются бескорпусные микросхемы 6 и фиксируются наполнителем 3.

В дальнейшем с обеих сторон платы создаются чередующиеся диэлектрические 7 и проводящие 5 слои, которые образуют дополнительные коммутационные уровни ПП, а также соединяют необходимые контактные площадки базовой ПП и ИС в общую коммутационную топологию функционального модуля.

\*\*\*

Непаяные конструкции электрических контактных соединений в электронных печатных узлах сегодня занимают небольшой объем в электромонтаже электронной аппаратуры. Но их отличительные свойства, позволяющие получать лучшие, по сравнению с паяными соединениями, технические и экономические показатели, дают основание прогнозировать эффективность расширения их дальнейшего использования.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Медведев А. Замечательные свойства непаяных неразъемных соединений // Печатный монтаж.— 2007.— № 6.— С. 2—9.

2. Гелль П. П., Иванов-Есипович Н. К. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры.— Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1984.

3. Ненашев А. П. Конструирование радиоэлектронных средств.— М.: Высшая школа, 1990.

4. Соединители DIN41612 // Каталог фирмы «Harting». Internet: <http://www.HARTING.com>.

5. Каталог продукции фирмы AMP. Internet: <http://www.amp.com>.

6. Волков М. Коннекторы Molex DIN 41612. Технология запрессовки // Chip News Украина.— 2005.— № 2.— С. 70—72.

7. Пат. 4795378 США. Контактный штырь / Motoyaki Tomira, Yasuhiro Okada.— 1989.

8. Пат. DE 3831508 A1 Германии. Эластичный прессовый штифт для соединения без пайки / R. Peerbooms.— 1990.

9. Пат. 4763408 США. Способ изготовления упругой монтажной части на хвостовике электрического контакта / Jay M. Heisey, Jon F. Kautz, Charles S. Pickles.— 1988.

10. Пат. 4759721 США. Запрессовываемый упругий штыревой контакт / James R. Moore, Rhonda I. Nemcovsky, Robert S. Orbanic.— 1988.

11. Пат. DE 3623453 A1 Германии. Штыревой контакт / O. Weber, H. Heim.— 1988.

12. Пат. 4735575 США. Электрический контакт печатных плат, методы изготовления и использование / Howard R. Shaffer.— 1988.

13. Пат. JP2000174406 Японии. Прессовая посадка вывода в структуре печатной платы и метод образования / Kinoshita Suketoshi.— 1999.

14. Пат. 4720276 США. Контакт зажимного типа / Toru Takahashi.— 1988.

15. Пат. 4737114 США. Штыревой электрический контакт / Hirokatsu Yaegashi.— 1988.

16. Пат. 9797 Украины. Разъем для печатных плат / А. А. Ефименко.— 1996.

17. Пат. 4904191 США. Контактное устройство с использованием эластомерного соединителя / Mark I. Munday, William P. Doby.— 1990.

18. Пат. JP2001015197 Японии. Контактный вывод для печатной платы / Kikuzawa Yasushi.— 2001.

19. Назаров Е. Недостатки технологии поверхностного монтажа электронных блоков: как от них избавиться раз и навсегда // Компоненты и технологии.— 2003.— № 6.— С. 14—15.

20. Назаров Е. Внутренний монтаж функциональных радиоэлектронных блоков // Электроника: наука, технология, бизнес.— 2008.— № 3.— С. 36—39.

21. Назаров Е., Кокорева И. Перспективные технологии производства радиоэлектронных блоков на печатных платах // Там же.— С. 30—35.

22. Черный Б., Черный А. Проблемы разработки и производства многокристальных модулей // Там же.— С. 40—43.

23. Пат. 2297736 России. Способ встраивания компонента в основание и формирования электрического контакта с компонентом / Туоминен Ристо.— 2006.

Н. Л. ДУДАР, В. С. СЯКЕРСКИЙ, Н. Н. КОРЫТКО

Республика Беларусь, г. Минск, НПО «Интеграл»  
E-mail: office@bms.byДата поступления в редакцию  
28.07 2008 г. — 14.04 2009 г.Оппонент д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ  
(НПО «Физика-Солнце», г. Ташкент)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЕВОГО СТАБИЛИТРОНА С НАПРЯЖЕНИЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ 6,5 В

*Предложена технология изготовления кремниевого стабилизатора. Определены удельное сопротивление подложки, режим диффузии фосфора в подложку, обеспечивающие требуемые значения напряжения стабилизации в заданном диапазоне температур.*

Стабилитроны [1], именуемые также опорными диодами, находят широкое применение как в дискретном исполнении, так и в составе интегральных схем различного назначения. Основные достоинства стабилизатора в том, что, по сравнению с обычными диодами, он имеет достаточно низкое регламентированное напряжение пробоя (при обратном включении) и может поддерживать уровень этого напряжения постоянным при значительном изменении величины обратного тока. Электрический пробой  $p$ - $n$ -перехода стабилизатора является обратимым. В основе работы стабилизатора лежат туннельный [2, 3] и лавинный [4] механизмы пробоя  $p$ - $n$ -перехода.

На сегодняшний день моделирование полупроводниковых структур занимает важное место при разработке и оптимизации технологии изготовления новых изделий электронной техники. С помощью моделирования можно оптимизировать режимы операций технологического маршрута, конструкцию и параметры электрических характеристик проектируемого элемента ИС или дискретного прибора, а также снизить затраты на изготовление экспериментальных образцов.

В данной работе приводятся результаты моделирования оригинального технологического процесса изготовления и электрических характеристик стабилизаторов с напряжением стабилизации  $U_{\text{ст}}=6,5\pm 0,5$  В при токе около 5 мА с активной площадью  $p$ - $n$ -перехода  $125\times 125$  мкм. Расчет параметров обратной ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) стабилизатора проводился для условий его работы при нормальной, а также при пониженной ( $-55^\circ\text{C}$ ) и повышенной ( $+150^\circ\text{C}$ ) температуре. Моделирование стабилизатора выполнялось с использованием программного пакета компании Synopsys [5] — одного из ведущих на мировом рынке распространителей программных средств, предназначенных для моделирования технологии/прибора/схемы. Моделирование технологиче-

ского маршрута осуществлялось при помощи программы двумерного физического моделирования технологии TSUPREM4, а расчет электрических характеристик исследуемого прибора проводился в среде Medici.

### Выбор и оптимизация конструкции стабилизатора

Для реализации стабилизатора с напряжением стабилизации  $U_{\text{ст}}=6,5\pm 0,5$  В при токе 5 мА была выбрана его конструкция, полученная путем диффузионного легирования фосфором кремниевой подложки  $p$ -типа. Перед созданием  $p$ - $n$ -перехода по его периметру было сформировано охранный кольцо  $n^+$ -типа также путем диффузионного легирования подложки фосфором и его последующей разгонки в течение достаточно длительного времени ( $\approx 100$  мин) в стандартной среде, используемой в производстве. Наличие охранного кольца предотвращает пробой структуры по периметру перехода, пробой происходит в плоской части  $p$ - $n$ -перехода. Во внутренней части охранного кольца диффузионным легированием фосфора формируют область  $n$ -типа с целью получения  $p$ - $n$ -перехода стабилизатора.

Оптимизация конструкции стабилизатора заключалась в выборе оптимальной конструкции охранных колец и глубины  $p$ - $n$ -перехода. Расчеты были проведены для подложек трех типов КДБ (кремний, легированный бором, дырочного типа проводимости) с удельным сопротивлением  $\rho_v=0,003; 0,004$  и  $0,005$  Ом·см при комнатной температуре и в условиях пониженной и повышенной температуры. Глубина области охранного кольца для подложки КДБ0,003 составила  $\approx 2$  мкм, а глубина залегания  $p$ - $n$ -перехода —  $\approx 0,31$  мкм.

### Выбор и оптимизация технологического маршрута изготовления стабилизатора

Технологический маршрут формирования структуры исследуемого кремниевого стабилизатора включает следующие операции:

- 1) формирование охранных колец  $n^+$ -типа посредством диффузионного легирования подложки  $p$ -типа фосфором и его последующей разгонки;
- 2) формирование  $p$ - $n$ -перехода тем же способом;
- 3) формирование межслойного окисла и вытравливание в нем контактных окон;
- 4) напыление металла для формирования контактов к областям  $n$ -типа.

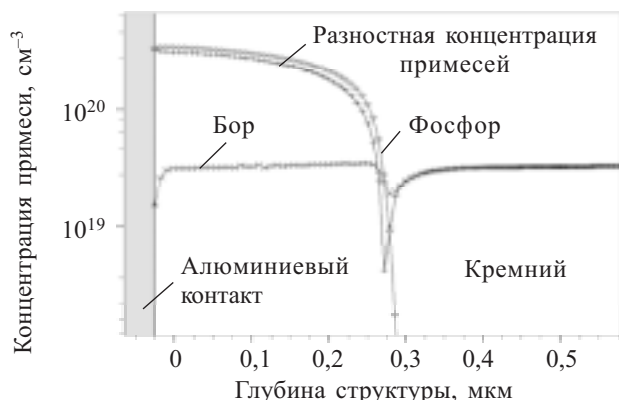


Рис. 1. Распределение концентрации примесей по структуре стабилитрона, полученное в результате моделирования диффузионного легирования фосфором подложки КДБ0,003

Полученные в результате моделирования технологического маршрута изготовления стабилитрона одномерные распределения концентрации примесей в плоскости поперечного сечения области  $p-n$ -перехода приведены на **рис. 1**. В данной работе необходимо было получить такие параметры технологического процесса изготовления, которые обеспечили бы требуемые значения напряжения стабилизации ( $6,5 \pm 0,5$  В) в диапазоне температуры  $-55$ — $+150^\circ\text{C}$ . Проведены расчеты напряжения стабилизации для различных режимов формирования активной области стабилитрона. Для получения требуемых значений  $U_{\text{ст}}$  был выбран оптимальный режим формирования  $p-n$ -перехода. Критериями оптимальности режима в данной работе являлись возможность применения стандартной, используемой в производстве, операции диффузионного легирования фосфором из неограниченного источника и получение требуемых значений  $U_{\text{ст}}$ . Вместо операций ионного легирования и последующей разгонки примеси (диффузия из ограниченного источника примеси) по причине большей дешевизны были выбраны операции диффузионного легирования. Как показали расчеты, для обеспечения требуемых значений напряжения стабилизации рекомендуется использовать подложку с удельным сопротивлением  $\rho_v = 0,003$  Ом·см, длительность операции диффузионного легирования фосфором при формировании  $p-n$ -перехода должна составлять около 25 мин. В качестве металла для формирования контакта к области  $n$ -типа стабилитрона был выбран алюминий, который является наиболее дешевым и широко используемым в электронике металлом, обладает хорошими электро- и теплопроводностью.

#### Результаты расчетов конструктивных параметров и значений напряжения стабилизации стабилитрона

Основную сложность при выполнении данной работы представляло получение с высокой точностью требуемых значений электрических параметров стабилитрона. Более того, описание процесса диффузионного легирования из неограниченного источника с помощью имеющихся программных средств затруднено из-за отсутствия в них точных моделей такой

Расчетные значения  $U_{\text{ст}}$  при токе 5 мА и  $R_{\text{диф}}$  стабилитронов при различной температуре окружающей среды

| Тип подложки | $-55^\circ\text{C}$         | $+27^\circ\text{C}$ | $+150^\circ\text{C}$ |
|--------------|-----------------------------|---------------------|----------------------|
|              | $U_{\text{ст}}, \text{В}$   |                     |                      |
| КДБ0,003     | 6,22                        | 6,17                | 6,09                 |
| КДБ0,004     | 5,9                         | 5,88                | 5,86                 |
| КДБ0,005     | 5,76                        | 5,77                | 5,81                 |
|              | $R_{\text{диф}}, \text{Ом}$ |                     |                      |
|              |                             |                     |                      |
| КДБ0,003     | 48                          | 60,8                | 73,6                 |
| КДБ0,004     | 48                          | 50                  | 80                   |
| КДБ0,005     | 32                          | 32                  | 32                   |

операции. В настоящей работе был применен следующий метод диффузионного легирования: сначала в задание на моделирование было введено нанесение фосфоросодержащего оксида кремния на поверхность кремниевой пластины; затем была введена разгонка фосфора из фосфоросодержащего оксида в кремний. Результаты расчетов напряжений стабилизации  $U_{\text{ст}}$  при токе 5 мА и дифференциального сопротивления  $R_{\text{диф}}$  ( $R_{\text{диф max}} = 450$  Ом) обратной ветви вольт-амперной характеристики прибора с площадью активной области  $p-n$ -перехода  $125 \times 125$  мкм для различных типов подложки и температуры окружающей среды представлены в **таблице**. Конструктивные параметры исследуемого стабилитрона, полученные в результате расчетов для подложки КДБ0,003, могут быть определены из **рис. 1** с помощью графика зависимости разностной концентрации примесей от глубины структуры. Глубина залегания  $p-n$ -перехода определяется в точке, где разностная концентрация примесей минимальна (**рис. 1**). На **рис. 2** приведены графики обратной ветви ВАХ исследуемого прибора, полученные в результате моделирования с учетом  $\rho_v$  подложки в условиях комнатной температуры.

Как видно из таблицы, в условиях нормальной температуры окружающей среды оптимальные значения напряжения стабилизации получены на подложке с

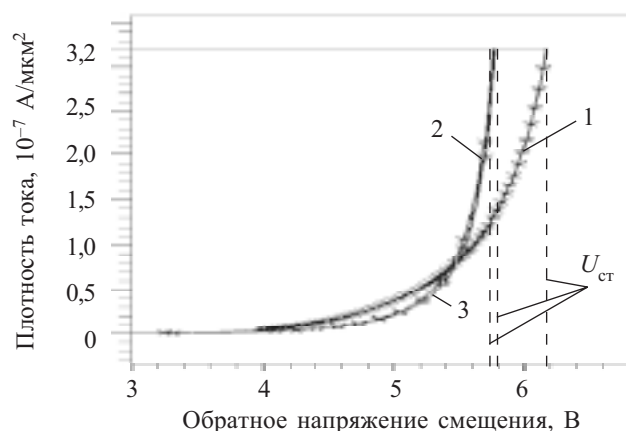


Рис. 2. Обратные ветви ВАХ стабилитрона в структурах, полученных в результате диффузионного легирования фосфором подложки типа КДБ0,003 (1); КДБ0,004 (2); КДБ0,005 (3) при комнатной температуре

удельным сопротивлением 0,003 Ом·см. Для такой подложки значение  $U_{ст}$  находится в пределах требований даже в условиях крайних температур ( $-55^{\circ}\text{C}$  и  $+150^{\circ}\text{C}$ ). Стабилитроны, изготовленные на подложках с удельным сопротивлением 0,004 и 0,005 Ом·см, имеют напряжение стабилизации, находящееся за пределами требуемого диапазона значений.

Для получения приборов с напряжением стабилизации  $U_{ст}=6,5\pm 0,5$  В были выбраны подложки КДБ0,003. Расчеты показали (см. таблицу), что у таких стабилитронов напряжение стабилизации очень слабо зависит от температуры, а следовательно, они могут использоваться для устройств с широким температурным диапазоном применения.

Из таблицы следует, что полученные в расчетах значения дифференциального сопротивления стабилитрона на подложках трех типов удовлетворяют требованиям во всем заданном диапазоне температуры.

На рис. 1 приведены распределение концентрации примеси бора в подложке  $p$ -типа с удельным сопротивлением 0,003 Ом·см; распределение концентрации примеси фосфора, полученное в результате диффузионного легирования последнего в подложку; разностное распределение концентрации примесей бора и фосфора по глубине структуры. Из рис. 1 можно определить глубину залегания  $p$ - $n$ -перехода, при которой напряжение стабилизации будет составлять 6,17 В (см. таблицу). Глубина  $p$ - $n$ -перехода, полученного в результате моделирования диффузионного легирования фосфором подложки  $p$ -типа с  $\rho_v=0,003$  Ом·см, в соответствии с принятым на НПО «Интеграл» стандартным режимом, составила 0,31 мкм.

Как показали расчеты, напряжение стабилизации существенно зависит от глубины залегания  $p$ - $n$ -перехода и от значения поверхностного сопротивления  $R_s$  области  $n$ -типа, полученной в результате диффузионного легирования фосфором при формировании  $p$ - $n$ -перехода.

По результатам моделирования установлено, что при использовании сильнолегированных подложек, удельное сопротивление которых составляет менее 0,01 Ом·см, напряжение стабилизации может понижаться с ростом сопротивления подложки, что противоречит данным различных публикаций. Такой эффект может быть объяснен тем, что пробивное напряжение стабилитрона с напряжением стабилизации  $\leq 7$  В очень сильно зависит от поверхностного сопротивления области  $n$ -типа, которое, в свою очередь, определяется разностной концентрацией диффундирующей примеси и примеси в подложке. В случаях, когда степень легирования подложки очень высока ( $\rho_v \leq 0,01$  Ом·см), значения концентрации указанных типов примесей могут оказаться близкими, а разностная концентрация примесей, которая и определяет  $R_s$ , понижается с уменьшением сопротивления подложки, т. е. с ростом концентрации примеси в подложке. Уменьшение разностной концентрации при-

месей, которое происходит с уменьшением сопротивления подложки, приводит к росту сопротивления области  $n$ -типа  $p$ - $n$ -перехода, а следовательно, и к росту напряжения стабилизации  $U_{ст}$ . Данные, приведенные в таблице и на рис. 2, подтверждают сделанное предположение.

Расчет конструктивных параметров и электрических параметров ВАХ исследуемого прибора проводился с использованием программного комплекса TSuprem4 и программного модуля Medici, в которых, с целью сокращения затрат машинного времени, осуществлялось моделирование структуры площадью 1 мкм<sup>2</sup>. На рис. 2 приведены обратные ветви ВАХ стабилитрона площадью 1 мкм<sup>2</sup>. В работе было сделано допущение, что ток через поверхность структуры с такой площадью можно считать плотностью тока исследуемого прибора с активной площадью 125×125 мкм. Такое допущение было сделано, исходя из определения плотности тока, принятого в физике, т. е. значение тока  $3,2 \cdot 10^{-7}$  А через поверхность прибора площадью 1×1 мкм соответствует значению тока 5 мА через поверхность прибора площадью 125×125 мкм, поэтому напряжение стабилизации определялось при плотности тока стабилизации  $3,2 \cdot 10^{-7}$  А/мкм<sup>2</sup>.

Из приведенных результатов следует, что оптимальными конструктивными параметрами и параметрами техпроцесса изготовления исследуемого стабилитрона с напряжением стабилизации  $U_{ст}=6,5\pm 0,5$  В являются следующие:

- 1) удельное сопротивление подложки  $p$ -типа  $\rho_v=0,003$  Ом·см;
- 2) наличие охранных колец  $n^+$ -типа по периметру  $p$ - $n$ -перехода;
- 3) длительность диффузионного легирования фосфором подложки при формировании активной области структуры составляет около 25 мин, при этом расчетная глубина  $p$ - $n$ -перехода — около 0,31 мкм.

При указанных выше значениях конструктивных и технологических параметров было получено оптимальное расчетное значение напряжения стабилизации исследуемого стабилитрона в заданном диапазоне температуры.

Полученные результаты и описанные методические приближения будут использоваться в процессе производства рассматриваемого прибора.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Тугов Н. М., Глебов Б. А., Чарыков Н. А. Полупроводниковые приборы: учебник для вузов / Под ред. В. А. Лабунцова. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Мир, 1984.
3. Sah C. T. Fundamentals of solid-state electronics / World Scientific, 1991.
4. Streetman B. G., Banerjee S. Solid state electronic devices. — New Jersey: Prentice Hall, 2000.
5. <http://www.synopsys.com>

Д. т. н. С. Ю. ЛУЗИН, к. т. н. Г. С. ПЕТРОСЯН,  
к. т. н. О. Б. ПОЛУБАСОВ

Россия, г. Санкт-Петербург, ООО «Эремекс»  
E-mail: luzin@eremex.com

Дата поступления в редакцию  
15.01 2009 г.

Оппонент к. т. н. В. В. СИБИРЯКОВ  
(ОНПУ, г. Одесса)

## К ВОПРОСУ О МИНИМИЗАЦИИ ЧИСЛА МЕЖСЛОЙНЫХ ПЕРЕХОДОВ ПРИ ТРАССИРОВКЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

*Предложены способы сокращения числа межслойных переходов за счет подключения к переходу, соединенному с контактом или точкой ветвления проводников.*

«Большое количество переходных отверстий на печатных платах понижает процент выхода годных в производстве, увеличивает трудоемкость изготовления и стоимость, а также ухудшает параметры изделия, уменьшая надежность устройства» [1].

Особую сложность в электронных САПР представляет задача минимизации количества межслойных переходов. В [2] утверждается, что если допустить возможность введения переходов в произвольных точках связывающих деревьев, то задача расслоения с минимизацией числа переходов становится чрезвычайно трудной. На практике стараются прокладывать участки проводников строго ортогонально — вертикально в одном слое и горизонтально в другом, а лишние переходы удаляют только после завершения трассировки, причем простейшим способом: фрагмент трассы переносится из одного слоя в другой, если при этом уменьшается число переходов. Возможности такой процедуры весьма скромные, обычно получается в несколько раз больше переходов, чем необходимо.

Трассировка соединений — этап определения путей проводников, соединяющих контакты компонентов в соответствии с электрической схемой при соблюдении заданных конструктивно-технологических ограничений. Ограничения — самые разнообразные: толщина проводников и величина зазоров между ними, число слоев трассировки, максимальная (или минимальная) длина проводника, выравнивание длины проводников, минимизация числа переходных отверстий и длины проводников и т. д.

Принято выделять четыре основных этапа трассировки:

- 1) составление списка соединений;
- 2) распределение соединений по слоям (задача расслоения);
- 3) определение порядка трассировки для всех соединений;
- 4) трассировка проводников.

Следует отметить, что теория и практика автоматизированного проектирования радиоэлектронной

аппаратуры зачастую развиваются параллельными курсами, практически не пересекаясь. Задача расслоения — прекрасная иллюстрация этой ситуации. Фактически, во всех системах автоматизированного проектирования при трассировке эта задача не только не решается, но даже и не ставится. Исключение составляет САПР TороR, в которой сначала все трассы прокладываются в одном коммутационном пространстве (совмещенная топология), а затем решается задача расслоения с минимизацией числа межслойных переходов [3].

Описанные в литературе подходы к решению задачи расслоения абстрагируются от реальностей трассировки. Модель упрощена до предела: все контакты сквозные, т. е. доступны на всех слоях, все проводники — прямые, межслойные переходы не используются. Даже с учетом указанных упрощений предложенные подходы практически не применимы из-за высокой комбинаторной сложности.

Для решения задачи расслоения в разное время предлагались различные подходы, некоторые из них считаем целесообразным рассмотреть в данной статье.

*Раскраска вершин графа пересечений (попытка минимизации числа слоев)* [2, с. 231].

Поставим в соответствие множеству отрезков множество вершин графа, соединив ребром пары вершин, соответствующих пересекающимся отрезкам. Такой граф принято называть графом пересечений (рис. 1).

Требуется раскрасить вершины графа пересечений (отрезки проводников) в минимальное количество цветов таким образом, чтобы не было ни одного ребра, соединяющего вершины одного цвета. Отрезки, соответствующие одноцветным вершинам, назначаются в один слой.

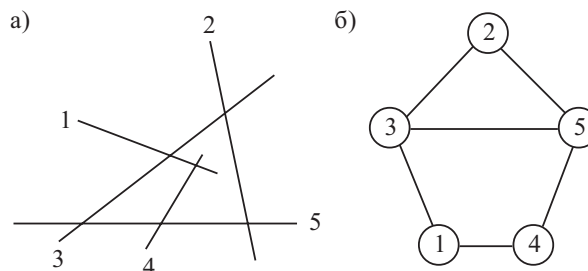


Рис. 1. Пересекающиеся отрезки (а) и граф пересечений (б)

Окрасив, например, вершину 1 в красный цвет, а вершину 5 в синий, получаем, что для окраски вершины 2 необходим еще один цвет, например, зеленый, при этом для вершин 3 и 4 возможны варианты: соответственно зеленый и красный, синий и красный, синий и зеленый.

Задача NP-трудна [4, с. 1085] и не решает проблемы, потому что число слоев, обычно, ограничено, а хроматическое число (минимальное число цветов) может оказаться больше заданного числа слоев, кроме того, не учитывается возможность перехода со слоя на слой в произвольном месте — это совсем другая задача.

*Последовательное выделение в графе максимальных плоских суграфов* [5, с. 226].

Простейший способ — последовательное удаление отрезков, имеющих максимальное число пересечений с другими отрезками. Оставшееся после удаления множество отрезков назначается на очередной слой.

Рассмотрим множество отрезков на рис. 1, а. Сначала убираем отрезки 3 и 5 (имеющие по три пересечения) и 4 (рис. 2), затем убираем отрезок 5. Таким образом, получаем, что отрезки 1 и 2 располагаются на первом слое (рис. 2, а), 3 и 4 — на втором (рис. 3, а), отрезок 5 — на третьем (рис. 3, б).

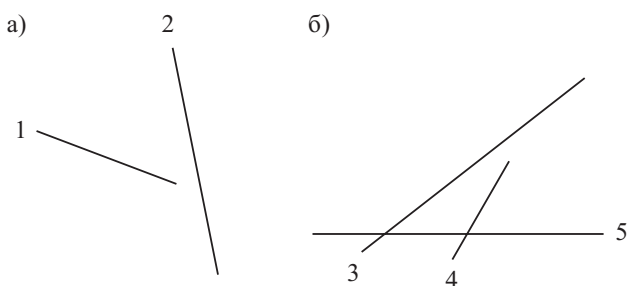


Рис. 2. Расслоение:

а — отрезки, назначенные в первый слой; б — оставшиеся отрезки

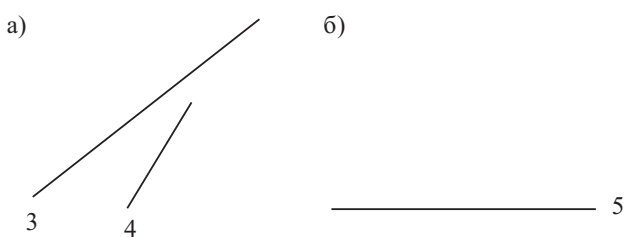


Рис. 3. Расслоение: отрезки, назначенные во второй (а) и в третий (б) слой

Недостатки способа — те же, что и у первого, кроме того, вероятна существенная погрешность решения, поскольку используется «жадный» алгоритм, при этом нахождение максимального плоского суграфа — задача не проще первой.

*Нахождение кликового покрытия графа, в котором вершины, соответствующие непересекающимся отрезкам, соединены ребром* [6].

Граф пересечений (рис. 4, а), построенный для отрезков на рис. 1, а, дополним до полного графа. Для этого вершины, соответствующие непересека-

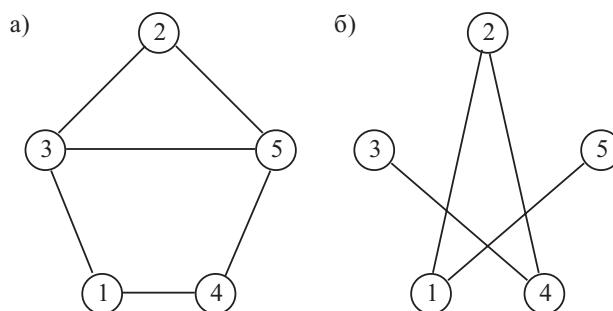


Рис. 4. Граф пересечений (а) и его дополнение до полного графа (б)

ющимся отрезкам, соединяем ребром (рис. 4, б). В этом графе любая клика соответствует максимальному множеству взаимно непересекающихся отрезков, которые могут быть размещены на одном слое. Минимизировать число слоев можно, решив задачу о покрытии кликами множества вершин графа.

Граф содержит четыре клики: {3,4}, {2,1}, {2,4} и {1,5}. Клика {3,4} входит в ядро покрытия (вершина 3 не входит ни в одну другую клику). После удаления покрытой вершины 4 из клики {2,4}, последняя поглощается кликой {2,1}. Таким образом получаем покрытие {3,4}, {2,1}, {5}.

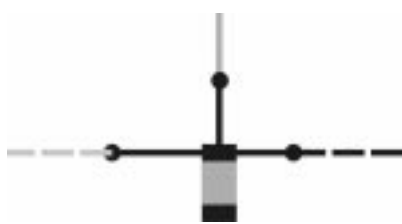
В подобной постановке оценкой комбинаторной сложности является двойная экспонента: задача о покрытии NP-трудна, при этом входная цепочка — число клик графа (в худшем случае —  $3^{n/3}$ ).

Очевидна практическая нереализуемость решения задач в указанных постановках, а самое главное, они фактически не имеют отношения к задаче минимизации переходов.

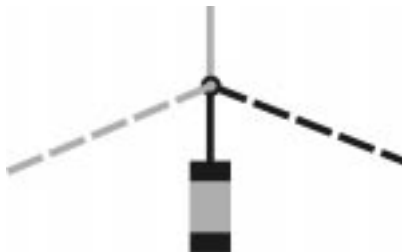
Эффективный алгоритм решения задачи минимизации числа межслойных переходов для двух слоев приведен в [3]. Пусть имеется совмещенная топология. Пусть также в каждой точке пересекаются только два проводника. Тогда для любой такой точки возможны два варианта: либо одна трасса проходит через точку пересечения в первом слое, а другая — во втором, либо наоборот. Эти два варианта можно соотносить с двумя возможными ориентациями домена. Если концы участка трассы между двумя соседними точками пересечения принадлежат разным слоям, то на участке необходим переход с одного слоя на другой, если одному слою — переход на участке не нужен.

Определение оптимального по числу межслойных переходов расслоения в [3] сводится к выявлению в графе доменов наиболее отрицательного разреза [4, с. 747].

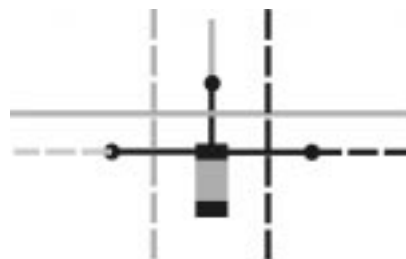
Приведенные в работе преобразования уменьшают размер графа доменов за линейное число операций [4, с. 91] без потери оптимального решения. Число межслойных переходов минимизируется за счет переназначения слоя для того или иного отрезка проводника. Однако некоторые лишние межслойные переходы таким алгоритмом не удаляются. Подобная ситуация возникает, например, на многослойных печатных платах, если от контактной площадки или точки ветвления отходят три и более проводника (рис. 5).



**Рис. 5.** Контактная площадка с тремя проводниками с переходами на разные слои



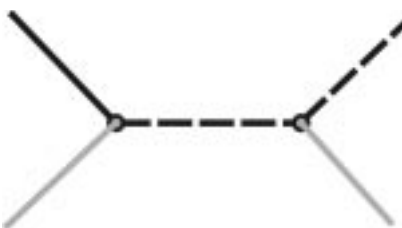
**Рис. 6.** Сокращение числа переходов при увеличении штрафа за подключение к контактной площадке



**Рис. 7.** Подключению проводника к переходу мешают другие проводники



**Рис. 8.** «Оттяжка» проводников за межслойные переходы



**Рис. 9.** Перенесение сегмента между парой переходов в любой из слоев не уменьшает числа переходов



**Рис. 10.** Добавление в «сером» слое сегмента, соединяющего межслойные переходы, позволяет убрать один из переходов

Ситуация легко разрешается путем перекладки трасс при увеличении штрафа за подключение к контактной площадке (**рис. 6**).

Однако подключению проводника к переходу могут мешать другие проводники (**рис. 7**) в том же слое.

В этом случае может помочь «оттяжка» соответствующего проводника за межслойный переход (**рис. 8**). Ситуация становится аналогичной **рис. 5**.

**Рис. 9** иллюстрирует ситуацию, когда перенесение сегмента между парой переходов в любой из слоев не уменьшает числа переходов, однако добавление в «сером» или «черном» слое сегмента, соединяющего межслойные переходы, позволяет убрать один из переходов (соответственно правый или левый).

Следует отметить, что добавление сегмента не обязательно сопровождается увеличением суммарной длины проводников, поскольку удаление перехода позволит оптимизировать не только трассы инцидентных ему цепей [4, с. 613] (**рис. 10**), но также, возможно, и трассы цепей в других слоях, спрямлению которых мешал переход.

\*\*\*

Учет при трассировке указанных дополнительных возможностей сокращения числа межслойных пере-

ходов кардинально статистику не изменит, поскольку таких возможностей не очень много, однако при трассировке плат с высокой плотностью монтажа даже небольшое высвобождение ресурсов монтажного пространства может оказаться решающим.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ревков А. Факторы, влияющие на стоимость печатных плат // Электронные компоненты. — 2006. — № 8. — С. 43—45.
2. Селютин В. А. Машинное конструирование электронных устройств. — М.: Советское радио, 1977.
3. Полубасов О. Б. Глобальная минимизация количества межслойных переходов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2001. — № 2. — С. 3—9.
4. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. — М.: Издат. дом «Вильямс», 2007.
5. Мелихов А. М., Берштейн Л. С., Курейчик В. М. Применение графов для проектирования дискретных устройств. — М.: Наука, 1974.
6. Базилевич Р. П. Декомпозиционные и топологические методы автоматизированного конструирования электронных устройств. — Львов: Вища школа, 1981.

К. т. н. Н. И. СИНЕГУБ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

Дата поступления в редакцию  
08.04 2009 г.

Оппонент д. т. н. В. С. СИТНИКОВ  
(ОНПУ, г. Одесса)

## УМНОЖИТЕЛЬ/ДЕЛИТЕЛЬ С ПОВЫШЕННЫМ БЫСТРОДЕЙСТВИЕМ

Разработка операционных устройств (ОУ) с совмещенными функциями является одним из актуальных направлений при синтезе цифровой аппаратуры. При этом особый интерес представляет случай, когда быстродействие ОУ с несколькими совмещенными функциями выше суммарного быстродействия отдельно взятых алгоритмических устройств, каждое из которых выполняет только одну из этих функций. Это достижимо при некотором увеличении аппаратной сложности устройства с совмещенными функциями.

В настоящей работе предлагается устройство умножения/деления с повышенным быстродействием, которое достигается за счет совмещения двух операций на одной ступени.

Известно устройство с аппаратным совмещением на одной структуре операций умножения, деления, извлечения квадратного корня, а также процедур ассоциативного поиска в двух вариантах — без разделения устройства на одноразрядные ячейки и с разделением [1, с. 86—100], при этом указанные операции выполняются последовательно одна за другой.

На рис. 1 представлена структурная схема  $i$ -й ступени конвейерного устройства деления, предложен-

ная в [1]. Всего необходимо  $n$  ступеней конвейера, каждая содержит три регистра  $Pr$ ,  $n$ -разрядный сумматор  $\Sigma$  и триггер  $T$ . Сдвиг на один разряд значений  $P_i$  задается соответствующим монтажом межсоединений. Мультиплексор  $MX$  разрешает прохождение потока данных от одной ступени конвейера к другой через сумматор или минуя его в зависимости от значения знакового разряда сумматора.

Схема функционирует следующим образом.

Пусть делимое  $P_i$  и делитель  $C_i$  — целые положительные числа. Если  $C_i > P_i$ , то в последующую ступень  $P_i$  передается без изменения, а в очередной,  $(i+1)$ -й, разряд частного  $R_{i+1}$  заносится «0». Если  $C_i \leq P_i$ , то в последующую ступень конвейера передается новое значение  $P_{i+1} = (P_i - C_i)$ , а разряду частного присваивается значение «1». Далее  $P_i$  сдвигается на один разряд влево относительно прежнего значения. На новой ступени конвейера операция повторяется. В дополнительном коде производится вычитания  $(P_i - C_i)$ .

Данное устройство выполняет только операцию деления числа  $P$  на число  $C$ . Для того, чтобы выполнить операцию  $F = ((\pm A) \times (\pm B)) / (\pm C)$ , необходимо предварительно заготовить результат произведения  $P = (\pm A) \times (\pm B)$ , и затем подать его на данное устройство деления, что увеличивает время выполнения операции  $F$ .

Покажем это на примере.

Пусть заданы целые числа

$$A = (+15)_{10}; B = (-15)_{10}; C = (+12)_{10}.$$

Требуется выполнить операцию

$$F = ((+15)_{10} \times (-15)_{10}) / (+12)_{10}.$$

На устройстве умножения вычисляется произведение  $P = A \times B = (+15)_{10} \times (-15)_{10} = (-225)_{10}$ . Время формирования произведения равно  $T_{ум}$ . Затем число  $P = (-225)_{10}$  подается на устройство деления, где осуществляется его деление на число  $C = (+12)_{10}$ . Деление выполняется в режиме работы с условно-фиксированной запятой [2, с. 47—51]. При этом разрядная сетка в рассматриваемом примере содержит  $n = 16$  разрядов (без знака), где условное положение запятой определяется значением  $k = n/2 = 8$ .

Чтобы выполнить деление, числа  $P$  и  $C$  представляются в двоичном прямом коде:

$$P = (-225)_{10} = (111100001)_2^{пр}; C = (+12)_{10} = (01100)_2^{пр}.$$

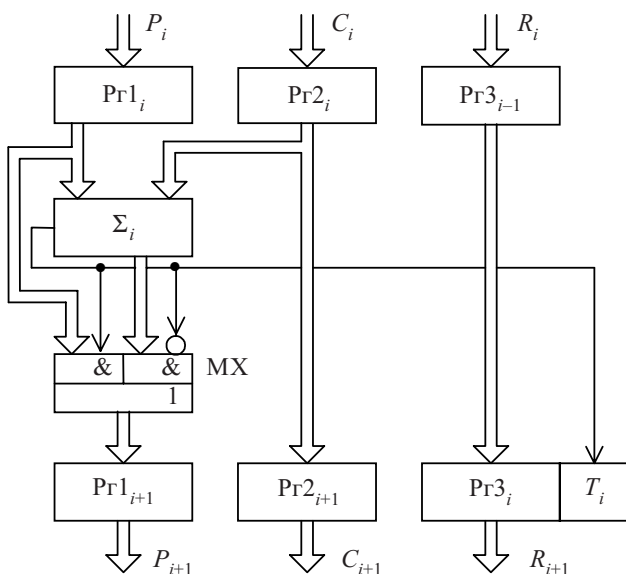


Рис. 1. Структурная схема  $i$ -й ступени конвейерного устройства деления

# МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ

| Формирование кодов чисел                                                                                        | Содержание операции                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Разряд частного       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 10000000011100001<br>00000110000000000                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                       |
|                                                                                                                 | Определение кода знака частного. Знак частного совпадает со знаком делимого $P$ . В устройстве деления будет обрабатываться модуль $ P $ .                                                                                                                                                                                        |                       |
| 00000000011100001<br>+<br>11111010000000000<br>11111010011100001<br>← 00000000011100001<br>00000000111000010    | Первая ступень. Вычитание $( P -C)$ в дополнительном коде. Так как $ P <C$ , в последующую ступень конвейера с помощью мультиплексора $MX$ $ P $ передается без изменения. Соответствующему разряду частного присваивается значение «0». Значение $ P $ сдвигается на один разряд влево относительно прежнего значения ( $P_1$ ). | 0<br>(знак)           |
| 000000000111000010<br>+<br>11111010000000000<br>11111010111000010<br>← 000000000111000010<br>000000001110000100 | Вторая ступень. Вычитание $(P_1-C)$ : $P_1<C$ и в последующую ступень $P_1$ передается без изменения. Соответствующему разряду частного присваивается значение «0». Значение $P_1$ сдвигается на один разряд влево ( $P_2$ ).                                                                                                     | 0<br>(старший разряд) |
| 000000001110000100<br>+<br>11111010000000000<br>111110111110000100<br>← 000000001110000100<br>00000011100001000 | Третья ступень. Вычитание $(P_2-C)$ : $P_2<C$ и значение $P_2$ передается без изменения. Соответствующему разряду частного присваивается значение «0». Значение $P_2$ сдвигается на один разряд влево ( $P_3$ ).                                                                                                                  | 0                     |
| 00000011100001000<br>+<br>11111010000000000<br>11111011100001000<br>← 00000011100001000<br>00000111000010000    | Четвертая ступень. Вычитание $(P_3-C)$ : $P_3<C$ и значение $P_3$ передается без изменения. Соответствующему разряду частного присваивается значение «0». Значение $P_3$ сдвигается на один разряд влево ( $P_4$ ).                                                                                                               | 0                     |
| 00000111000010000<br>+<br>11111010000000000<br>11111100000100000<br>← 00000001000010000<br>00000010000100000    | Пятая ступень. Вычитание $(P_4-C)$ : $P_4>C$ и в последующую ступень передается новое значение $P_5=(P_4-C)$ . Соответствующему разряду частного присваивается значение «1». Значение $P_5$ сдвигается на один разряд влево ( $P_6$ ).                                                                                            | 1                     |
| 00000010000100000<br>+<br>11111010000000000<br>111111000000100000<br>← 00000010000100000<br>00000100001000000   | Шестая ступень. Вычитание $(P_6-C)$ : $P_6<C$ и значение $P_6$ передается без изменения. Соответствующему разряду частного присваивается значение «0». Значение $P_6$ сдвигается на один разряд влево ( $P_7$ ).                                                                                                                  | 0                     |
| 00000100001000000<br>+<br>11111010000000000<br>111111100001000000<br>← 00000100001000000<br>00001000010000000   | Седьмая ступень. Вычитание $(P_7-C)$ : $P_7<C$ и значение $P_7$ передается без изменения. Соответствующему разряду частного присваивается значение «0». Значение $P_7$ сдвигается на один разряд влево ( $P_8$ ).                                                                                                                 | 0                     |
| 00001000010000000<br>+<br>11111010000000000<br>111111000000000000<br>← 00000010010000000<br>00000100100000000   | Восьмая ступень. Вычитание $(P_8-C)$ : $P_8>C$ и в последующую ступень передается новое значение $P_9=(P_8-C)$ . Соответствующему разряду частного присваивается значение «1». Значение $P_9$ сдвигается на один разряд влево ( $P_{10}$ ).                                                                                       | 1                     |
| 00000100100000000<br>+<br>11111010000000000<br>11111110100000000<br>00000100100000000                           | Девятая ступень. Вычитание $(P_{10}-C)$ : $P_{10}<C$ и значение $P_{10}$ передается без изменения. Соответствующему разряду частного присваивается значение «0».                                                                                                                                                                  | 0                     |
|                                                                                                                 | На выходах устройства деления сформировались: частное в двоичном прямом коде $R=(000010010)_2^{пр}=(18)_{10}$ и остаток от деления в двоичном прямом коде $Q=(000001001)_2^{пр}=(9)_{10}$ . Частному присваивается знак «-»: $R=(-18)_{10}$ ; остатку присваивается знак «+»: $Q=(+9)_{10}$ .                                     |                       |

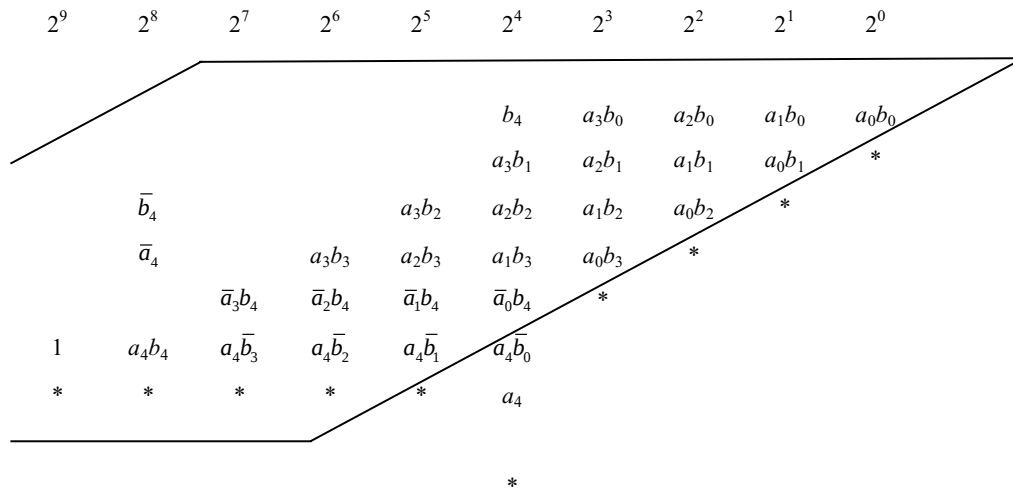


Рис. 2. Вариант введения битов слагаемого  $C$

Деление выполняется за 9 тактов на девяти ступенях конвейерного устройства деления, как это показано в **таблице**.

Таким образом, в рассматриваемом случае время выполнения операции умножения и деления равно

$$T_1 = T_{\text{ум}} + 9T_c, \quad (1)$$

где  $T_c$  — время срабатывания сумматора  $\Sigma_i$ .

Для совмещения операций умножения и деления в одном устройстве используем один из алгоритмов умножения в дополнительных кодах. Он базируется на представлении дополнительного кода как позиционного числа с положительным весом всех его коэффициентов, кроме знакового разряда, имеющего отрицательный весовой коэффициент [3, с. 199—206]. Следовательно, дополнительный код числа имеет вид

$$-\dot{A}_{\text{дд}} = -a_{n-1}2^{n-1} + \sum_{i=0}^{n-2} a_i 2^i. \quad (2)$$

Вариант введения в параллелограмм частичных произведений дополнительных битов слагаемого  $C$  в дополнительном коде для реализации операции  $F' = (\pm A) \times (\pm B) \pm C$  при разрядности сомножителей в дополнительном коде (2), равной пяти, включая знаковый разряд, представлен на **рис. 2** [4]. На рисунке биты слагаемого  $C$  обозначены «\*». Данный параллелограмм обрабатывается многоразрядными многооперандными сумматорами. Приведем пример.

Пусть заданы целые числа:  $A = (+15)_{10}$ ;  $B = (-15)_{10}$ ;  $C = (-15)_{10}$ .

Требуется выполнить операцию

$$F' = (+15)_{10} \times (-15)_{10} + (-15)_{10}.$$

Представим  $A$ ,  $B$  и  $C$  в двоичном дополнительном коде:

$$A = (+15)_{10} = (01111)_2^{\text{пп}} = (01111)_2^{\text{доп}} \quad (\text{число разрядов } m=5);$$

$$B = (-15)_{10} = (11111)_2^{\text{пп}} = (10001)_2^{\text{доп}} \quad (\text{число разрядов } n=5);$$

$$C = (-15)_{10} = (111110001)_2^{\text{доп}} \quad (\text{число разрядов } l=10).$$

|    | 2 <sup>9</sup> | 2 <sup>8</sup> | 2 <sup>7</sup> | 2 <sup>6</sup> | 2 <sup>5</sup> | 2 <sup>4</sup> | 2 <sup>3</sup> | 2 <sup>2</sup> | 2 <sup>1</sup> | 2 <sup>0</sup> |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|    |                |                |                |                |                | 0              | 1              | 1              | 1              | 1              |
|    |                |                |                |                | ×              | 1              | 0              | 0              | 0              | 1              |
| -1 | 1              |                |                |                |                | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              |
| -1 | 1              |                |                |                |                | 0              | 0              | 0              | 0              |                |
|    | 0              |                |                |                | 0              | 0              | 0              | 0              |                |                |
|    | 1              |                |                | 0              | 0              | 0              | 0              |                |                |                |
|    |                |                | 0              | 0              | 0              | 0              |                |                |                |                |
|    |                | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |                |                |                |                |
|    |                |                |                |                |                | 0              |                |                |                |                |
|    | 1              | 1              | 0              | 0              | 0              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              |

Рис. 3. Схема перемножения чисел  $A = (+15)_{10}$  и  $B = (-15)_{10}$

Схема перемножения заданных чисел  $A$  и  $B$  в соответствии с (2) и рис. 2 показана на **рис. 3**. Здесь в столбце с весом  $2^9$  формируется знак произведения.

В результате получено

$$P = A \times B = (1100011111)_2^{\text{доп}} = (1011100001)_2^{\text{пп}} = (-225)_{10}.$$

В соответствии с рис. 2,

$$\begin{aligned} F' &= P + C = (-225)_{10} + (-15)_{10} = (1100011111)_2^{\text{доп}} + \\ &+ (111110001)_2^{\text{доп}} = (1100010000)_2^{\text{доп}} = \\ &= (101110000)_2^{\text{пп}} = (-240)_{10}. \end{aligned}$$

На **рис. 4** приведена структурная схема устройства умножения/деления повышенного быстродействия, реализующего операцию  $F = ((\pm A) \times (\pm B)) / ((\pm C))$  аппаратным способом. Сравним временные характеристики предложенного устройства умножения/деления и известного устройства деления, рассмотренного выше (рис. 1).

Задача та же:

$$A = (+15)_{10}; \quad B = (-15)_{10}; \quad C = (+12)_{10}.$$

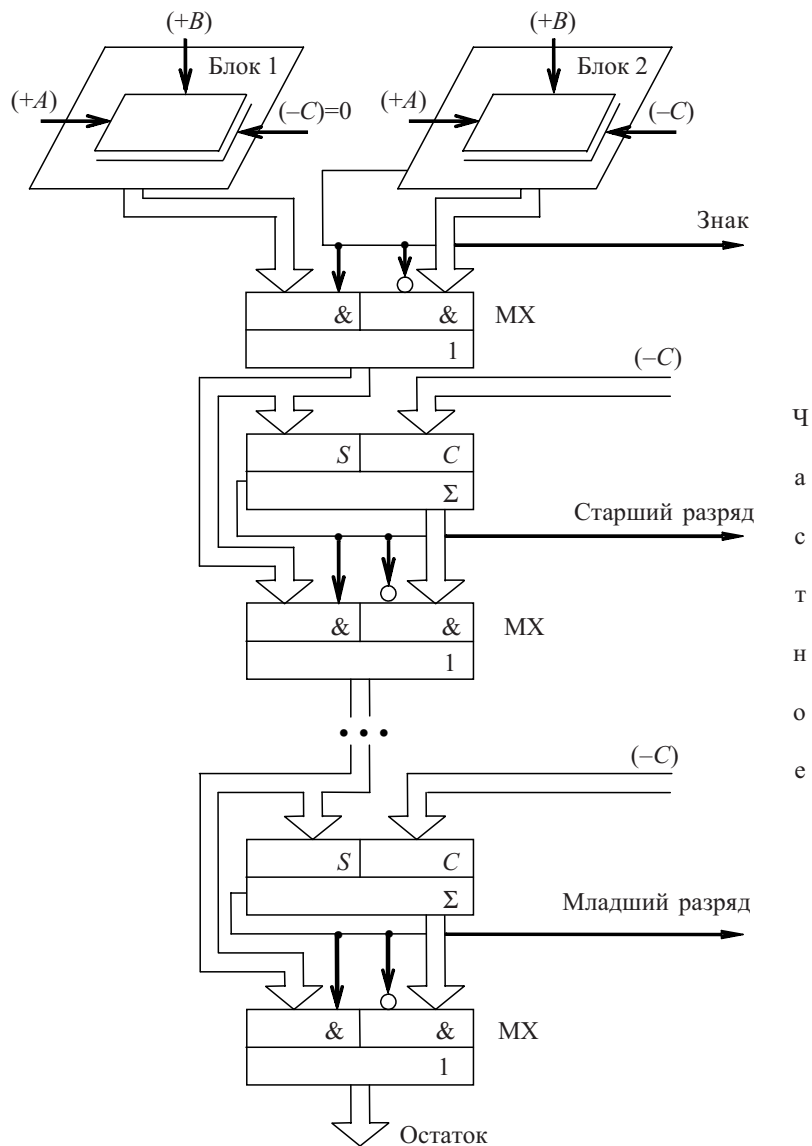


Рис. 4. Структурная схема устройства умножения/деления

|   | $2^{16}$ | $2^{15}$ | $2^{14}$ | $2^{13}$ | $2^{12}$ | $2^{11}$ | $2^{10}$ | $2^9$ | $2^8$ | $2^7$ | $2^6$ | $2^5$ | $2^4$ | $2^3$ | $2^2$ | $2^1$ | $2^0$ |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |          |          |          |          |          |          |          |       |       |       |       |       | 0     | 1     | 1     | 1     | 1     |
|   |          |          |          |          |          |          |          |       |       |       |       |       | ×     | 0     | 1     | 1     | 1     |
|   |          |          |          |          |          |          |          |       |       |       |       |       | 0     | 1     | 1     | 1     | 1     |
|   |          |          |          |          |          |          |          |       |       |       |       |       | 0     | 1     | 1     | 1     | 1     |
|   |          |          |          |          |          |          |          |       | 1     |       |       | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |       |
|   |          |          |          |          |          |          |          | 1     | 1     |       | 1     | 1     | 1     | 1     |       |       |       |
|   |          |          |          |          |          |          |          | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |       |       |       |       |
|   |          |          |          |          |          |          | 1        | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |       |       |       |       |
|   |          |          |          |          |          |          |          |       |       |       |       |       | 0     |       |       |       |       |
| 0 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     |
| + | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 0        | 1        | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
|   | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 0        | 1        | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     |

Рис. 5. Схема перемножения в блоке 2 устройства умножения/деления

Требуется выполнить операцию

$$F = ((+15)_{10} \times (-15)_{10}) / (+12)_{10}.$$

В блоках 1 и 2 предложенного устройства, в соответствии с рис. 2, выполняется операция

$$\begin{aligned} G &= (+A) \times (+B) - (+C) = (+15)_{10} \times (+15)_{10} - (+12)_{10} = \\ &= (01111)_2^{\text{доп}} \times (01111)_2^{\text{доп}} + (11111010000000000)_2^{\text{доп}} = \\ &= (11111010011100001)_2^{\text{доп}}, \end{aligned}$$

что показано на рис. 5. Здесь знак произведения, сформированный в столбце с весом  $2^9$ , записывается в разряды с весом  $2^{10} \dots 2^{16}$ . Данный параллелограмм обрабатывается многоразрядными многооперандными сумматорами, поэтому операции умножения и суммирования в блоке выполняются одновременно. Блок 1 аналогичен блоку 2, за исключением того, что значение  $C$  в блоке 1 всегда равно нулю.

Сдвиг на один разряд промежуточных значений в устройстве умножения/деления задается соответствующим монтажом межсоединений.

Как и в устройстве деления, рассмотренном выше, операция деления здесь выполняется аналогично на

девяти ступенях. Однако на первой ступени данного устройства в блоках 1 и 2 одновременно производится умножение ( $|P| = A \times B$ ) и вычитание ( $|P| - C$ ) чисел за время  $T_{\text{ум}}$ .

Таким образом, время срабатывания предложенного устройства составляет

$$T_2 = T_{\text{ум}} + 8T_c, \quad (3)$$

т. е. оно быстрее известного устройства деления на время  $T_c$ . Кроме того, в предложенном устройстве умножения/деления отсутствуют операции пересылки чисел, что также повышает его быстродействие.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Вышенчук И. М., Черкасский Н. В. Алгоритмические операционные устройства и суперЭВМ.— Киев: Тэхника, 1990.
2. Соловьев Г. Н. Арифметические устройства ЭВМ.— М.: Энергия, 1978.
3. Угрюмов Е. П. Проектирование элементов и узлов ЭВМ.— М.: Высш. шк., 1987.
4. Синегуб Н. И. Синтез устройств умножения/суммирования // Матеріали МНПК «Розвиток наукових досліджень «2005».— 2005.— Т. 8.— Полтава: «ІнтерГрафіка», 2005.— С. 76—80.

#### НОВЫЕ КНИГИ

#### НОВЫЕ КНИГИ

**Флуктуации и шумы в сложных системах живой и неживой природы / Под ред. Р. М. Юльметьева, А. В. Мокшина, С. А. Дёмина, М. Х. Салахова.— Казань: Изд-во Министерства образования и науки РТ, Редакционно-издательский центр «Школа», 2008.— 456 с.**

Книга представляет собой сборник оригинальных работ известных российских специалистов, посвященных проблемам изучения как фундаментальной роли флуктуаций и шумов в поведении сложных систем живой и неживой природы, так и возможным приложениям в физиологии, медицине, нейрофизиологии, радиофизике и функциональной электронике, сейсмологии, астрофизике и других областях современного естествознания. По своей структуре и актуальности проблематики книга представляет коллективную монографию, написанную ведущими специалистами в данной области. Она предназначена для широкого круга специалистов по фундаментальным и прикладным вопросам исследования флуктуаций и шумов и их возможным приложениям в большом круге явлений современной физики и естествознания. Книга содержит результаты последних исследований, а также работы обзорного характера. Одна из основных целей данного издания состоит в привлечении студентов, аспирантов и молодых ученых к увлекательному направлению исследовательской деятельности в новой интенсивно развивающейся области физики.

Содержание:

1. В. В. Учайкин «Вселенная как фрактальная пыль: флуктуации и корреляции».
2. В. С. Анищенко, Т. Е. Вадивасова, Г. Е. Стрелкова «Влияние шума на хаотические системы».
3. Р. М. Юльметьев, П. Ханги «Механизмы формирования долговременных корреляций в сложных системах за счет статистических эффектов памяти».
4. С. Ф. Тимашев «Фликкер-шумовая спектроскопия как общий феноменологический подход к извлечению информации из хаотических сигналов».
5. Р. Р. Нигматуллин «Что такое КУМ'а (количественная универсальная метка) и с чем ее едят?»
6. В. В. Розанов, О. В. Руденко, Н. Н. Сысоев «Сложные задачи нелинейной акустики и гемодинамики».
7. А. В. Мокшин «Процессы структурного упорядочения в металлических стеклах: влияние сдвигового воздействия».
8. А. А. Потапов «Фрактальные методы исследования флуктуаций сигналов и динамических систем в пространстве дробной размерности».
9. В. В. Афанасьев, С. С. Логинов «Диагностика электронных динамических систем на основе негармонических дробно-степенных спектров».
10. В. В. Афанасьев, В. П. Данилаев, Ю. Е. Польский «Обобщенные многомодовые модели в анализе и диагностике фрактальных структур, живых и неживых динамических систем».
11. Г. В. Грушевская, Г. Г. Крылов «Биологически мотивированные нейросети из хаотических осцилляторов».
12. А. Н. Чувывров «Фазовые волны в нематических жидких кристаллах: следствие самоорганизации гидродинамической флуктуации».
13. Н. Г. Мигранов, Р. Н. Мигранова «Кооперативные явления в открытых системах: функциональный подход».
14. Г. В. Встовский «Выявление пространственных и временных иерархических структур в сложных системах».



К. ф.-м. н. В. Ю. ЕРОХОВ, д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН

Украина, Национальный университет "Львовская политехника"  
E-mail: verohov@polynet.lviv.uaДата поступления в редакцию  
10.03 2009 г.Оппонент К. ф.-м. н. В. П. КОСТЫЛЁВ  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## КРЕМНИЙ МУЛЬТИПОРИСТОЙ ТЕКСТУРЫ ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

*Эффективность преобразования солнечной энергии можно существенно увеличить, если использовать в качестве фронтальной поверхности солнечного элемента кремний мультипористой текстуры.*

Кремний, а также различные функциональные материалы и соединения на его основе, в том числе и пористый кремний (ПК), созданные за последнее десятилетие, являются наиболее перспективными для создания фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) благодаря их относительно невысокой стоимости и оптимальности функциональных свойств [1—3]. ПК характеризуется чрезвычайно специфическими морфологическими особенностями, и процесс его формирования является многофакторным. Существует ряд теорий, описывающих различные аспекты формирования ПК и рассматривающих локализацию носителей на «дне» поры в процессе роста [4], влияние на интенсивность роста поры диффузии дырок [5], химической активации поверхности [6], границы раздела между ПК и подложкой [7].

Доминирующая доля кремниевых материалов в общем объеме производства ФЭП [1], а также перспективность функциональных пористых структур кремния обуславливают значительный практический интерес со стороны исследователей. В то же время, широкое использование кремниевых солнечных элементов (СЭ) может стать экономически целесообразным только при условии повышения их КПД и снижения себестоимости производства. Одним из современных направлений по увеличению эффективности ФЭП и снижению цены готового элемента является использование некоторых полупроводниковых материалов пористой структуры, в первую очередь кремния.

Цель данной работы — разработка технологического процесса производства элементов ФЭП и, в первую очередь, кремния мультипористой текстуры. Такой элемент фронтальной поверхности СЭ с низким

интегральным коэффициентом отражения в диапазоне от 400 до 1150 нм можно создать путем объединения электрохимических и химических методов. Это предполагает получение пористого кремния макро- и микротекстуры в одном технологическом процессе.

### Моделирование элементов мультипористой текстуры кремния

Морфология ПК показывает наличие различных структурных элементов, которые отличаются размерами пор, их формой, ориентацией, разветвлением, заполнением и перемешиванием. Эти морфологические особенности ПК обычно исследовались методами растровой электронной микроскопии [8], однако систематический их анализ не проводился.

Слои ПК, сформированные на *p*-Si- или *n*-Si-подложках, как правило, различаются размерами пор, их ориентацией и степенью разветвления. Существенное отличие имеют также структуры ПК, сформированные в темноте и при наличии освещения — фронтального или с обратной стороны подложки. Наибольшее влияние на морфологию оказывает концентрация легирующей примеси. В частности, размер пор зависит от типа легирующей примеси и ее концентрации и обычно увеличивается с возрастанием концентрации примеси для *p*-Si и уменьшается для *n*-Si [9].

Распределение плотности тока по поверхности поры для макропористого кремния в стабильном состоянии показано на рис. 1, а. В микро-ПК поры стремятся расти зигзагообразно, профиль распределения тока по фронту роста модулируется и изменяется по по-

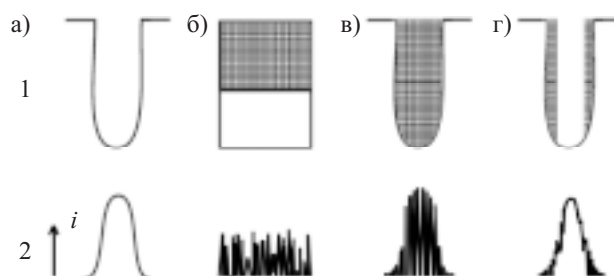


Рис. 1. Модели разных типов ПК (1) и соответствующие им профили распределения плотности тока по поверхности поры (2):

а — ячейка макро-ПК; б — микро-ПК; в — макроячейка, заполненная микро-ПК; г — макроячейка, частично заполненная микро-ПК

Авторы выражают благодарность за помощь в проведении измерений сотрудникам отдела электронной спектроскопии и оптики Института физики НУ Республики Беларусь (г. Минск) и сотрудникам отдела фотовольтаики Института солнечной энергии (г. Ганновер, Германия).

верхности с течением времени (рис. 1, б). В мультислойном ПК, состоящем из макро- и микропор, макропоры могут быть полностью или частично заполнены микро-ПК. Профиль распределения плотности тока, приводящего к росту макропор кратерообразной формы, модулируется током, который вызывает рост микропор. Макропоры полностью заполняются микро-ПК (рис. 1, в) при отсутствии окисления на «дне» поры. При наличии окисления макропоры заполняются микро-ПК только частично (рис. 1, г).

### Результаты исследований

За основу предложенной нами разработки была взята технология формирования ПК электрохимическим методом [10, 11]. Основным критерием выбора технологии была необходимость максимально приблизить процесс выращивания слоев ПК к технологии создания высокоэффективных СЭ. Для формирования пористых слоев использовались как полированные, так и текстурированные в 10%-ном растворе КОН кремниевые подложки (100) *p*-типа, выращенные методом зонной плавки, с удельным сопротивлением 1,5 Ом·см, толщиной 300 мкм, отполированные двухсторонним травлением. Эмиттер  $n^+$ -типа, толщиной 0,4 мкм, с поверхностным сопротивлением около 40 Ом/см<sup>2</sup>, был сформирован при 830°C диффузией фосфора из жидкого источника POCl<sub>3</sub> в течение 20 мин с последующей 20-минутной выдержкой в среде азота и окончательной термической обработкой при 1050°C.

Выращивание слоев ПК производилось в гальваностатическом режиме с использованием тefлоновой электрохимической ячейки, конструкция которой предусматривала омический контакт с металлизированной тыльной стороной кремниевой подложки [1, 11]. В качестве электролита при анодировании применялся спиртовой и водно-спиртовой раствор плавиковой кислоты с соотношением компонентов C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH:HF=1:1 и C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH:H<sub>2</sub>O:HF=1:1:1.

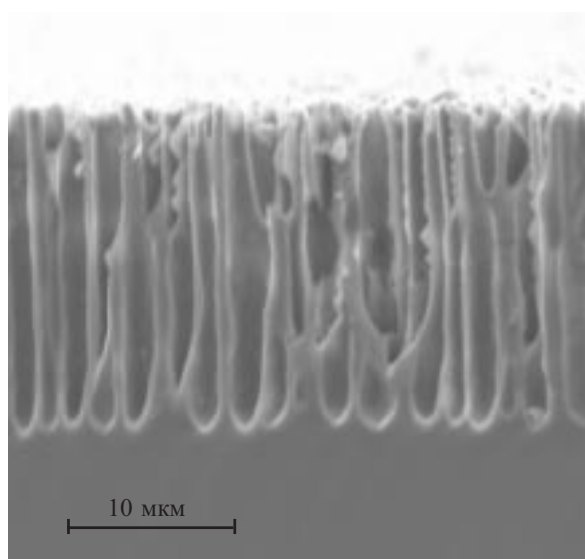


Рис. 2. Колоннообразная текстура пористого кремния на шлифе приповерхностной зоны фронтальной поверхности кремниевой подложки

Формирование ПК на поверхности эмиттера  $n^+$ -*p*-перехода СЭ осуществлялось без дополнительного освещения и было возможным благодаря инжекции дырок из базового слоя при прямом смещении диодной структуры.

Отказ от использования потенциалов смещения и, соответственно, токов на определенных этапах технологического процесса получения ПК обусловил применение химической технологии дополнительно к электрохимической. Химическая технология использовалась на первом этапе — на поверхности кремниевой подложки формировался слой кремния кратерообразной макропористой текстуры [11]. На втором этапе электрохимическим методом формировалась колоннообразная текстура, в которой можно было регулировать как диаметр, так и высоту колонн (рис. 2). Это достигалось регулировкой технологических параметров роста ПК и выбором добавок к базовому кислотному раствору.

При формировании ПК по химической технологии следует учесть три важных фактора:

- ПК, сформированный на поверхности, является изотропным и слабо зависит от кристаллографической ориентации поверхности;
- технология проста и совместима с технологическими циклами производства СЭ;
- технология позволяет контролировать геометрию будущей поверхностной текстуры, в частности диаметр кратерообразной ячейки, который в дальнейшем фиксируется как диаметр полученной колонны.

Все это предоставляет возможности для последующей оптимизации технологических процессов.

Метод «гибридной» технологии на основе развитой кратеро- и колоннообразной морфологии кремниевой поверхности позволяет изменять тип и размерность мультипористой текстуры в широком диапазоне. Как химическая, так и электрохимическая технология не требует термостабилизации, т. к. ПК формируется при комнатной температуре.

Сравнение спектров отражения поверхностной колоннообразной мультипористой текстуры кремния (без нанесения просветляющего слоя) в диапазоне от 400 до 1150 нм (рис. 3) со спектрами отражения по-

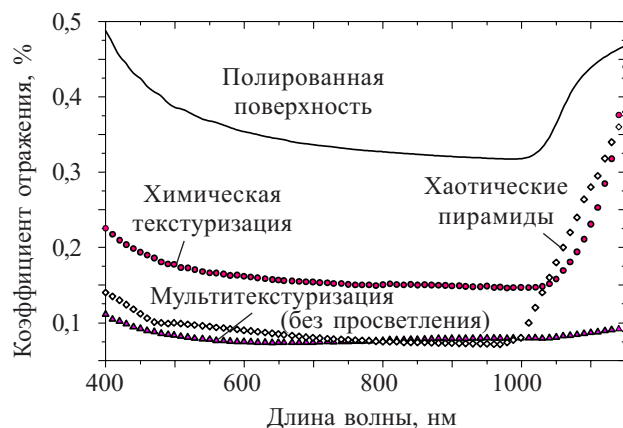


Рис. 3. Спектры отражения поверхности Si, текстурированного различными методами

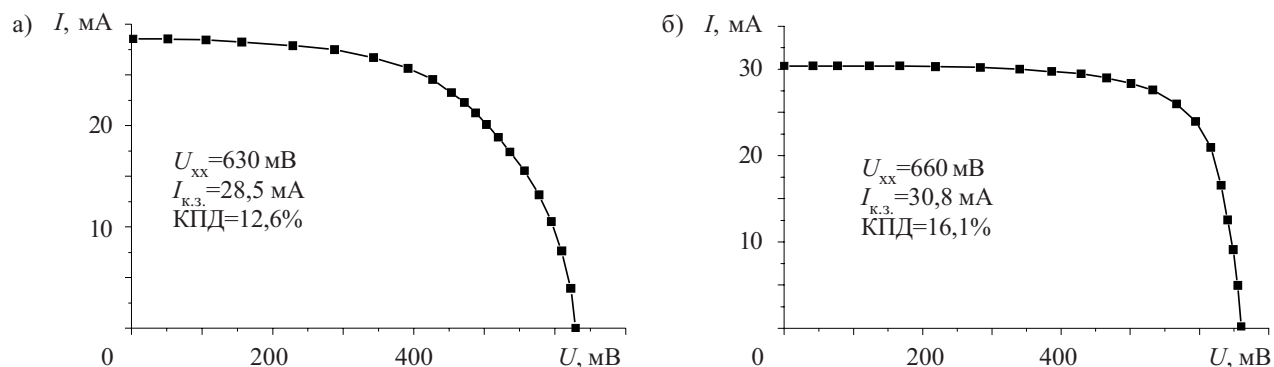


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика СЭ пирамидальной текстуры (а) и мультимпористой текстуры (б)

верхностей Si, текстурированных химическим методом и методом хаотических пирамид (random pyramids), указывает на эффективное снижение оптических потерь в колоннообразном ПК.

По предложенной технологии были изготовлены лабораторные образцы ФЭП. Первый стандартный образец имел простую пирамидальную текстуру (рис. 4, а). Второй образец был изготовлен с фронтальным мультитекстурированием (рис. 4, б). Эксперименты проводились на одинаковых по площади СЭ (активная поверхность СЭ — 0,93 см<sup>2</sup>). Вольт-амперные характеристики двух образцов СЭ, измеренные при спектральных условиях АМ1,5, показывают увеличение КПД при использовании мультимпористой текстуры.

Предложенный нами метод, с учетом его простоты, может рассматриваться как альтернатива традиционным методам текстурирования. Вместе с тем, химическое травление можно использовать непосредственно вместо травления с применением КОН для очистки поверхности и удаления поврежденного слоя с поверхности базовой кремниевой пластины (подложки ФЭП). Это позволит значительно повысить эффективность технологического процесса и снизить стоимость подготовки кремниевых пластин СЭ.

\*\*\*

Таким образом, разработана технология создания текстуры на основе слоев колоннообразного мультимпористого кремния с оптимальными свойствами отражения, максимально адаптированная к технологии создания высокоэффективных кремниевых СЭ. Использование мультитекстуры позволит увеличить КПД СЭ, упростить технологический цикл, снизить стоимость разработки СЭ и повысить их эксплуатационные характеристики. Совокупность этих факторов позволит в будущем повысить эффективность техно-

логии изготовления ФЭП для систем генерации электроэнергии.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Kazmerski L. L. Photovoltaics: A review of cell and module technologies // Renewable and Sustainable Energy Reviews.— 1997.— Vol. 1.— P. 71—170.
2. Coppede N., Toccoli T., Nardi M. et al. Nano hybrid material synthesis by supersonic beam codeposition for solar cells applications // First Int. Conference on Multifunctional, Hybrid and Nanomaterials.— Tours (France).— 2009.— P. 27.
3. Lei Y., Pascal J. L., Zitoun D. Novel synthetic route to porous silicon carbide // First Int. Conference on Multifunctional, Hybrid and Nanomaterials.— Tours (France).— 2009.— P. 07.
4. Beale M. I. J., Benjamin J. D., Uren M. J. et al. An experimental and theoretical study of the formation and microstructure of porous silicon // J. Cryst. Growth.— 1985.— Vol. 73.— P. 622—636.
5. Smith R. L., Collins S. D. Porous silicon formation mechanisms // J. Appl. Phys.— 1992.— Vol. 71, N R1.
6. Takashi Unagami. Formation mechanism of porous silicon layer by anodization in HF solution // J. Electrochem. Soc.— 1980.— Vol. 127.— P. 476.
7. Dubina V. Formation mechanism of porous silicon layers obtained by anodization of monocrystalline n-type silicon in HF solutions // Surface Science.— 1992.— Vol. 274, N. 1.— P. 82—92.
8. Yerokhov V., Melnyk I. I. Porous silicon in solar cell structures: A review of achievements and modern directions of further use // Renewable and Sustainable Energy Reviews.— 1999.— Vol. 3, N 4.— P. 291—322.
9. Hasse G., Christophersen M., Carstensen J. et al. New insights into Si electrochemistry and pore growth by transient measurements and impedance spectroscopy // Phys. Status Solidi A.— 2000.— Vol. 182, N 1.— P. 23—29.
10. Lust S., Levy-Clement C. Chemical limitations of macropore formation on medium-doped p-type silicon // J. Electrochem. Soc.— 2002.— Vol. 149.— P. C338.
11. Пат. 36642 України. Спосіб одержання поверхневої мультитекстури // В. Ю. Єрохов, А. А. Селемонавічус.— 10.11 2008.

Д. ф.-м. н. Я. И. ЛЕПИХ

Украина, Одесский национальный университет  
им. И. И. Мечникова  
E-mail: ndl\_lepikh@onu.edu.ua

Дата поступления в редакцию  
27.10 2008 г. — 14.05 2009 г.  
Оппонент к. т. н. В. Ф. КАТАЕВ  
(Ин-т термоэлектричества, г. Волгодонск)

## ДАТЧИК УГЛА ПОВОРОТА ГЕНЕРАТОРНОГО ТИПА С ЭЛЕМЕНТОМ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

*Разработан интеллектуализированный датчик угла поворота с акустоэлектронным элементом оригинальной конструкции, выполняющим роль линии задержки.*

Датчики, предназначенные для измерения угла поворота, как известно, относятся к числу наиболее широко используемых в оборудовании различного назначения. Потребность в них резко возросла в связи с созданием автоматизированного оборудования и развитием робототехники. При этом, кроме высоких требований по метрологическим характеристикам, к датчикам предъявляются требования по сопряженности с микропроцессорной техникой, что позволяет осуществлять их интеллектуализацию. В связи с этим, разработка датчиков, отвечающих комплексу указанных требований, весьма актуальна. Наиболее эффективным путем решения такой задачи является использование новых физических принципов, открытых в функциональной микроэлектронике, в частности, акустоэлектронике [1—3].

Нами разработан интеллектуализированный датчик угла поворота генераторного типа, соответствующий вышеуказанным требованиям. Он базируется на использовании акустоэлектронного элемента оригинальной конструкции на поверхностных акустических волнах (ПАВ), который выполняет роль линии задержки (ЛЗ) повышенной селективности в цепи автогенератора. Повышенная селективность ЛЗ на ПАВ обеспечивается использованием взвешенного встречно-штыревого преобразователя. Принцип действия датчика базируется на использовании анизотропии электрофизических параметров (ЭФП) монокристаллического пьезоэлектрического звукопровода элемента на ПАВ. При этом используется эффект зависимости рабочей частоты элемента на ПАВ от анизотропии ЭФП при вращении системы бесконтактных встречно-штыревых преобразователей [4].

Работа датчика, исходя из приведенной на **рис. 1** структурной схемы, не требует дополнительных пояснений.

Работа выполнялась при поддержке Министерства промышленной политики Украины в рамках Госзаказа на научно-техническую продукцию (договор № 92933/60)

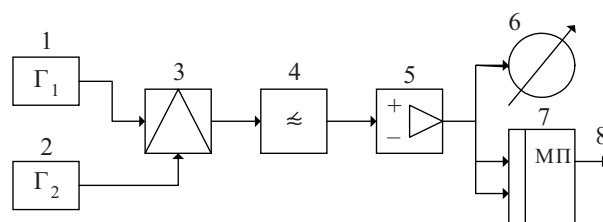


Рис. 1. Структурная электрическая схема датчика угла поворота:

1 — генератор с элементом на ПАВ; 2 — опорный генератор; 3 — смеситель; 4 — фильтр нижних частот; 5 — усилитель; 6 — измеритель; 7 — микропроцессор; 8 — выход к системе управления

Такой принцип построения датчика позволяет получить выходной сигнал в частотном виде, что существенно упрощает его сопряжение с микропроцессором и тем самым обеспечивает его интеллектуализацию. В качестве микропроцессора для построения датчика могут быть использованы интегральные микросхемы, например, типа USTI, разработанная специально для сенсоров с частотным выходом, либо типа MSP430FG и др. Это, в свою очередь, обеспечивает достаточно простую реализацию автоматического управления технологическими процессами в системах, где установлен датчик. Элементы на ПАВ для датчика изготавливаются групповыми методами тонкопленочной технологии микроэлектроники. Применение пьезокварца в качестве звукопровода элемента на ПАВ решает, вместе с тем, задачу обеспечения высокой точности и, при использовании SiO<sub>2</sub> ST-среза, — высокой температурной и временной стабильности параметров выходного сигнала.

Малая потребляемая мощность датчика обеспечивает выполнение требований по взрывобезопас-

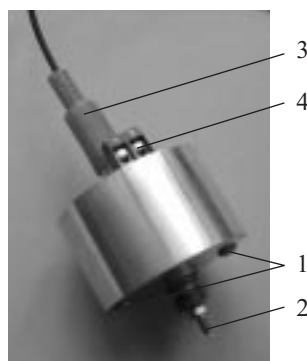


Рис. 2. Датчик угла поворота:

1 — элементы крепления к оборудованию; 2 — вращающийся вал; 3 — радиочастотный разъем выходного сигнала; 4 — разъем питания

ности, что существенно расширяет сферу его применения.

Внешний вид датчика показан на **рис. 2**.

Ниже приведены основные технические характеристики датчика:

|                                                 |                    |
|-------------------------------------------------|--------------------|
| максимальный измеряемый угол                    | 40°;               |
| погрешность измерения угла                      | не более 2 мин;    |
| крутизна характеристики преобразования          | не менее 30 кГц/°; |
| напряжение питания                              | 9±1 В;             |
| потребляемый ток                                | 30±2 мА;           |
| габаритные размеры датчика цилиндрической формы | Ø45×50 мм.         |

Датчик может быть выполнен с устройством цифровой индикации и без него. Во втором случае для измерений используется стандартный частотомер, а угол поворота может определяться простым пересчетом измеренных значений частоты через определенный постоянный коэффициент.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Lepikh Ya. I. The state and prospects of the sensor electronics based on acoustoelectronic phenomena // Sensor Electronics and Microsystems Technologies.— 2004.— N 1.— P. 45—58.
2. Лепіх Я. І., Мачулін В. Ф., Оліх Я. М. Акустоелектронні сенсори фізичних величин на поверхневих акустичних хвилях // 36. тез 3-ї Міжнар. наук.-техн. конф. «Сенсорна електроніка і мікросистемні технології» (СЕМСТ-3).— Одеса.— 2008.— С. 17—18.
3. Talbi A., Emazria O., Sarry F., Alnot P. Thickness and harmonic frequency effects on the range and sensitivity of SAW pressure sensor // The 16<sup>th</sup> European conference of solid-state transducers.— Prague (Czech Republic).— 2002.— Part 2.— P. 355—356.
4. Лепіх Я. І., Лопушенко В. К., Піддубний В. А., Жовнір М. Ф. Особливості створення хвильоводних структур для датчиків переміщень на ПАХ // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології.— 2008.— № 3.— С. 24—27.

#### ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

19-я Международная Крымская конференция

#### «СВЧ-ТЕХНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

14–18 сентября 2009 г.,  
г. Севастополь, Украина



Tel: +380-50-3931288  
Fax: +380-692-235258  
E-mail: [crimico.org@gmail.com](mailto:crimico.org@gmail.com)  
<http://www.crimico.org>

#### Основные направления:

- ✧ Твердотельные приборы и устройства СВЧ
- ✧ Моделирование и автоматизированное проектирование твердотельных приборов и устройств
- ✧ Электровакуумные и микровакуумные приборы СВЧ
- ✧ Системы СВЧ-связи, вещания и навигации
- ✧ Антенны и антенные элементы
- ✧ Пассивные компоненты
- ✧ Материалы и технология СВЧ-приборов
- ✧ Нанoeлектроника и нанотехнология
- ✧ СВЧ-электроника сверхбольших мощностей
- ✧ Электромагнитная и радиационная стойкость материалов и электронной компонентной базы
- ✧ СВЧ-измерения
- ✧ Прикладные аспекты СВЧ-техники
- ✧ СВЧ-техника в медицине и экологии
- ✧ Радиоастрономия, дистанционное зондирование и распространение радиоволн
- ✧ История исследований в области радиотехнологий

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Исследование влияния последовательно соединенных барьеров на физические процессы, происходящие в  $pAlGaInAs-nGaAs$ -гетеропереходе. (Узбекистан, г. Ташкент)
- Прогнозирование показателей надежности двухкаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства заданной конструкции в режиме  $\Delta T_{max}$ . (Украина, г. Одесса)
- Уменьшение влияния пироэлектрических зарядов на работу измерительных усилителей. (Украина, г. Одесса)
- Исследование влияния низкоэнергетических ионов аргона на образование и свойства электрически активных дефектов в кремнии. (Украина, г. Киев)



- Исследование влияния электронного облучения на кремниевые тензорезисторы. (Украина, г. Львов)
- Способы повышения эффективности многоканального фильтра доплеровского сигнала. (Украина, г. Одесса, г. Киев)
- Создание отечественных светофильтров с тонкопленочным прозрачным нагревателем. (Украина, г. Львов)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

В 1965 г. Гордон Мур, один из основателей фирмы Intel, на основании практических наблюдений высказал предположение, что число транзисторов на кристалле в дальнейшем будет удваиваться приблизительно каждые 24 месяца. Этот прогноз получил название «закон Мура», который хорошо знаком специалистам в области микроэлектроники. Спустя 40 лет закон продолжает работать, несмотря на начавшиеся еще в 1980-х годах попытки оспаривать сделанный прогноз.

В 2007 г. г-н Мур заявил, что его закон, очевидно, скоро перестанет действовать из-за атомарной природы вещества и ограничения скорости света. А в публикуемой ниже статье указывается временной предел действия этого закона, который следует из неоспоримых положений квантовой механики.

Перевод статьи из журнала "Proceedings of the IEEE" (N 8, Vol. 96, 2008. — Р. 1247—1248) выполнен профессором БГУИР В. В. Барановым и публикуется в сокращенном варианте.

Отметим, что на Конгрессе IEEE, который проходил в сентябре прошлого года в Квебеке (Канада), Гордону Муру в торжественной обстановке была вручена почетная медаль за заслуги в области микроэлектроники и в связи с 80-летием.



Г-н Г. Мур дает автограф проф. В. В. Баранову, делегату от Белорусской секции IEEE

ДЖЕЙМС Р. ПАУЭЛЛ

## КВАНТОВОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ ЗАКОНА МУРА

*Закон Мура точно предсказывал темпы роста мощности вычислительной техники, исходя из возрастания плотности транзисторов в кристалле интегральной схемы (ИС), начиная с 1965 г. Многие полагают, что эта тенденция будет продолжаться неопределенное время, однако законы квантовой физики могут ограничить предел миниатюризации и рост мощности компьютеров. Неопределенность Гейзенберга в терминах комптоновской длины волны частицы предполагает существование такого рода барьера даже для альтернативных подходов при квантовых вычислениях.*

Закон Мура явился надежным средством прогноза развития электронной технологии, начиная с 1965 г. [1]. Однако с помощью квантовой физики можно определить конечный предел для такого рода математической модели. Согласно закону Мура, плотность транзисторов и мощность компьютеров удваиваются

каждые два года, включая период, когда ИС состояли из сотен транзисторов, и в настоящее время, когда транзисторов в кристалле (чипе) миллионы. Это оспаривалось рядом специалистов, заявляющих, что технологическая эволюция иногда не следует прогнозам, и предсказывающих отмирание закона Мура. При этом утверждалось, что закон Мура, в конце концов, в будущем сойдет на нет из-за технологических и научных ограничений [2]. Тем не менее, до сих пор инженеры и ученые находили пути решения этих проблем, и закон Мура продолжает оставаться точным средством прогноза развития технологии.

Однако современная физика постулирует, что существует абсолютный предел разрешающей способности, которого может достичь наука и техника, и это связывается с неопределенностью Гейзенберга. Где сойдутся закон Мура и неопределенность Гейзенберга и явится ли это потолком продолжающегося удвоения вычислительной мощности каждые два года?

Гордон Мур во время интервью 18.09 2007 г. на проводимой дважды в год технической конференции Intel заявлял о том, что скоро придется столкнуться с законами физики: «В следующем десятилетии или в течение 15 лет мы наткнемся на что-то действительно фундаментальное». Затем он перешел к цитированию:

«Когда Стивена Хоукинга во время его визита на Intel в 2005 г. спросили, что является фундаментальным ограничением микроэлектроники, он указал на скорость света и атомное строение вещества». Определение предельного физического ограничения закона Мура и будет означать будущую границу миниатюризации в электронике.

Математически закон Мура может быть описан выражением

$$n_2 = n_1 2^{[(y_2 - y_1)/2]}. \quad (1)$$

Оно указывает на количество транзисторов  $n_2$  (или эквивалентную вычислительную мощность) в каждый данный год  $y_2$  в зависимости от количества транзисторов  $n_1$  в любой другой более ранний год  $y_1$ . Из определения закона Мура известно, что характеристический размер (длина  $L$ ) транзистора обратно пропорционален количеству транзисторов  $n$  на единице площади ИС. Если  $n$  определять в  $\text{м}^{-1}$ , то можно переписать выражение (1) в следующем виде:

$$1/L_2 = (1/L_1) 2^{[(y_2 - y_1)/2]}. \quad (2)$$

Для  $L_1$  можно взять  $0,045 \cdot 10^{-6}$  м — характеристический размер транзистора, достигнутый Intel и Advanced Micro Devices в 2008 году [3]. Что касается  $L_2$ , то эту величину можно рассматривать в рамках результатов текущих и перспективных исследований в области квантовой механики.

В одной из недавних статей сообщается о прорыве в так называемой «спинтронике» в связи с определением в полупроводнике спина электрона, инжектируемого с границы раздела металл/AlGaAs или металл/GaAs. В том эксперименте спин электрона рассматривался как своего рода электрический затвор, который может обеспечить переключение будущего транзистора. Полагая, что электрон — это будущий предел в данной технологии, что можно принять в качестве характеристического размера такого транзистора?

Исходя из неопределенности Гейзенберга, характеристическим размером электрона является комптоновская длина волны  $\lambda_c = h/m_e c = 2,4263 \cdot 10^{-12}$  м, при определении которой используется постоянная Планка  $h$ , масса электрона  $m_e$  и скорость света  $c$ . Комптоновская длина волны электрона, таким образом, является фундаментальным пределом для определения его положения в пространстве и основана на теории квантовой механики и специальной теории относительности. Поэтому  $\lambda_c$  является фундаментальным понятием для определения положения (или спина) частицы, что удовлетворяет предположению Стивена

Хоукинга, определяющего этот предел на основе скорости света и атомной природы вещества.

Переписав уравнение (2) с учетом современного характеристического размера транзистора и комптоновской длины волны  $2,4263 \cdot 10^{-12}$  м или  $0,00243$  нм, получим

$$(2,4263 \cdot 10^{-12} \text{ м})^{-1} = (0,045 \cdot 10^{-6} \text{ м})^{-1} \cdot 2^{[(y_2 - 2008)/2]}. \quad (3)$$

Решая уравнение относительно  $\Delta y = (y_2 - 2008)$ , получим

$$\ln(0,045 \cdot 10^{-6} / 2,43 \cdot 10^{-12}) = (\Delta y / 2) \ln 2. \quad (4)$$

Таким образом,

$$y_2 = \Delta y + y_1 = 2(9,827) / 0,693 + y_1 = 28,36 + 2008 = 2036 \text{ (год)}. \quad (5)$$

Полученный результат означает год окончания действия закона Мура, если предположить, что электрон является наименьшим квантовым элементом в структуре транзистора.

В итоге, вопрос о том, существует ли конечный предел для закона Мура, остается открытым, т. к. он зависит от инновационных решений в области физических основ электроники. Убедительным аргументом со стороны квантовой механики является то, что неопределенность Гейзенберга определяет конечный предел миниатюризации, который может быть достигнут в физике и технике полупроводников. Конкретными факторами могут выступать термические потери мощности, токи утечки, тепловой шум, что не способствует внедрению инноваций в структуре транзистора, но только для широко используемых ИС на основе кремния. В частных беседах г-н Мур утверждал, что в области техники полупроводников существуют и другие атомные ограничения, которые мешают даже приблизиться к пределу квантовой неопределенности. Однако, если эти технические проблемы будут все же преодолены, неопределенность Гейзенберга явится фундаментальным ограничением закона Мура и, если электрон рассматривать как наименьший компонент транзистора, то 2036 год станет той временной точкой, где сойдутся закон Мура и квантовая физика.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Moore G. E. Gramming more components onto integrated circuits. Electron. Mag., April 19, 1965.
2. Martell D. Intel's Moore muses on end of technology maxim, Reuters, Sep. 19, 2007.
3. Intel shows off next generation transistors, in Newscientist.com Net Service, Jan. 27, 2007. Available: [www.newscientist.com](http://www.newscientist.com)

Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ, к. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА,  
О. А. АБДУЛХАЕВ

Узбекистан, г. Ташкент, ФТИ НПО «Физика–Солнце»  
E-mail: karimov@uzsci.net.

Дата поступления в редакцию  
13.02 2009 г.

Оппонент к. т. н. Я. Я. КУДРИК  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫЕ $p^+-n-p^+$ -СТРУКТУРЫ С ОБЕДНЯЕМОЙ БАЗОВОЙ ОБЛАСТЬЮ

*Показано, что механизм токопереноса через  $p^+GaAs-nGaAs-p^+GaAs$ -структуру определяется инжекционно-туннельным и генерационно-рекомбинационным механизмами. Структуры представляют интерес для создания ограничителей напряжения и электронных переключателей.*

Полупроводниковые  $p^+-n-p^+$ -структуры отличаются разнообразием функциональных характеристик и сфер применения. Управляемое изменение параметров определенных областей  $p^+-n-p^+$ -структуры приводит к существенным изменениям электронных процессов, протекающих в них. В случае смыкания обедненных областей  $p^+-n$ -переходов они превращаются в инжекционно-пролетные диоды, а при неполном обеднении становятся основой биполярных транзисторов, предназначенных для усиления электрических сигналов. Исследования  $p-n-p$ -структур как элементов биполярного транзистора проводятся широко, в то время как сведения об исследовании  $p^+-n-p^+$ -структур в режиме смыкания приведены в единичных работах [1, 2], хотя они в качестве ограничителей напряжения должны обладать определенным пре-

имуществом в части термостабильности и быстродействия, по сравнению с диодами типа  $p^+-n-n^+$ , основанными на лавинном или зинеровском пробое [3].

В настоящей статье приведены некоторые характеристики арсенид-галлиевых  $p^+-n-p^+$ -структуры как основы для изготовления ограничителей напряжения.

Исследуемая  $p^+GaAs-nGaAs-p^+GaAs$ -структура получена выращиванием из жидкой фазы в едином процессе эпитаксиальных слоев  $n$ - и  $p^+$ -типа проводимости на сильнолегированной арсенид-галлиевой подложке  $p^+$ -типа толщиной 400 мкм. Толщина эпитаксиальных слоев  $n$ - и  $p^+$ -типа составляет 1,5 и 2,5 мкм, соответственно. Концентрация носителей в базовой области  $nGaAs$  равна  $N_n=7\cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. С целью предотвращения расширения слоя обеднения в полученный эпитаксиальный слой  $p^+$ -типа, т. е. для сохранения высокой концентрации примесей в эпитаксиальном слое, в раствор-расплав  $Ga+p^+GaAs$  дополнительно добавляли металлический цинк. С другой стороны, этот прием предусматривал уменьшение концентрации носителей у границы базовой области  $nGaAs$  и сосредоточение области объемного заряда в самой базовой области (рис. 1, а). Эквивалентная схема  $p^+-n-p^+$ -структуры состоит из навстречу включенных переходов  $p^+$ (подложка)– $n$ (пленка) и

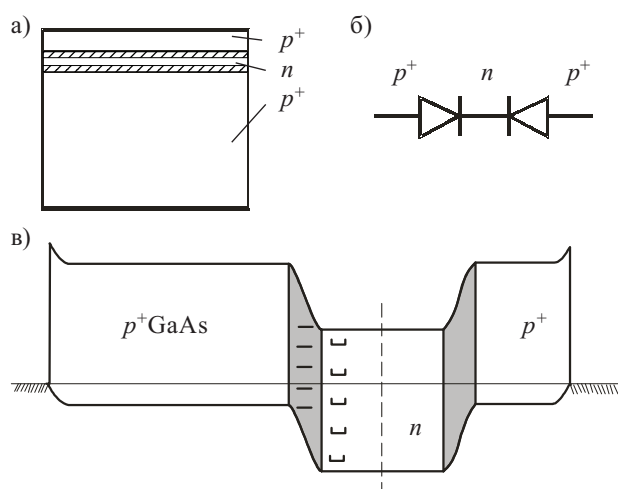


Рис. 1. Геометрическая конструкция (а), эквивалентная схема (б) и качественная энергетическая зонная диаграмма (в)  $p^+-n-p^+$ -структуры

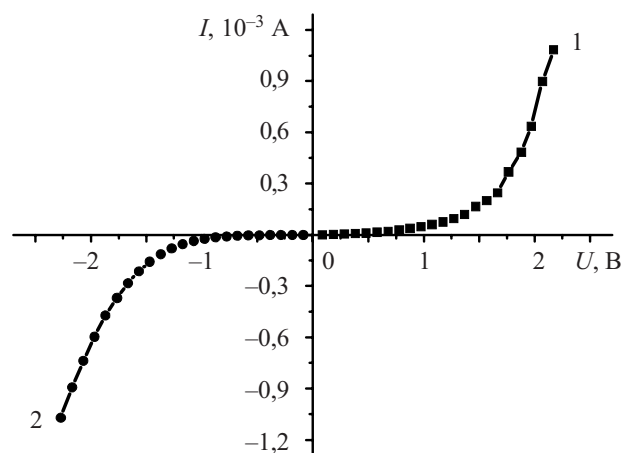


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика структуры при различных режимах включения:

1 — (–) $p^+-n-p^+(+)$ , обратно смещен переход  $p^+$ (подложка)– $n$ ;  
2 — (+) $p^+-n-p^+(-)$ , обратно смещен переход  $n$ – $p^+$ (пленка)

Таблица 1

Температурные коэффициенты структуры  $p^+GaAs-nGaAs-p^+GaAs$  при различных режимах включения.

| $\Delta T = T_2 - T_1, ^\circ C$ | $\alpha, B/^\circ C$ |                   |
|----------------------------------|----------------------|-------------------|
|                                  | $(+)p^+-n-p^+(-)$    | $(-)p^+-n-p^+(+)$ |
| 40—20                            | 0,005                | 0,0055            |
| 60—40                            | 0,0056               | 0,0055            |
| 80—60                            | 0,006                | 0,005             |

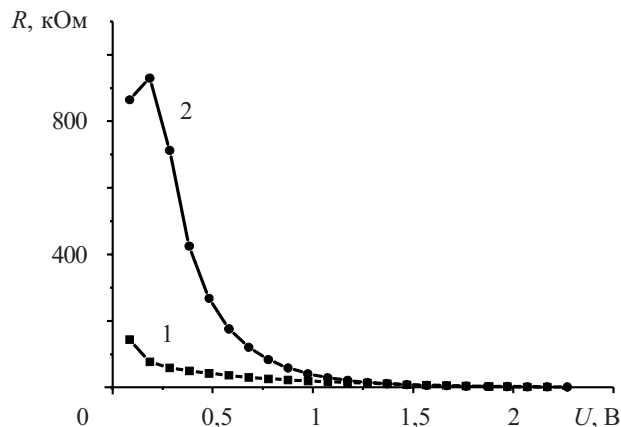


Рис. 3. Дифференциальное сопротивление  $p^+-n-p^+$ -структуры при различных режимах включения:

1 —  $(-)p^+-n-p^+(+)$ ; 2 —  $(+)p^+-n-p^+(-)$

$n$ (пленка)— $p^+$ (пленка) (рис. 1, б), что также показано на энергетической зонной диаграмме (рис. 1, в).

Исследования темновых вольт-амперных характеристик показали, что при смене полярности прикладываемого напряжения получаются две обратные ветви, обусловленные поочередным запирающим  $p^+-n$  и  $n-p^+$ -переходами (рис. 2, кривые 1, 2). Отличие этих переходов состоит в том, что  $p^+-n$ -переход сформирован на объемной подложке из  $p^+GaAs$ , выращенного методом Чохральского, марки АГЧЦ, а  $n-p^+$ -переход является эпитаксиальным. Области как  $n$ -типа, так и  $p^+$ -типа представляют собой эпитаксиальные слои. Сопоставление сопротивлений обоих переходов при напряжении 0,08 В показывает, что эпитаксиальный  $n-p^+$ -переход имеет в 6,5 раз большее сопротивление, по сравнению с сопротивлением  $p^+-n$ -перехода, и, надо полагать, большую толщину слоя объемного заряда (рис. 3). Величина сопротивления  $n-p^+$ -перехода резко уменьшается с увеличением приложенного напряжения, как и у ограничителей напряжения [4]. Именно в режиме запирающего  $n-p^+$ -перехода наблюдается переход из низкопроводящего состояния в высокопроводящее, а в другом  $p^+-n$ -переходе это состояние выражено неярко. Это указывает на то, что

электронные процессы несколько отличаются друг от друга при смене полярности рабочего напряжения. Из последовательности расположения  $p$ - и  $n$ -областей вытекает, что область объемного заряда  $p^+GaAs-nGaAs$ -перехода в режиме  $(-)p^+-n-p^+(+)$  расширяется противоположно направлению тока, в частности в сторону  $nGaAs-p^+GaAs$ -перехода. При этом у границы области объемного заряда противоположного перехода остается квазинейтральная область, что исключает возможность проявления ТОПЗ-механизма [5]. Аналогичная картина предполагается и в другом режиме  $(+)p^+-n-p^+(-)$ .

Что касается температурных свойств, отметим, что температурные зависимости вольт-амперных характеристик структуры с  $p-n$ -переходами могут дать сведения о ее функциональных возможностях. В частности, опираясь на значения температурного коэффициента  $\alpha$  (отношение изменения падающего напряжения к разности температур, вызывающей это изменение,  $\alpha = \Delta U / \Delta T$  [6]) можно характеризовать полупроводниковый прибор с  $p-n$ -переходами как термодатчик или как ограничитель напряжения. В нашем случае температурные исследования вольт-амперной характеристики  $p^+-n-p^+$ -структуры на основе арсенида галлия при различных режимах включения (рис. 4) показали, что температурный коэффициент имеет низкие значения (см. табл. 1).

Следует отметить, что перестроив графики температурной зависимости вольт-амперной характеристики в двойном логарифмическом и полулогарифмическом масштабах (рис. 5, кривые 1—4), можно определить закономерности зависимости тока от напря-

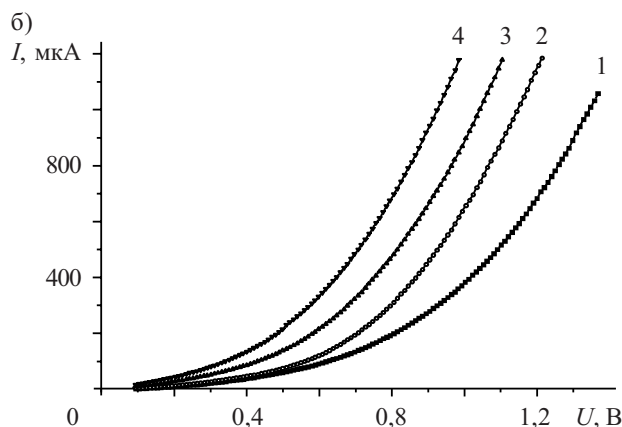
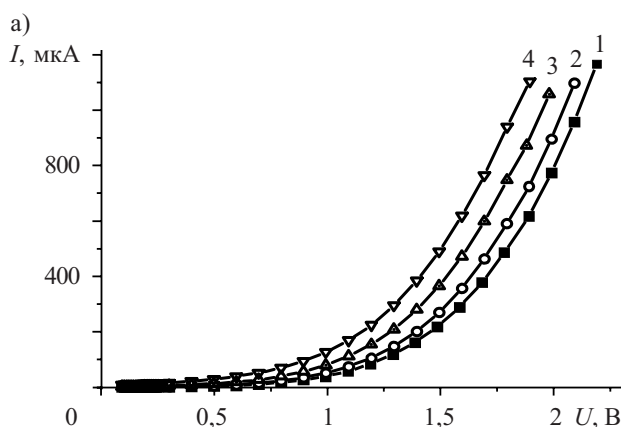


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики структуры на основе арсенида галлия для различных  $T$  в  $^\circ C$  (1 — 20; 2 — 40; 3 — 60; 4 — 80) при режимах включения:

а —  $(+)p^+-n-p^+(-)$ ; б —  $(-)p^+-n-p^+(+)$

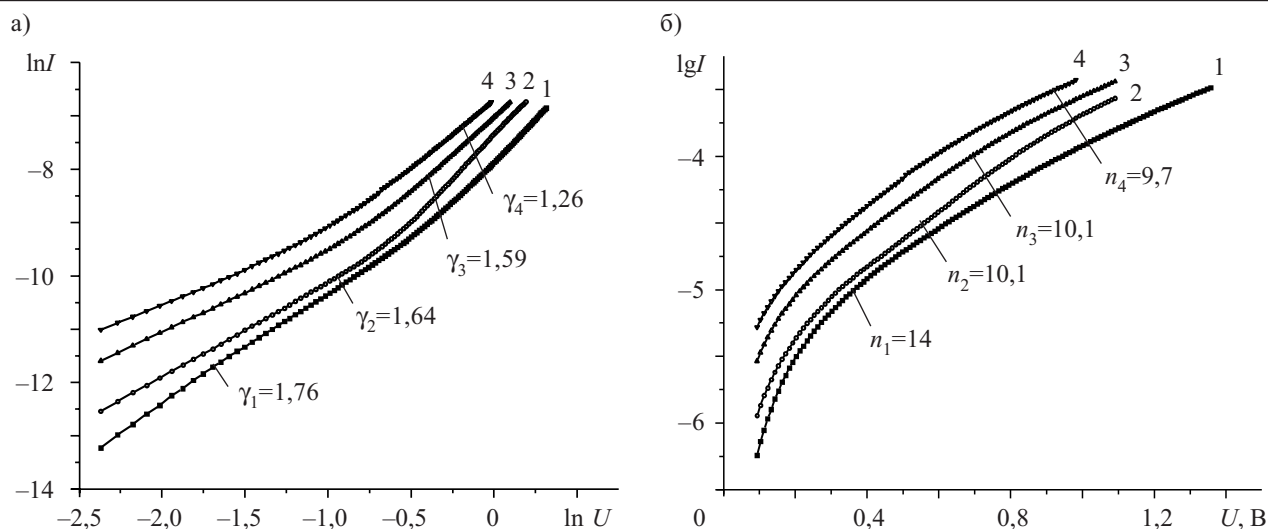


Рис. 5. ВАХ структуры в двойном логарифмическом (а) и полулогарифмическом (б) масштабах в режиме  $(-)p^+-n-p^+(+)$  для различных  $T$  в  $^{\circ}\text{C}$ :  
1 — 20; 2 — 40; 3 — 60; 4 — 80

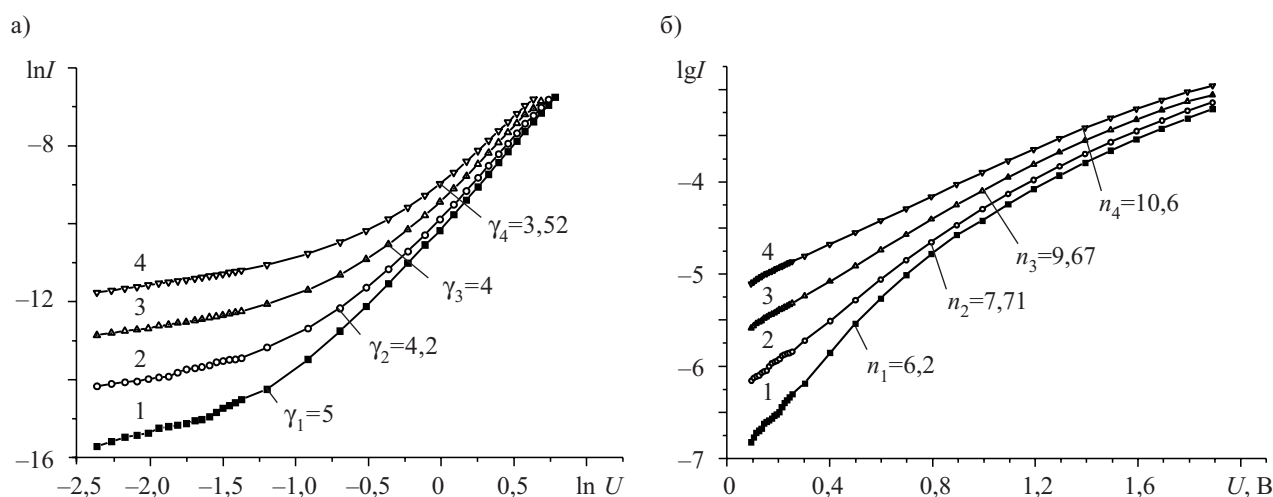


Рис. 6. ВАХ структуры в двойном логарифмическом (а) и полулогарифмическом (б) масштабах в режиме  $(+)p^+-n-p^-(-)$  для различных  $T$  в  $^{\circ}\text{C}$ :  
1 — 20; 2 — 40; 3 — 60; 4 — 80

жения в заданном диапазоне напряжений, т. е. физические процессы, объясняющие механизмы токопереноса. Как видно из рис. 5, а, в режиме запирающего  $(-)p^+-n$ -перехода на начальном участке (до напряжения 0,68 В) при комнатной температуре имеем степенную зависимость с показателем  $\gamma_1=1,76$ , обусловленную рекомбинационными процессами в области объемного заряда и квазинейтральной области базы. Далее, с повышением напряжения от 0,6 до 1,4 В, имеет место экспоненциальная зависимость тока от напряжения с коэффициентом неидеальности  $n=14$ , связанная с инжекционными процессами в  $n-p^+$ -переходе (рис. 5, б). С повышением температуры от комнатной до  $80^{\circ}\text{C}$  показатель степени  $\gamma$  последовательно уменьшается до 1,26, а коэффициент неидеальности  $n$  уменьшается вначале до 10,1, а затем до 9,7. Такое поведение токовой зависимости можно объяснить рекомбинационно-генерационными и инжекционно-туннельными процессами.

В режиме запирающего  $n-p^+(-)$ -перехода (рис. 6) до напряжения 0,8 В имеет место экспоненциальная зависимость с коэффициентом неидеальности 6,2, обусловленная инжекционными процессами в  $p^+-n$ -переходе, поддерживаемыми туннелированием носителей через  $n-p^+(-)$ -переход. Далее, в интервале напряжения от 0,8 до 2 В, наблюдается степенная зависимость с показателем  $\gamma=5$  (рис. 6, а), связанная с туннельно-рекомбинационными процессами. С повышением температуры процесс инжекции носителей усиливается и коэффициент неидеальности увеличивается до 10,6, а показатель степени  $\gamma$  уменьшается до 3,52. Наблюдаемые зависимости можно объяснить инжекционно-рекомбинационными процессами.

Анализ результатов исследования вольт-амперных характеристик показывает, что на начальном участке в  $p^+-n$ -переходе имеем степенную зависимость, а на  $n-p^+$ -переходе — экспоненциальную, и наоборот, при напряжении, превышающем контактную разность

Таблица 2

Характеристические параметры  $p^+GaAs-nGaAs-p^+GaAs$ -структуры при различных режимах включения в зависимости от температуры

| $T, ^\circ C$ | $(-)p-n-p(+)$             |                                | $(+)p-n-p(-)$             |                                |
|---------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
|               | $\gamma$ при $I \sim U^q$ | $n$ при $I \sim \exp qU/(nkT)$ | $\gamma$ при $I \sim U^q$ | $n$ при $I \sim \exp qU/(nkT)$ |
| 20            | 1,76                      | 14                             | 5                         | 6,2                            |
| 40            | 1,64                      | 10,1                           | 4,2                       | 7,71                           |
| 60            | 1,59                      | 10,1                           | 4,0                       | 9,57                           |
| 80            | 1,26                      | 9,7                            | 3,52                      | 10,6                           |

Примечание:  $q$  — заряд электрона,  $k$  — постоянная Больцмана

потенциалов, в  $p^+-n$ -переходе имеем экспоненциальную зависимость, а на  $n-p^+$ -переходе — степенную (табл. 2).

Отсюда следует, что механизмы токопереноса в  $p^+GaAs-nGaAs-p^+GaAs$ -структуре определяются параметрами модулируемой части базовой области. Это объясняется тем, что базовая область как бы разбивается на две части. Независимо от направления хода модуляции базы, при модуляции со стороны, прилегающей к подложке этой части базы, вольт-амперная зависимость является степенной функцией, а при модуляции со стороны эпитаксиального  $n-p^+$ -перехода зависимость становится экспоненциальной. Сопоставление значений тока показывает, что при запирации  $p^+-n$ -перехода ток в 6 раз больше, чем при запирации эпитаксиального  $n-p^+$ -перехода ( $I=6,10^{-7}$  А против  $1 \cdot 10^{-7}$  А при  $U=0,0865$  В). С другой стороны, наблюдаемые токовые характеристики можно объяснить технологическим разделением базовой области на две части — более совершенную и дефектную. В частности, со стороны подложки (с концентрацией дефектов  $10^4$  см $^{-2}$ ) в эпитаксиальном слое создаются дефекты, концентрация которых убывает по толщине. В результате создаются условия для инжекции, туннелирования дырок и захвата их на уровни, а также последующей их рекомбинации с электронами (рис. 7).

Таким образом, ток через  $p^+GaAs-nGaAs-p^+GaAs$ -структуру определяется инжекционно-туннельным и генерационно-рекомбинационным механизмами. При модуляции части базы, содержащей дефекты, преобладает инжекционно-туннельный ток, а при модуляции части базы с меньшей дефектностью определяющими являются генерационно-рекомбинационные токи. В режиме запиарания  $n-p^+$ -перехода, из-за низких значений обратных токов инжекционные токи через прямовключенный  $p^+-n$ -переход ограничиваются, т. е. определяются обратным током  $n-p^+$ -перехода. Вместе с тем, поскольку база является тонкой, инжектированные дырки не могут изменить ее параметры.

\*\*\*

Результаты проведенных исследований показывают, что хотя сама  $p^+GaAs-nGaAs-p^+GaAs$ -структура

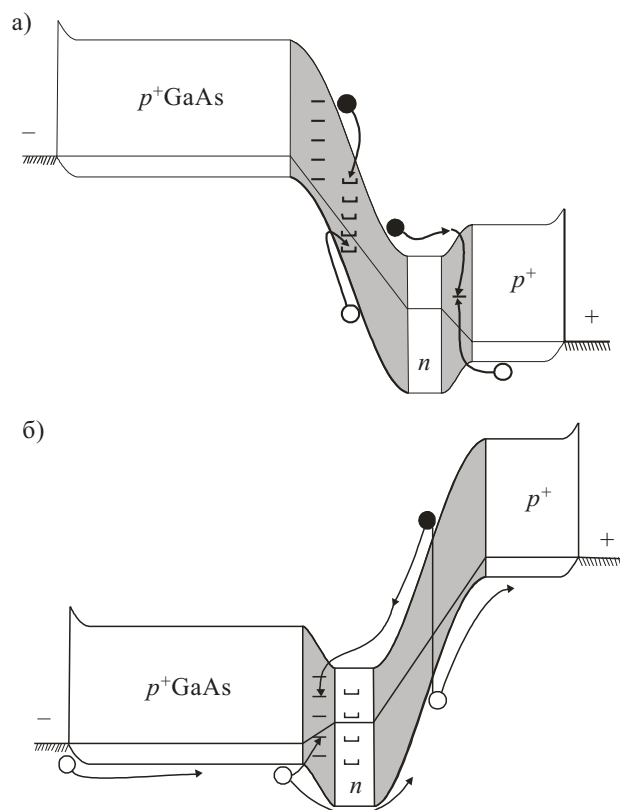


Рис. 7. Качественные энергетические зонные диаграммы  $p^+-n-p^+$ -структуры

внешне является симметричной, ее характеристиками можно управлять за счет создания эпитаксиального  $nGaAs-p^+GaAs$ -перехода с малыми обратными токами. Режим малых обратных токов является целесообразным для ограничителей напряжения.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Cohen E. D. Trapatts and impatts — state of the art and application // Microwave J.— 1977.— N 20.— P. 22.
2. Пат. 2006994 РФ. Структура полупроводникового инжекционно-пролетного прибора / А. В. Наумов, В. И. Санкин.— 30.01 1994.
3. Козлов В. А., Кардо-Сысоев А. Ф., Брылевский В. И. Волновой ударно-ионизационный пробой дрейфовых диодов с резким восстановлением // ФТП.— 2001.— № 5.— С. 629—632.
4. Рассел Билл. Защита систем передачи данных от переходных процессов. [http://www.icquest.ru/html/articles/semtech\\_art.html](http://www.icquest.ru/html/articles/semtech_art.html)
5. Лебедев Э. А., Диттрих Т. Ток, ограниченный пространственным зарядом, в пористом кремнии и анатазе (TiO $_2$ ) // ФТП.— 2002.— № 10.— С. 1268—1271.
6. Тиходеев Ю. С., Трутко А. Ф. Обзор и анализ возможностей расчета полупроводниковых приборов и некоторые идеи создания новых СВЧ полупроводниковых приборов // Сб. статей. Полупроводниковые приборы и их применение.— М.: Сов. радио.— 1971.— Вып. 25.— С. 315—328.

Л. Ф. КОВАЛЕНКО, И. Ю. ЖУРАКОВСКИЙ,  
В. В. СТАШЕВСКИЙ, В. В. СЕВАСТЬЯНОВ

Украина, г. Винница, НИИ «Гелий»  
E-mail: lctec@svitonline.com

Дата поступления в редакцию  
12.11 2008 г. — 16.06 2009 г.

Оппонент д. т. н. В. М. СОРОКИН  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МОНИТОРЫ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

*Рассматриваются особенности конструирования авиационных мониторов на ЖК-панелях. Выделены ключевые вопросы обеспечения заданных эксплуатационных характеристик ЖК-мониторов в кабине самолета.*

В настоящее время основными производителями и поставщиками ЖК-мониторов для авиационной промышленности являются зарубежные фирмы. Наиболее качественные и надежные мониторы предлагают Varco (Бельгия), MicroMax, Audin Displays (США), КБ «Технотроник», НИИ «Волга», «Авиаприбор-Холдинг» (Россия), КБ «Дисплей», ИЦТ «Горизонт», «Микровидеосистемы» (Республика Беларусь) [1]. В Украине мнемонические ЖК-мониторы для авиации выпускает НТК «Электронприбор» совместно с СКТБ ИФП им. В. Е. Лашкарёва.

Главным предприятием в Украине по средствам отображения информации является НИИ «Гелий» (г. Винница), которое занимается разработкой и производством ЖК-дисплеев (на фотографиях представлены образцы выпускаемых ЖК-мониторов).

Применение ЖК-мониторов в авиационной технике обуславливает следующие преимущества (по сравнению с традиционно применяемыми электронно-лучевыми трубками и электромеханическими приборами):

- малый вес и малое энергопотребление;
- плоскую конструкцию;
- отсутствие высоковольтных напряжений;
- высокую надежность;
- отсутствие геометрических и нелинейных искажений;
- невосприимчивость к внешним электромагнитным полям.

Дополнительные преимущества ЖК-дисплеев заключаются в высокой яркости экрана (до 1000 кд/м) [2], больших углах обзора по горизонтали (110°) и вертикали (70°) при контрасте 1:20, широком диапазоне регулировки яркости, четкости считывания информации, незначительной площади обрамления экрана.

Размещение ЖК-мониторов в кабине самолета [1, 3] выдвигает ряд дополнительных требований к изделию по надежности и стойкости в связи с особыми

условиями эксплуатации, а именно: широким рабочим диапазоном температуры (от -40 до +55°C), яркой внешней засветкой (до 110 тыс. лк), механическими ударами (до 15g) и вибрациями в широком диапазоне частот (с суммарным среднеквадратическим ускорением до 5g). Кроме того, от авиационных мониторов требуется высокое качество динамического изображения и полная достоверность отображаемой информации при ее быстрой смене.

Для работы в таких условиях предусмотрен ряд мер по защите жидкокристаллического экрана (панели) и усилению конструкции видеомонитора. ЖК-экраны размещают в облегченном, но прочном герметичном корпусе, в котором также размещаются нагревательный элемент с датчиком температуры, система световых фильтров, устройство подсветки и защитное стекло с антибликовым покрытием (**рис. 1**).



Рис. 1. Структурная схема монитора

Если монитор универсальный (**рис. 2**), то его конструкция ограничивается корпусом и внешним интерфейсом для ввода информации (LVDS- или TTL-формата) и вывода информации о температурном режиме или внешней освещенности. Монитор многофункционального назначения (**рис. 3**) содержит блоки обработки видеoinформации и сопряжения с другими устройствами типа ЭВМ, а по периметру корпуса на лицевой панели — функциональные клавиши



Рис. 2. Универсальный 10,4"-монитор

управления и датчики замера внешней освещенности монитора.

Среди физических параметров авиационных мониторов выделяют размер и форму рабочей зоны (квадратная или прямоугольная), разрешающую способность (количество и размер пикселей), размер обрамления. Эти параметры отличаются от аналоговых параметров обычных мониторов, которые имеют характерные пропорции 3×4 или 9×16 в альбомной ориентации.

Мониторы для авиационной техники сконструированы таким образом, чтобы соответствовать промышленным и военным стандартам, и, как правило, имеют форму квадрата. Если же применяются прямоугольные мониторы, то, в основном, в портретной ориентации (рис. 4).

Защита ЖК-матрицы от внешних механических воздействий обеспечивается размещением перед матрицей защитного экрана, изготовленного из ударопрочного стекла толщиной 1,2 мм. Для четкого счи-



Рис. 3. Многофункциональный 10,4"-индикатор



Рис. 4. ЖК-мониторы в портретном (10,4") и альбомном (6,5") вариантах исполнения

тывания информации при внешних подсветках на защитный экран наносится специальное антибликовое покрытие.

ЖК-дисплеи являются пассивными устройствами отображения информации. Для того, чтобы сформированное изображение воспринималось глазом человека, его необходимо подсветить, в простейшем случае — естественным внешним светом. При недостаточном естественном освещении или его отсутствии предусматривается искусственный источник света. Большинство современных ЖК-матриц (LCD) работают в одном из трех режимов: в режиме полного отражения, при котором свет отражается от рефлектора, расположенного на тыльной стороне дисплея; в режиме полупрозрачности, при котором рефлектор отражает внешний фронтальный свет, но способен пропускать свет от источника, расположенного позади него; в режиме подсвечивания, при котором рефлектор отсутствует, а для подсветки изображения используется специальный фоновый источник света.

Прием, при котором используется специальный фоновый источник света, получил название «подсветка» (backlight). Для реализации подсветки используется несколько технологий, таких как электролюминесцентная (EL), светодиодная (LED) и подсветка флуоресцентными лампами с холодным катодом (CCFL).

Электролюминесцентная подсветка обеспечивает равномерное освещение и получение свечения различных цветов, в том числе и белого, чаще всего используемого в LCD. Источник света выполняется в тонком легком конструктиве. Энергопотребление при электролюминесцентной подсветке относительно мало, однако для ее организации необходим дополнительный источник переменного напряжения от 80 до 100 В с частотой около 400 Гц (типовое значение). В качестве такого источника используют преобразователи (инверторы) DC/AC, трансформирующие напряжение постоянного тока 5, 12, или 24 В в переменное напряжение требуемой величины. Срок жизни электролюминесцентной подсветки (снижение яркости наполовину) составляет

3000—5000 ч и зависит от установленной яркости свечения. Особенности электролюминесцентной подсветки следующие:

- плоский источник света с максимальной толщиной 1,3 мм, обеспечивающий равномерную подсветку большой площади;
- широкий диапазон напряжения питания переменного тока (максимальное напряжение 150 В) частотой 60...1000 Гц;
- цвет свечения зелено-голубой, желто-зеленый и белый.

*Светодиодная подсветка* характеризуется самым длительным сроком службы — минимум 50000 ч и большей, чем у EL-подсветки, яркостью [4]. Подсветка может работать от источника напряжения 5 В (с установкой токоограничительных резисторов). Цепочка светодиодов располагается вдоль боковых поверхностей дисплея или в виде матрицы под диффузором (рассеивателем). Цвет LED-подсветки может быть разным, но чаще всего используется желто-зеленый. Особенности светодиодной подсветки следующие:

- низкое напряжение питания;
- длительный жизненный цикл — в среднем выше 100000 ч;
- возможность подсвечивать красным, зеленым, оранжевым и белым цветом или многоцветной подсветки.

*Подсветка флуоресцентными лампами с холодным катодом* характеризуется относительно малым энергопотреблением и белым цветом очень большой яркости.

Используются как прямая, так и боковая подсветки. В обоих случаях свет распределяется по всей площади экрана диффузорами (diffuser) и световодами (light guide). Мониторы с боковой подсветкой имеют малую толщину и малое энергопотребление. Срок службы CCFL-подсветки 40000—50000 ч. Особенности подсветки флуоресцентными лампами с холодным катодом:

- высокая яркость;
- долговечность;
- малое потребление энергии;
- излучение белого света.

В зависимости от технических требований к ЖК-монитору используется любой из рассмотренных видов подсветки. На сегодняшний день технология изготовления светодиодов позволяет получить источники белого света с высокой светоотдачей, с уменьшенной стоимостью производства и более длительным сроком службы (сейчас производители указывают приблизительно 50000 ч непрерывного использования). Ввиду этого, белые светодиоды заняли доминирующее положение для использования их в качестве источников света в конструкциях подсветки ЖК-мониторов.

Уровень внешней освещенности в кабине пилота изменяется от темноты до прямого солнечного света (около 110000 лк). Информация, отображаемая на экране монитора, должна легко считываться в условиях высокого освещения, что требует наличия очень яркой подсветки, обеспечивающей яркость экрана до 800 кд/м<sup>2</sup> и выше. Кроме того, яркость подсветки должна изменяться от 0,4 до 800 кд/м<sup>2</sup> для удобного ночного отображения. Для регулировки яркости предусмотрены два режима: «день» — от 30 до 800 кд/м<sup>2</sup> и «ночь» — от 0,4 до 15 кд/м<sup>2</sup>, а также автоматическая регулировка яркости в зависимости от изменения внешней освещенности.

При функционировании ЖК-монитора в условиях пониженной температуры окружающей среды (от 0 до -40°C) для обеспечения требуемого времени переключения ЖК-ячеек (15—30 мс) в конструкции видеомонитора предусмотрена система термостабилизации, состоящая из температурного датчика и нагревательного элемента. Нагревательный элемент изготавливается из термостойкого стекла с нанесенной на него прозрачной резистивной пленкой In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ITO) и металлическими контактами для подключения к блоку управления температурой. Нагревательное стекло располагается на тыльной стороне ЖК-матрицы и имеет оптический и непосредственный термический контакты с ЖК-пакетом, что обеспечивает оперативный прогрев пакета до плюсовой температуры при снижении температуры окружающей среды ниже 0°C и исключает образование капель росы при обратном процессе.

Изготовление мониторов для жестких условий эксплуатации требует высокой профессиональной подготовки персонала, наличия производственных «чистых» зон, оборудования для проверки и испытаний ЖК-панелей и мониторов.

Знание вышеперечисленных особенностей конструкции ЖК-мониторов и решение связанных с ними проблем позволит в ближайшее время организовать их производство в Украине и обеспечить авиационную промышленность отечественными авиационными ЖК-мониторами.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Беляев В., Жуков Н. Дисплеи с повышенной надежностью для авиации и военной техники // Электронные компоненты. — 2002. — № 2. — С. 20—24.
2. Жданкин В. К. Плоскопанельные жидкокристаллические дисплеи повышенной яркости // Современные технологии автоматизации. — 2004. — № 1. — С. 36—42.
3. Гузенкова Н. Д. Состояние и перспективы развития рынка дисплеев военного назначения в США // Электронная промышленность. — 2006. — № 4. — С. 91—96.
4. Самарин А. Светодиодная динамическая подсветка цветных ЖК-дисплеев // Электронные компоненты. — 2003. — № 4. — С. 80—82.

Д. т. н. С. П. НОВОСЯДЛЫЙ, В. М. ВИВЧАРУК

Украина, г. Ивано-Франковск, Прикарпатский национальный  
университет им. В. Стефаника  
E-mail: nsp@pu.if.ua, vivov@bigmir.net

Дата поступления в редакцию  
24.06 2008 г. — 30.01 2009 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ  
(НПО «Физика-Солнце», г. Ташкент)

## ФОРМИРОВАНИЕ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ С ИЗОЛЯЦИЕЙ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОКИСЛЕННЫМ ПОРИСТЫМ КРЕМНИЕМ

*Разработана технология горизонтальной и вертикальной изоляции элементов БИС на основе пористого кремния, исследована возможность его использования для формирования МОП-транзисторов.*

Современная субмикронная схемотехника требует размещения на одном кристалле совмещенных аналоговой, цифровой и силовой частей функциональной схемы. Соответственно, такие схемы должны реализовываться с использованием как биполярных, так и полевых транзисторов, т. е. в одном технологическом маршруте должны быть совмещены биполярная, КМОП- и ДМОП-технологии. Совместить эти технологии можно только на базе кремниевых эпитаксиальных структур (КЭС). С другой стороны, эпитаксиальный кремний позволяет качественно формировать очень тонкий подзатворный диэлектрик, который лишен туннельного эффекта. Кроме того, современные КЭС можно реализовывать также с локальной эпитаксией [1—3]. Переход на сверхтонкие функциональные слои требует качественной изоляции активных элементов и обеспечения их высокой радиационной стойкости. Здесь лидирует так называемая SOI-технология (Silicon-On-Insulator), которую называют еще КНИ (кремний-на-изоляторе). Существует много методов ее реализации, каждый из которых имеет как преимущества, так и существенные недостатки [1, 4, 5].

МОП-транзисторы, изготовленные по технологии «кремний-на-изоляторе», очень перспективны для создания мощных и высокоскоростных БИС с напряжением питания не выше 1,2 В, т. к. наличие толстого окисла вместо кремния под областями истока и стока существенно уменьшает величину емкости между ними и подложкой. Вторым преимуществом является достаточно надежная изоляция активных компонентов (хотя технология ее получения довольно сложна) и высокая степень интеграции благодаря отсутствию изолированных *n*- или *p*-карманов.

В данной статье предложен новый метод формирования эпитаксиальных структур для технологии «кремний-на-изоляторе».

В основе существующей SOI-технологии лежат два метода диэлектрической изоляции для изготовления пластин КНИ — метод SmartCut и метод

DeleCut. Фактически, второй метод является модернизацией первого. Оба они достаточно дороги и имеют большие технологические трудности. Рассмотрим физические процессы, лежащие в их основе, и проанализируем их технологичность и себестоимость.

Имплантационный метод (SmartCut) предусматривает внедрение в глубину Si-пластины ионов кислорода, которые и формируют скрытый слой окисла на глубине 0,5—0,6 мкм.

Метод водородного переноса кремния с окислом (DeleCut) заключается в прямом сращивании облученной водородом донорной окисленной Si-пластины с опорной подложкой с последующим почти полным удалением донорной пластины путем ее отслоения внедренным водородом. Имплантация ионов водорода ( $H^+$ ) проводится через тонкий слой  $SiO_2$ , который после легирования стравливается. В результате доза атомов водорода, необходимая для отслоения (скола) тонкой пленки кремния, уменьшается до величины  $(3—5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , которая и является оптимальной. Такой метод формирования значительно уменьшает толщину границы раздела Si— $SiO_2$ , которая составляет лишь 0,3—0,6 нм. В методе SmartCut толщина этого переходного слоя составляет примерно 3 нм.

Таким образом, основной особенностью способа изготовления структур DeleCut является формирование скрытого диэлектрика ( $SiO_2$  термического) на необлученной Si-подложке, что предопределяет очень низкую плотность радиационных дефектов. Вторым важным преимуществом этого метода является практически полное отсутствие термомеханических напряжений, влияющих на термическую стабильность.

Как кислородный имплантационный, так и водородный методы формирования изоляции являются очень прецизионными и дорогими.

### Эксперимент и моделирование процесса

В данной статье предлагается универсальная структура БИС, созданная по совмещенной Би-К-Д-МОП-технологии. В этой структуре изоляция окислом заменяется на оксинитридную изоляцию и изоляцию окисленным пористым кремнием.

Вернемся к структуре МОП-транзистора, сформированной по SOI-технологии (рис. 1). К недостаткам ее методов изоляции следует отнести следующее.

1. Высокоэнергетическое кислородное внедрение (SmartCut) требует применения дополнительного диэлектрика типа полиимида и вводит значительные ра-

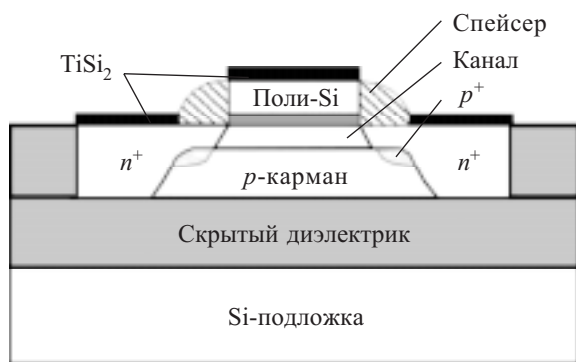


Рис. 1. SOI-структура МОП-транзистора

диационные повреждения, которые увеличивают толщину межфазной границы раздела Si-SiO<sub>2</sub>.

2. Водородный метод сращивания Si-пластин (DeleCut) требует очень высокого качества Si-подложек по плоскостности и введения дополнительной механической операции полирования исходных пластин, которая вносит дополнительную дефектность.

Мы предложили технологию формирования КЭС для технологии SOI, которая позволит формировать все три вида транзисторов — биполярные, КМОП и ДМОП [6, 7].

Первой особенностью данной технологии является использование эпитаксиального монокремния, который наносится на Si-подложку методами молекулярно-лучевой или газовой эпитаксии. Это позволяет формировать высококачественный подзатворный диэлектрик, т. к. в таком монокремнии отсутствуют изоконцентрационные примеси кислорода и углерода, которые всегда присутствуют в монокристаллах, полученных по методу Чохральского.

Кроме горизонтальной (латеральной) диэлектрической изоляции, в КНИ-структурах осуществляется также вертикальная изоляция. Для SOI-структур используют три широко распространенных метода вертикальной изоляции: локальное оксидирование кремния (Locos), изоляция мелкими канавками (STI) и мезаизоляция. При нормах проектирования меньше 0,25 мкм Locos-изоляцию очень сложно применять,

поскольку ее технология ограничивает возможность получения изолированных карманов малой площади. STI-изоляция является достаточно дорогим процессом для реализации субмикронных многоуровневых структур [1, 3, 6].

Для субмикронной SOI-технологии мы предлагаем новые методы получения латеральной изоляции.

1. *Радикальное многозарядное внедрение N<sub>2</sub>O<sup>++</sup>* проводят через тонкий окисел в эпитаксиальный кремний на глубину 0,6—1,0 мкм. После активации не только формируется качественный изолирующий оксинитридный слой, но и образуется эффективная внутренняя гетеросистема с переходной границей раздела минимальной толщины.

2. *Окисление пористого монокремния.* На определенной глубине КЭС формируется пористый монокремний, область которого определяется степенью легирования бором монокремния эпитаксиального слоя.

Первый метод имеет преимущество перед высокоэнергетическим кислородным внедрением (SmartCut), т. к. может осуществляться при энергии и дозе ионов почти в два раза меньшей без применения дополнительной полиимидной маски. Изолирующие и гетерирующие свойства такой изоляции легко контролируются по показателю преломления слоя и инфракрасным спектром.

В основе второго метода положен процесс окисления пористого кремния, который получают при анодной электрохимической обработке моно-Si в растворе на основе плавиковой, соляной и надуксусной кислот (HF:HCl:CH<sub>3</sub>COOH=5:4:1). Здесь надуксусная кислота выступает как сильный смачиватель и окислитель, соляная кислота — как отборник, пассиватор и транспортер водорода, а плавиковая — как растворитель окисла. Кремниевая пластина в таком процессе (рис. 2) является анодом, а катодом служит платиновый электрод.

Впервые пористый кремний был получен в середине 50-х годов в ходе исследования процесса электрохимического полирования поверхности кремния в водородном растворе HF [8] (для изоляции не применялся в силу ограниченности экспериментов).

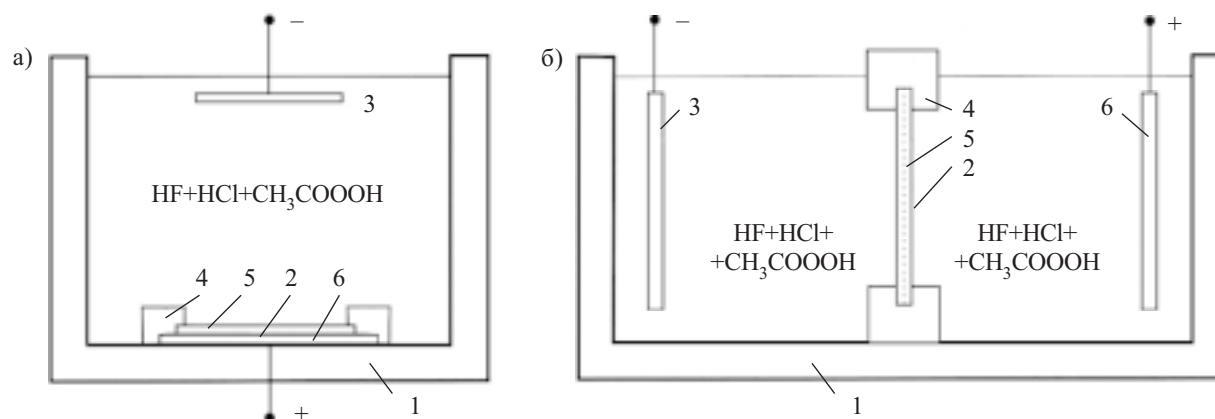


Рис. 2. Электрохимические ячейки-ванны для формирования слоя пористого Si:

а — вертикального типа; б — двухкамерная ячейка с жидкостным контактом к Si; 1 — фторопластовая ванна; 2 — Si-подложка; 3, 6 — платиновые электроды; 4 — уплотнители; 5 — слой пористого Si

Такая операция необходима для доведения рабочей поверхности до зеркального состояния. В ходе экспериментального травления было обнаружено, что при определенных режимах (низкой плотности анодного тока и высокой концентрации HF в электролите) вместо процесса электрополирования наблюдается образование определенных пленок на поверхности кремния. Нашими исследованиями было установлено, что такие слои имеют в своем объеме мелкие поры. Формирование пор начинается на поверхности Si-пластин, и на протяжении определенного времени анодной обработки края пор достаточно глубоко проникают в объемный кремний. В результате такой обработки толщина пленки пористого кремния в зависимости от времени травления может изменяться от нескольких единиц до сотен микрометров.

Проведенные ранее исследования [8] установили следующее. Поверхность Si при контакте с растворами, содержащими HF, пропитывается водородом и становится химически инертной по отношению к электролиту. Если на электроды (рис. 2) подать напряжение, то дырки в Si освобождаются от блокирующего действия водорода и мигрируют к поверхности раздела «кремний—электролит». При этом атомы Si тоже освобождаются от блокирующего действия водорода и начинают взаимодействовать с ионами и молекулами электролита и переходят в раствор. Если электролиз проводить при высокой плотности тока, то к поверхности электрода поступает большое количество дырок. Они двигаются к границе раздела «кремний—электролит» сплошным фронтом и обеспечивают реакционную способность практически каждому атому Si. Так как микровыступы на поверхности Si-пластин занимают большую поверхность, чем ровные области, то они растворяются быстрее. Таким образом, поверхность кремниевого анода постепенно выравнивается, и в этом случае мы получаем режим электрохимического полирования поверхности Si-пластин.

Если же электролиз проводить при сравнительно низкой плотности анодного тока, то количества дырок уже недостаточно для организации сплошного фронта, и поэтому проходит локальное растворение кремния на поверхности. Зарождение пор при этом может начинаться на микроямках или дефектах поверхности Si. Со временем такие поры продолжают свой рост в глубину кремния за счет дрейфа дырок к краям пор, где напряженность электрического поля достаточно высока.

Очевидно, что в кремнии *n*- и *p*-типов количество дырок разное, и потому процессы создания пор в *n*-Si и *p*-Si имеют свои особенности. В *p*-Si дырки являются основными носителями заряда, и их концентрация составляет  $10^{14}$ — $10^{18}$  см<sup>-3</sup>. В этом случае, как правило, формируется тонкая высокопористая структура с порами нанометровых размеров. В *n*-Si, где основными носителями заряда являются электроны, их концентрация большая, а дырок — очень малая ( $10^2$ — $10^6$  см<sup>-3</sup>). В этом случае усилить анодный ток можно за счет фотогенерации (при подсвечивании Si-электрода) или за счет лавинной генерации (при высоких напряжениях или напряженностях электриче-

ского поля). Полученная таким образом структура отличается от предыдущей и характеризуется наличием пор достаточно больших размеров. Следовательно, изменяя условия анодирования, можно получить пористый Si с разной морфологией пор.

Экспериментальные исследования процесса анодирования показали, что на поперечный размер пор *R* влияют ток анодирования, состав электролита, уровень и вид легирования, время и уровень подсвечивания. Размер пор может изменяться от 10 мкм до 1 нм. По существующей классификации [8] пористый кремний делится на микропористый ( $R < 2$  нм), мезапористый ( $2 \text{ нм} < R < 50$  нм) и макропористый ( $R > 50$  нм). Для пористого Si объем пор находится в пределах 5—95% от общего объема. Когда объем, занимаемый порами, мал (5%), пористый Si по свойствам близок к монокристаллу, а при высоких значениях пористости (>50%) в кремнии проявляются новые уникальные свойства, обнаруженные в наших экспериментах.

Характеристикой пористости Si является суммарная площадь его внутренней текстурированной поверхности, которая, в зависимости от величины пористости и геометрии пор, может составлять для макропористого кремния 10—100 м<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>, для мезапористого 100—300 м<sup>2</sup>/см<sup>3</sup> и для микропористого 300—800 м<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>. Для сравнения стоит отметить, что удельная поверхность монокристаллического кремния составляет лишь 0,1—0,3 м<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>.

Известно, что диэлектрическая пленка SiO<sub>2</sub>, полученная методом термического оксидирования кремния, не может быть толще 1,5 мкм. Для создания толстых диэлектрических пленок окислов SiO<sub>2</sub> следует использовать именно пористый Si. Если такой материал подвергнуть термическому оксидированию, то уже при температуре  $T > 900^\circ\text{C}$  за счет пористости системы молекулы кислорода способны проникать на всю толщину пористого Si, обеспечивая его быстрое полное окисление (скорость окисления возрастает на порядок и больше). Исследованиями установлено, что для такого процесса оптимальная пористость слоев составляет 45—49%. В зависимости от условий анодирования параметры пористого кремния изменяются в широком интервале: удельное сопротивление — от  $10^{-2}$  до  $10^{11}$  Ом·см, диэлектрическая проницаемость — от 1,75 до 12, коэффициент преломления — от 1,2 до 3,5. Именно для реализации латеральной и вертикальной изоляции в КНИ-структурах нами предложено использовать анодированный пористый кремний с удельным сопротивлением  $10^{10}$ — $10^{12}$  Ом·см.

### Обсуждение результатов

Проведенные исследования показали, что кремний с пористостью  $P \leq 30$ —35% может быть надежной основой для формирования на нем слоя эпитаксиального монокремния. Поэтому латеральную диэлектрическую изоляцию можно выполнять как до, так и после формирования эпитаксиального слоя. Пористость кремния, сформированного на моно-Si, определяется по формуле [8]

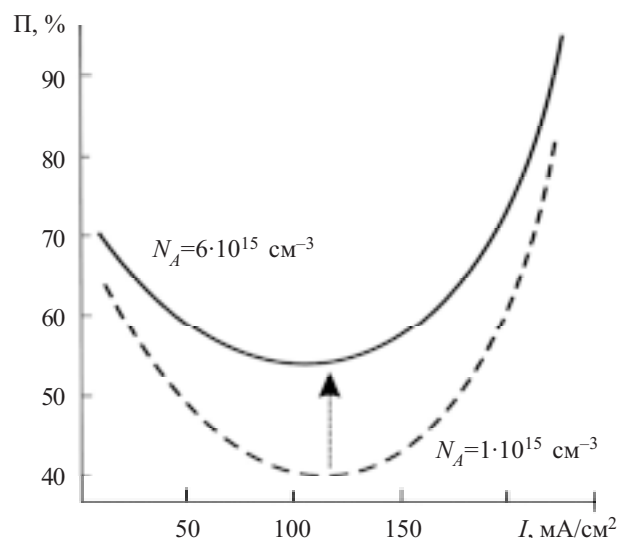


Рис. 3. Зависимость пористости Si от плотности анодного тока для электролита состава HF:HCl:CH<sub>3</sub>COOH=5:4:1 и различной концентрации бора

$$\Pi = \frac{n_{\text{Si}} - n_{\text{Si}}^{\text{н}}}{n_{\text{Si}} - n_{\text{a}}} \cdot 100\%,$$

где  $n_{\text{Si}}$ ,  $n_{\text{пк}}$ ,  $n_{\text{в}}$  — коэффициенты преломления моно-Si, пористого Si и воздуха.

Скорость роста пористого Si тем выше, чем выше степень легирования монокремния бором. Оптимальная концентрация акцепторной примеси составляет  $N_{\text{A}} = (1-6) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Легирование бором можно легко реализовывать как в процессе эпитаксиального роста монокремния, так и многозарядной имплантацией бора  $\text{B}^{++}$  или  $\text{BF}_2^{++}$  на глубину 0,7—1,0 мкм [9].

Как показали исследования, величина пористости определяется плотностью анодного тока (рис. 3), составом электролита, степенью легирования бором кремния и содержанием  $\text{O}_2$  и C в кремниевых пластинах Чохральского. Изменяя содержание плавико-

вой и надуксусной кислот, можно ускорять или замедлять процесс роста (HF — ускоряет, HCl — пассивирует,  $\text{CH}_3\text{COOH}$  — замедляет), регулировать размер пор содержанием соляной (или серной) кислоты.

При термическом окислении пористого Si с пористостью более 70% происходит резкое уплотнение окисленного пористого Si уже при  $T=900^\circ\text{C}$  в атмосфере сухого кислорода. При  $T=800^\circ\text{C}$  и при повышенном до 10 атм. давлении (на установке «Термоком») скорость окисления увеличивается на порядок и может достигать 10 мкм/ч. Использование закиси азота  $\text{N}_2\text{O}$  вместо кислорода позволяет формировать не только латеральные изолирующие слои, но и гетероструктуры на основе оксинитрида кремния  $\text{Si}_x\text{N}_y\text{O}_z$ . Это и составляет особенность предложенной технологии.

Разработанный нами технологический процесс окисления пористого кремния позволил реализовать изолирующие области монокремния длиной до 10 мкм при боковом окислении под фотомаску нитрида кремния на глубину <0,25 мкм.

В изолированных карманах были сформированы обычные тестовые *n*- и *p*-канальные МОП-транзисторы с длиной канала 0,8—1,0 мкм и с пороговым напряжением  $U_{\text{Tn}}=0,5-0,8 \text{ В}$  и  $U_{\text{Tp}}=0,7-1,1 \text{ В}$ , соответственно. Пороговые напряжения измерялись при напряжении затвора, который обеспечивал уровень тока стока в 1 мкА при сток-источковом напряжении 5 и 3,5 В. Токи потерь, измеренные при напряжении сток-исток 5 и 0 В на затворе, не превышали уровня  $5 \cdot 10^{-13} \text{ А}$  на 1 мкм длины канала. Выходные ВАХ таких КМОП-транзисторов показаны на рис. 4.

Был проверен ряд экспериментальных моделей МОП-транзисторов для субмикронной КНИ-технологии, определены основные критерии выбора материалов и технологий.

1. *Подзатворный диэлектрик.* При переходе в субмикронные топологические размеры каналов МОП-транзисторов необходимо уменьшить туннель-

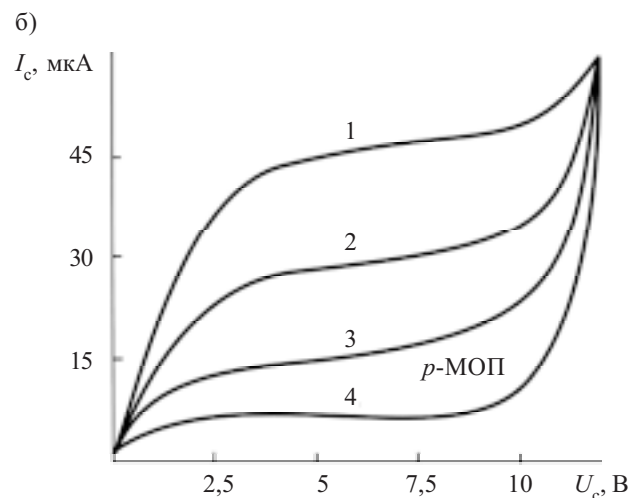
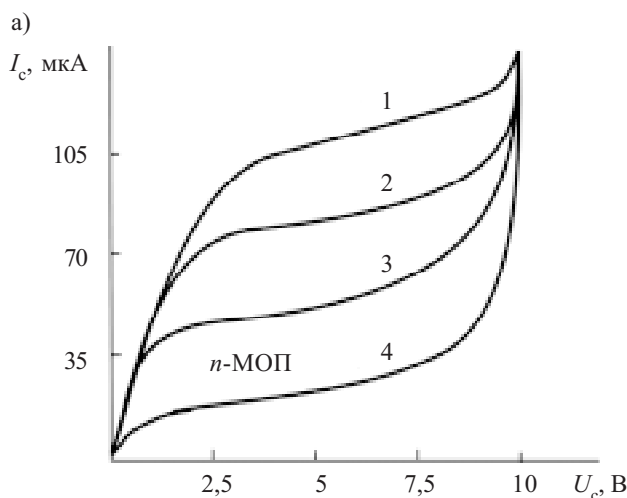


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики *n*-МОП (а) и *p*-МОП (б) транзисторов с длиной канала 1 мкм и шириной 2,5 мкм для различных значений напряжения на затворе: 1 — 7 В; 2 — 6 В; 3 — 5 В; 4 — 4 В

ные токи и повысить электрическую прочность подзатворного диэлектрика до  $10^7$  В/см, что достигается легированием окисла редкоземельными металлами (Ho, La, Y), используя их хлориды. Это соответственно увеличит диэлектрическую постоянную подзатворного диэлектрика SiO<sub>2</sub> в несколько раз.

2. *Сток-источковые контакты.* Для обеспечения низкого переходного сопротивления контактов (рис. 1) ретроградный концентрационный профиль  $n^+$ -областей выполняется многозарядной имплантацией ионов мышьяка (As<sup>++</sup>), а сток-источковые  $n$ -областей — радикальным легированием PF<sub>3</sub><sup>++</sup>. На области истока, стока и затвора осаждают слой дисилицида титана TiSi<sub>2</sub>, который формируется газофазной реакцией пиролиза моносилана (дисилана) и хлорида титана TiCl<sub>4</sub> в реакторе пониженного давления типа «Изотрон-3» при температуре 590°C. Удельное поверхностное сопротивление такой пленки, сформированной на основе аморфного кремния, составляет меньше 10 Ом/□.

3. *Канал МОП-транзисторов.* Для обеспечения высокого быстродействия  $n$ - и  $p$ -канальных МОП-транзисторов (они могут быть как инверсионными, так и встроеными) в областях каналов проводят ионное легирование германия. В зависимости от степени такого легирования подвижность носителей заряда (как электронов, так и дырок) может быть увеличена вдвое. Короткоканальный эффект смыкания сток-источковых областей полностью устраняется формированием  $p^+$ -карманов с помощью радикальной имплантации BF<sub>2</sub><sup>++</sup> для  $p$ -кармана и PF<sub>3</sub><sup>++</sup> для  $n$ -кармана. Защита затворной системы надежно обеспечивается нитридными или оксинитридными спейсерами, которые наращиваются на боковые стенки затворной системы, чтобы обеспечить профилирование вертикальных стенок и устранить обрывы на ступеньках окислов. Для обеспечения необходимых значений порогового напряжения проводится также радикальное многозарядное ионное легирование канала.

4. *Тестовые элементы* позволяют определить электрофизические параметры технологии формирования КНИ-структур и проектные нормы конструкторско-технологических ограничений. Набор тестовых элементов формирует тестовую структуру, с помощью которой контролируется весь технологический процесс SOI на основе пористого кремния.

#### Выводы

Разработана новая технология горизонтальной (латеральной) и вертикальной изоляции субмикронных

структур на основе окисленного пористого кремния на любых пластинах монокремния при обеспечении легированного  $p$ -слоя с концентрацией  $(3—6) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Увеличение быстродействия МОП-транзисторов, сформированных на основе КНИ-структур, достигается благодаря легированию канала германием, и в зависимости от дозы легирования подвижность основных носителей заряда может вырасти вдвое и больше.

На пористых кремниевых структурах можно также создавать высококачественные униполярные конденсаторы большой емкости.

Получены проектные нормы КНИ-технологии, которые могут быть определены только моделированием этих структур при помощи TCAD или Cadence.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Новосядлий С. П. Фізико-технологічні основи субмікронної технології великих інтегральних схем.— Івано-Франківськ: Сімік, 2003.
2. Новосядлий С. П. Технология формирования высококачественных кремниевых эпитаксиальных структур // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 1998.— № 3—4.— С. 11—14.
3. Новосядлий С. П. Технологія формування КЕС для високовольних Bi-K-MON BIC // Матеріали VII Міжнародної конференції з фізики і технології тонких плівок.— Івано-Франківськ.— 2001.— С. 214—215.
4. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов.— М: Техносфера, 2002.
5. Pindl S., Berthold J., Hutner T. et al. Philips born 130-nm channel length partially depleted SOI CMOS-technology. // IEEE Trans. on Electron Devices.— 1999.— Vol. 46, N 7.— P. 1562—1566.
6. Новосядлий С. П. Фізико-технологічні особливості формування локальної ізоляції активних областей BIC канавками // Оптоелектроніка і напівпровідникова техніка.— 2000.— № 35.— С. 122—127.
7. Новосядлий С. П. Підвищення ефективності локальної ізоляції активних елементів BIC // Оптоелектроніка і напівпровідникова техніка.— 1994.— № 34.— С. 177—185.
8. Балагуров Л. А. Пористый кремний: получение, свойства, возможные применения // Материаловедение.— 1998.— Вып. 1.— С. 50—56.— Вып. 3.— С. 23—45.
9. Новосядлий С. П., Бережанський В. М. Багатозарядна іонно-імплантаційна обробка при формуванні кишень і металізації субмікронних структур BIC // Металофізика і новітні технології.— 2007.— Т. 29, № 7.— С. 857—866.

#### НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



**Динамика радиоэлектроники — 2 / Под общей редакцией Ю. И. Борисова.— М.: Техносфера, 2008.— 376 с.**

Книга о динамике развития радиоэлектроники — одной из наиболее важных составляющих научно-технического прогресса общества, во многом определяющей его социальные и оборонные возможности. Материалы книги подготовлены группой ученых и инженеров, непосредственно принимавших участие в исследованиях, разработках, испытаниях и применении изделий электронной техники и радиотехнической аппаратуры.

Для читателей, интересующихся созданием и развитием радиоэлектроники и условиями, в которых проходило ее становление в СССР.

Чл.-кор. НАНУ, д. ф.-м. н. В. А. МАКАРА, к. ф.-м. н. В. А. ОДАРИЧ,  
к. ф.-м. н. Т. Ю. КЕПИЧ, к. т. н. Т. Д. ПРЕОБРАЖЕНСКАЯ,  
к. ф.-м. н. О. В. РУДЕНКО

Украина, г. Киев, УНЦ «Физико-химическое материаловедение»  
КНУ им. Тараса Шевченко  
E-mail: wladodarych@narod.ru

Дата поступления в редакцию  
17.02 2009 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Н. В. СОПИНСКИЙ  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## ПРИБОР И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ И СТЕПЕНИ ОДНОРОДНОСТИ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР

Разработана блок-схема, изготовлен макет прибора и создан пакет автоматизированных программ для измерения показателя преломления и контроля толщины пленок в процессе изготовления пленочных структур.

Создание элементов микро- и оптоэлектроники идет путем модификации поверхности полупроводников, включая точечное легирование чужеродными атомами, нанесение тонких пленок разными методами и тому подобное. При этом модификационные изменения происходят в тонких слоях, толщина которых может составлять от единиц до сотен нанометров или даже нескольких микрометров.

Для поиска оптимальных технологических условий нанесения пленок, обработки поверхности монокристаллов и т. п. необходимо иметь удобные, надежные и высокоточные бесконтактные и неразрушающие методы контроля технологических процессов на разных его этапах, а также параметров полученных структур (пленок, активных слоев и тому подобное).

Для определения параметров строения вещества, в частности параметров пленок на его поверхности, самыми перспективными являются методы отражательной спектроскопии, поскольку отраженная световая волна формируется в тонкой приповерхностной области. Существуют эллипсометрические приборы, которые предназначены для измерения поляризационных характеристик отраженной волны, чаще всего на одной фиксированной длине. Однако не существует универсального метода, который позволил бы по измеренным значениям поляризационных характеристик определить, в частности, оптические постоянные и толщину пленки. Выбор метода зависит от исследуемого объекта.

Целью данной работы являлась разработка блок-схемы, создание экспериментального образца прибора и усовершенствование методов измерения толщины, показателя преломления и однородности тонких пленочных структур, используемых в микроэлектронике и других приборостроительных отраслях.

### Блок-схема и описание работы прибора

Измеряемыми величинами в эллипсометрии являются поляризационные характеристики (эллипсометрические параметры) световой волны, которые опре-

деляют форму эллипса колебаний электрического вектора световой волны.

Эллипсометрическими параметрами (эллипсометрическими углами) называют разность фаз  $\Delta$  между компонентой  $E_s$  электрического вектора, перпендикулярной плоскости падения световой волны, и компонентой  $E_p$ , параллельной этой плоскости, и  $\tan \psi$ , значение которого равно отношению коэффициентов отражения в р- и s-плоскостях.

Наиболее пригодным для эллипсометрических измерений является фотометрический эллипсометр, который, в отличие от существующих компенсационных эллипсометров, не нуждается в компенсаторе, имеет меньшее время измерения. Это создает возможность измерения на волнах любой длины, позволяет приспособить его к процессу автоматизации и контроля.

Принцип работы эллипсометра основан на фотоэлектрическом методе Битти [1, 2].

Суть метода заключается в том, что линейно поляризованный световой пучок падает на зеркальную поверхность исследуемого объекта под произвольным углом, причем азимут поляризатора (угол между электрическим вектором световой волны и плоскостью падения луча) равен  $45^\circ$ . Эллиптическую поляризацию отраженного света анализируют с помощью линейного поляризатора, который последовательно устанавливают по азимутам  $0$ ,  $45$  и  $90^\circ$ , измеряя соответствующую интенсивность отраженного света  $I_0$ ,  $I_{45}$ ,  $I_{90}$ . Искомые эллипсометрические параметры вычисляют по формулам

$$\tan \psi = \sqrt{\frac{I_0}{I_{90}}}, \quad (1)$$

$$\cos \Delta = \frac{2I_{45} - I_0 - I_{90}}{2\sqrt{I_0 I_{90}}}. \quad (2)$$

Схема такого прибора приведена на **рис. 1**.

Источником света в нем является газоразрядная ртутная лампа с линейчатым спектром излучения, соединенная со стабилизированным источником питания 1.

Поляризационное устройство 2 (призма Глана с воздушным промежутком) придает световой волне линейную поляризацию. Оно помещено в оправу, снабженную устройством поворота 3 поляризатора

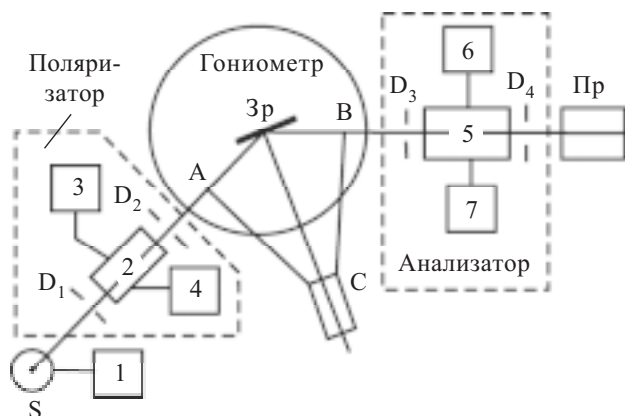


Рис. 1. Блок-схема фотометрического эллипсометра: S — источник света; 1 — стабилизированный источник питания; 2, 5 — поляризационное устройство; 3, 6 — устройство поворота; 4, 7 — механизм юстировки; D<sub>1</sub>—D<sub>4</sub> — ограничительные диафрагмы; Зр — столик для образца; С — муфта; АС, ВС — штанги гониометра; Пр — приемник световой энергии

вокруг направления распространения светового пучка и измерения азимута  $\psi_n$  и механизмом юстировки 4 поляризатора.

Блок анализатора поляризации отраженной световой волны также содержит призму Глана 5, устройство поворота 6 и механизм юстировки 7 поляризатора.

Гониометр представляет собой механизм измерения угла падения с угловыми делениями до 0,5' с двумя плечами, на которых монтируются блоки поляризатора и анализатора, источник света, коллимационная система. На оси гониометра устанавливается столик Зр с платформой для образца, снабженный механизмом поворота образца в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также механизмом поступательного перемещения платформы перпендикулярно ее поверхности.

Механизм изменения угла падения имеет две штанги одинаковой длины (АС и ВС), закрепленные одним концом в точках А и В на плечах гониометра на одинаковых расстояниях от его центра. Вторым концом штанги прикреплены к муфте С, которая может свободно перемещаться вдоль штанги ЗрС, установленной по биссектрисе угла между плечами. Конец Зр жестко прикреплен к столику для образца, а конец С — свободный.

На плечах гониометра устанавливается система ограничительных диафрагм D<sub>1</sub>, ..., D<sub>4</sub>, образующая коллиматор светового пучка.

Приемник световой энергии содержит электронный усилитель со стабилизированным источником питания. Спектральная чувствительность приемного элемента соответствует спектру излучения примененного источника света.

С целью повышения точности определения эллипсометрических параметров авторы некоторым образом усовершенствовали метод Битти. В частности, предлагается последовательно устанавливать азимуты анализатора  $\psi_a = 0, 45, -45$  и  $90^\circ$ , а также эквивалентные им азимуты  $\psi_a + 180^\circ$ , измерить соответствующие

интенсивности, усреднить их значения и вычислить эллипсометрические параметры по (1) и (2).

Значение  $\cos\Delta$  определяют также по формуле

$$\cos\Delta = \frac{I_{45} - I_{-45}}{2\sqrt{I_0 I_{90}}}, \quad (3)$$

а разность фаз  $\Delta$  находят как среднее арифметическое от найденных из выражений (2) и (3).

При исследовании и контроле поверхностной структуры эллипсометрические параметры следует измерять вблизи главного угла падения (при котором, по определению,  $\cos\Delta=0$ ), где они наиболее чувствительны к особенностям строения отражательной системы. Поиск главного угла удобно выполнять с помощью параллелограммного механизма, который позволяет изменять угол падения вращением плеча с источником света, оставляя при этом неизменным ход отраженного луча. При различных значениях угла падения измеряют интенсивности  $I_{45}$  и  $I_{-45}$ , пока не выполнится условие  $I_{45}=I_{-45}$ , согласно (3).

Исследовать пленочные структуры полупроводниковых и диэлектрических материалов таким способом невозможно, т. к.  $\tan\psi$  для них имеет величину, меньшую чувствительности прибора. Ситуацию можно исправить, если измерения проводить при азимуте поляризатора не  $45^\circ$ , как в традиционной схеме Битти, а при меньшем, так, чтобы увеличить р-компоненту электрического вектора.

В наших работах [3—5] были проанализированы погрешности метода Битти и найдены оптимальные азимуты поляризатора, значения которых зависят от измеряемой величины параметра  $\tan\psi$ , т. е. от исследуемого объекта. В частности, значение оптимального азимута поляризатора  $\tan\psi_n$  лежит в пределах  $(1-5)\tan\psi$ .

Перед измерениями прибор должен быть отъюстирован согласно [3].

### Связь эллипсометрических параметров с параметрами системы

В основе работы предлагаемого прибора лежит теория взаимодействия электромагнитной волны с веществом. Эллипсометрические параметры связаны с параметрами отражающей системы через основное уравнение эллипсометрии [6, с. 43]

$$\tan\psi \cdot e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s}; \quad (4)$$

где  $\Delta = \delta_p - \delta_s$ ;

$\tan\psi = |R_p/R_s|$ ;

$R_p$  и  $R_s$  — коэффициенты отражения системы в р- и s-плоскостях образца;

$i$  — мнимая единица.

Комплексные коэффициенты отражения  $R_p$  и  $R_s$  определяются строением отражающей системы и являются функциями оптических постоянных сред, из которых она состоит, толщины слоев, угла падения и длины волны света, геометрии границы раздела и т. п.

Рассмотрим двухслойную систему, поскольку такие пленочные структуры широко распространены в микро- и оптоэлектронике.

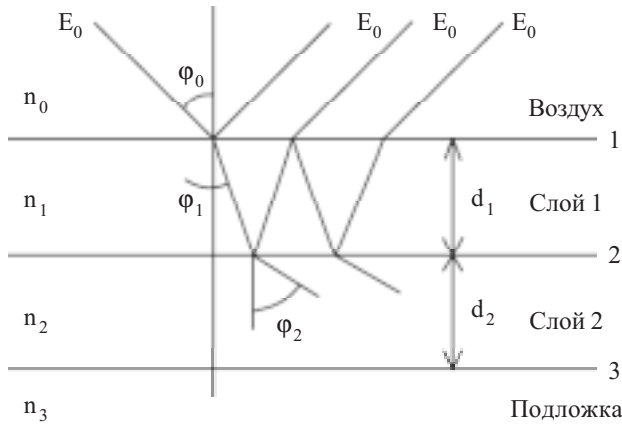


Рис. 2. Ход лучей в двухслойной системе

На рис. 2 показана схема отражения световой волны от двухслойной системы.

Уравнение эллипсометрии для двухслойной системы имеет вид [5—8]

$$\operatorname{tg} \psi \cdot e^{i\Delta} = \frac{r_{1p} + r_{2p} e^{-i\delta_1} + r_{1p} r_{2p} r_{3p} e^{-i\delta_2} + r_{3p} e^{-i(\delta_1 + \delta_2)}}{1 + r_{1p} r_{2p} e^{-i\delta_1} + r_{2p} r_{3p} e^{-i\delta_2} + r_{1p} r_{3p} e^{-i(\delta_1 + \delta_2)}} \times \frac{1 + r_{1s} r_{2s} e^{-i\delta_1} + r_{2s} r_{3s} e^{-i\delta_2} + r_{1s} r_{3s} e^{-i(\delta_1 + \delta_2)}}{r_{1s} + r_{2s} e^{-i\delta_1} + r_{1s} r_{2s} r_{3s} e^{-i\delta_2} + r_{3s} e^{-i(\delta_1 + \delta_2)}}. \quad (5)$$

Здесь  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$  — коэффициенты Френеля отражения на поверхностях 1, 2 и 3 (см. рис. 2), которые можно вычислить по формулам

$$r_{1p} = \frac{n_1 \cos \varphi_0 - n_0 \cos \varphi_1}{n_1 \cos \varphi_0 + n_0 \cos \varphi_1}; \quad r_{1s} = \frac{n_0 \cos \varphi_0 - n_1 \cos \varphi_1}{n_0 \cos \varphi_0 + n_1 \cos \varphi_1}; \quad (6)$$

$$r_{2p} = \frac{n_2 \cos \varphi_1 - n_1 \cos \varphi_2}{n_2 \cos \varphi_1 + n_1 \cos \varphi_2}; \quad r_{2s} = \frac{n_1 \cos \varphi_1 - n_2 \cos \varphi_2}{n_1 \cos \varphi_1 + n_2 \cos \varphi_2}; \quad (7)$$

$$r_{3p} = \frac{n_3 \cos \varphi_2 - n_2 \cos \varphi_3}{n_3 \cos \varphi_2 + n_2 \cos \varphi_3}; \quad r_{3s} = \frac{n_2 \cos \varphi_2 - n_3 \cos \varphi_3}{n_2 \cos \varphi_2 + n_3 \cos \varphi_3}, \quad (8)$$

а разности фаз  $\delta_1$  и  $\delta_2$ , которые образуются в первом и втором слоях, вычисляют по формулам

$$\delta_1 = \frac{4\pi d_1}{\lambda} n_1 \cos \varphi_1; \quad \delta_2 = \frac{4\pi d_2}{\lambda} n_2 \cos \varphi_2, \quad (9)$$

где  $n_0, \dots, n_3$  — оптические постоянные соответствующего слоя;  $\lambda$  — длина волны падающего излучения.

При интерпретации эллипсометрических данных приходится решать как прямую задачу эллипсометрии, когда по известным характеристикам отражательной системы вычисляют эллипсометрические параметры отраженной световой волны, так и обратную, когда по измеренным значениям поляризационных характеристик отраженной волны находят параметры исследуемой системы.

#### Метод диаграмм для определения параметров пленки

Впервые такой метод был использован в [9] для анализа системы «прозрачный слой — поглощающая подложка» на примере монокристаллического крем-

ния с оксидной пленкой на нем. Вычисления эллипсометрических параметров проводят для фиксированного угла падения по уравнениям (5)—(8), варьируя одну из характеристик системы (например толщину слоя или его показатель преломления и пр.) при фиксированных значениях остальных. Полученные значения откладывают на номограмме, которая в итоге будет представлять собой семейство кривых, каждой из которых соответствуют определенные характеристики системы при изменяющейся одной из них.

В качестве декартовых координат можно использовать любые эллипсометрические параметры, которые можно измерить. Например, в фотометрической эллипсометрии, где измеряют  $\cos \Delta$  и  $\operatorname{tg} \psi$ , именно эти величины используют для построения декартовых диаграмм.

В эллипсометрии пленок, когда определяемыми характеристиками системы являются оптические постоянные и толщина пленки, на такой номограмме удобно приводить кривые, которые получены при варьировании толщины пленки и неизменных оптических характеристиках. Ортогональными к ним являются кривые, полученные при варьировании оптических характеристик при постоянной толщине.

Пример таких номограмм приведен на рис. 3. Здесь видно, что все кривые начинаются из общей точки, которой соответствует нулевая толщина пленки и значения оптических постоянных подложки, свободной от пленки (точка 0). Плотность кривых вблизи начальной точки высокая, поэтому точность определения параметров пленки здесь меньше, чем вдали от нее.

Согласно уравнению эллипсометрии (4), которое содержит мнимые экспоненты с показателями (9), эллипсометрические параметры  $\cos \Delta$  и  $\operatorname{tg} \psi$  ( $\Delta$  и  $\psi$ ) являются периодическими функциями толщины. В случае прозрачных пленок при значениях толщины больше половины периода эллипсометрические парамет-

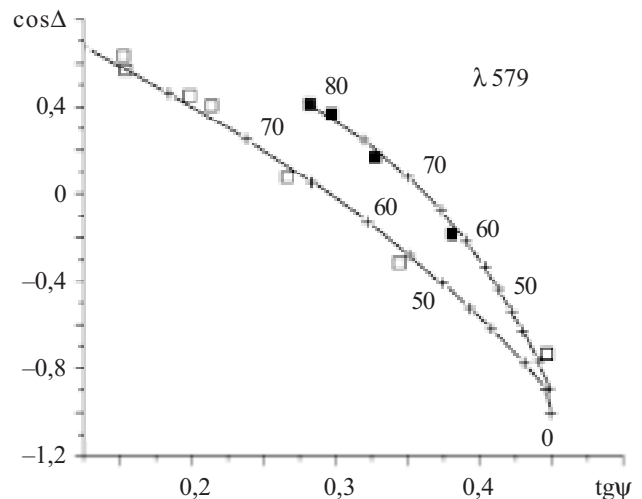


Рис. 3. Эллипсометрические параметры  $\cos \Delta$  и  $\operatorname{tg} \psi$  пленки CdTe, вычисленные при угле падения  $\varphi=60^\circ$  для  $n_1=2,015$ ,  $k_1=0,39$  (верхняя кривая) и  $n_1=2,2$ ,  $k_1=0,35$  (нижняя кривая). (На расчетных кривых приведены значения толщины пленки в нм)

■, □ — экспериментальные данные

ры будут ложиться на кривую, полученную для первого полупериода, возвращаясь в начальную точку через полный период.

На рис. 3 представлены также экспериментальные результаты, полученные на разных участках пленки. Сопоставление их с расчетными кривыми позволяет судить о толщине пленки на этих участках.

В некоторых эллипсометрических методах, в том числе фотометрических, измеряемыми величинами являются другие параметры, например главный угол  $\Phi$  (угол падения, при котором  $\cos\Delta=0$ ) и эллиптичность (значение  $\text{tg}\psi$  при главном угле). В этом случае экспериментальные данные представляют на номограммах, где по осям откладывают значение главного угла и эллиптичности. Эллипсометрическая функция вблизи главного угла наиболее чувствительна к деталям строения отражательной системы. Кроме того, при определении главного угла в процессе обработки данных происходит усреднение эллипсометрических параметров, поэтому точность их определения увеличивается.

Пример таких номограмм, вычисленных для системы «прозрачная пленка — оптическое стекло К8» приведен на рис. 4.

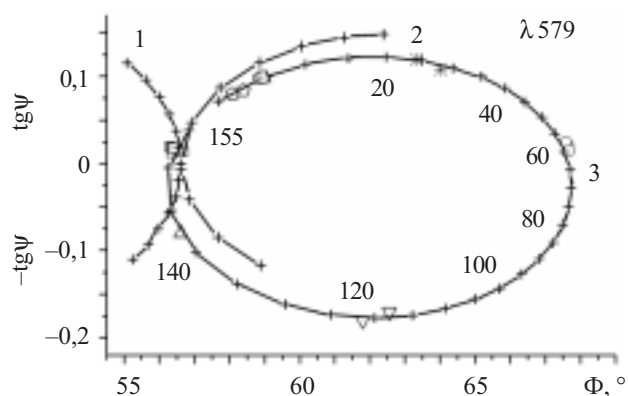


Рис. 4. Эллипсометрические параметры  $\text{tg}\psi$  и  $\Phi$  пленки  $\text{HfO}_2$ , вычисленные для однослойной (1 и 2) и двухслойной (3) моделей. Параметры расчета:

1 —  $n_1=1,3$ ; 2 —  $n_1=2,0$ ; 3 —  $n_1=1,825$ ,  $d_1=15$  нм,  $n_2=2,0$   
(На кривой 3 показана толщина внутреннего слоя  $d_2$  в нм)  
Символы — экспериментальные данные.

Каждая кривая постоянного значения показателя преломления (ППП) начинается от угла Брюстера подложки, которому соответствует нулевое значение толщины пленки. С ростом толщины кривая ППП разворачивается либо вправо от угла Брюстера, в сторону больших углов, либо влево от него, в сторону меньших углов, в зависимости от соотношения между значениями показателей преломления пленки  $n_1$  и подложки  $n_2$ . Так, для пленок, оптически более плотных, чем подложка ( $n_1 > n_2$ ), значения главного угла превышают угол Брюстера, в то время как для оптически менее плотных пленок главные углы уменьшаются, по сравнению с углом Брюстера. Вследствие периодической зависимости эллипсометрических параметров от толщины пленки, для прозрачных пленок во втором полупериоде изменения толщины значения параметров будут ложиться на кривую ППП пер-

вого полупериода, возвращаясь с ростом толщины в исходную точку (угол Брюстера) при толщине пленки, равной периоду.

Метод номограмм применяется для определения характеристик исследуемой системы, изменяющихся при воздействии на нее различных физических и технологических факторов в процессах, например адсорбции на поверхности металлов и диэлектриков, окисления, взаимодействия поверхности с агрессивными средами и пр. Нанося экспериментальные точки, полученные в процессе эллипсометрических измерений, на предварительно построенную номограмму, можно наблюдать за характером изменений, которые происходят в системе. Достаточно густая сетка кривых обеспечивает также определение соответствующих параметров системы.

### Нахождение главного угла и эллиптичности

При вычислении номограммы возникает задача нахождения главного угла из уравнения эллипсометрии, т. е. необходимо решить прямую задачу эллипсометрии относительно  $\Phi$  и  $\text{tg}\psi$ .

Алгоритм, согласно которому была создана автоматизированная программа определения главного угла, приведен в [10].

По определению, главный угол — это такой угол падения луча, при котором разность фаз  $\Delta$  равна  $-90^\circ$ . Задача его поиска сводится к нахождению корня уравнения

$$F(\phi) = \cos \Delta = \frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2}} = 0. \quad (10)$$

Здесь  $X$  и  $Y$  — соответственно действительная и мнимая части уравнения эллипсометрии (4), а именно  $X = \text{tg}\psi \cos \Delta$ ,  $Y = \text{tg}\psi \sin \Delta$ .

Так как  $X$  и  $Y$  — действительные числа, а  $\Delta$  изменяется от  $-\pi$  до  $0$  в пределах углов падения  $0-90^\circ$ , корень уравнения (10) всегда существует и находит его методом деления отрезка пополам.

Действительная и мнимая части уравнения эллипсометрии зависят от параметров системы, например, в случае двухслойной системы они заданы уравнениями (5)–(9).

### Итерационный метод определения двух параметров системы

После выполнения эллипсометрических измерений необходимо решить обратную задачу эллипсометрии — по измеренным параметрам вычислить характеристики системы.

Уравнение эллипсометрии в большинстве случаев является нелинейным и трансцендентным относительно параметров отражательной системы, и в общем случае не существует аналитических выражений, которые связывали бы характеристики системы с измеренными значениями эллипсометрических параметров. Поэтому приходится использовать методы вычислительной математики.

В [11, 12] изложен алгоритм нахождения показателя преломления и толщины пленки на подложке с известными оптическими постоянными, основанный

на итерационном методе Ньютона решения системы двух уравнений. Мы расширили этот метод для автоматизированного нахождения любых двух неизвестных параметров отражательной системы по результатам измерения эллипсометрических параметров. Изложим общую схему работы соответствующей программы.

Обозначим действительную и мнимую части уравнения эллипсометрии (4) однослойной системы соответственно  $X$  и  $Y$ , тогда искомые эллипсометрические параметры будут иметь вид

$$Z = \operatorname{tg} \psi = \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad U = \cos \Delta = X / Z, \quad (11)$$

где  $X$  и  $Y$  вычисляются через оптические постоянные системы и толщину слоя по (6)–(8).

Измеренные значения эллипсометрических параметров обозначим как  $T = \operatorname{tg} \psi$  и  $C = \cos \Delta$ , а параметры, которые необходимо определить, обозначим как  $a$  и  $b$ .

Тогда решению относительно  $a$  и  $b$  подлежит система

$$\begin{cases} T - Z(a, b) = 0, \\ C - U(a, b) = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Разложив функции  $Z$  и  $U$  в ряд Тейлора, эту систему, которая является нелинейной и трансцендентной относительно  $a$  и  $b$ , в итерационном методе Ньютона представляют в виде

$$\begin{cases} T - Z(a_0, b_0) = \frac{\partial Z}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial Z}{\partial b} \Delta b, \\ C - U(a_0, b_0) = \frac{\partial U}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial U}{\partial b} \Delta b, \end{cases} \quad (13)$$

где  $a_0$  и  $b_0$  — приближенные значения корней системы (12); функции  $Z$  и  $U$ , а также их производные по определяемым параметрам, вычисляются по уравнению эллипсометрии для этого приближенного корня.

Теперь необходимо решить систему (13), которая содержит два линейных уравнения первого порядка относительно неизвестных поправок  $\Delta a$  и  $\Delta b$  к приближенным корням  $a_0$  и  $b_0$ . Эти поправки находят методом Крамера по определителю системы и определителям неизвестных, потом формируют следующее приближение согласно схеме

$$a_{i+1} = a_i + \Delta a, \quad b_{i+1} = b_i + \Delta b$$

и вычисляют новые значения поправок до тех пор, пока они не станут меньше заранее заданной малой величины, обусловленной погрешностью эксперимента.

Вычисление функций  $Z(a_i, b_i)$  и  $U(a_i, b_i)$ , а также их производных, выполняет специальная подпрограмма, которая содержит уравнение эллипсометрии (5) вместе с коэффициентами Френеля (6)–(8) для обеих границ деления. Производные, которые входят в систему (13), вычисляют численным дифференцированием уравнения эллипсометрии.

Входными величинами являются оптические постоянные подложки, длина световой волны, угол падения, измеренные значения эллипсометрических параметров  $\cos \Delta$  и  $\operatorname{tg} \psi$ , погрешности вычисления показателя преломления и толщины, которые ограничи-

вают необходимое количество итераций, величины дискретности показателя преломления и толщины, необходимые для численного дифференцирования, приближенные первичные значения параметров слоя.

Выходными величинами являются искомые параметры, конечные значения поправок  $\Delta a$  и  $\Delta b$ , количество итераций. Для контроля выводятся также конечные значения функций  $Z$  и  $U$ .

В качестве приближенных значений искомых параметров  $a_0$  и  $b_0$  берут их ожидаемые значения.

При нахождении толщины следует принимать во внимание то, что эллипсометрические параметры являются периодическими функциями толщины пленки с периодом

$$d_i = \frac{\lambda}{2\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi}}. \quad (14)$$

В качестве приближенной толщины  $d_0$  избирают произвольное ее значение в пределах десятка нанометров, лежащее в первой половине первого периода. После итерирования программа выдает уточненную толщину  $d_{\min}$ , наименьшую из возможных. Тогда любое ее значение для данной пары  $\cos \Delta$  и  $\operatorname{tg} \psi$  укладываются в формулу

$$d_i = d_{\min} + m d_p, \quad \text{где } m = 0, 1, 2, \dots \quad (15)$$

В связи с этим существует проблема однозначного определения толщины, если она больше нескольких периодов. Поэтому измерения следует проводить, как минимум, на двух спектральных линиях, длины волн которых значительно отличаются одна от другой [11, 12]. Тогда для каждой из них по формуле (15) можно вычислить ряды возможных значений толщины пленки и, сравнив их между собой, найти те, что совпадают друг с другом в пределах погрешности. Также истинное значение толщины можно найти, проведя измерения, по крайней мере, при двух углах падения, и вычислив, опять же, ряды возможных значений толщины для них. Однако первый метод более точен.

По изложенной выше схеме разработаны автоматизированные программы для определения: 1) эллипсометрических параметров двухслойной системы; 2) главного угла падения; 3) показателя преломления и толщины прозрачной пленки; 4) показателя преломления и показателя поглощения подложки; 5) показателя преломления и показателя поглощения пленки. Программы объединены в один пакет общей интерфейсной оболочкой, а выбор нужной осуществляется пользователем.

Наличие такого пакета программ позволяет разрабатывать методы определения более чем двух неизвестных параметров исследуемой системы.

#### Нахождение оптических постоянных и толщины поглощающих пленок

Авторами разработано несколько методов определения трех и четырех параметров отражательной системы. Продемонстрируем их суть на примере определения показателя преломления  $n_2$  и показателя поглощения  $k_2$  пленки, а также ее толщины на нескольких участках.

Метод может быть реализован для обсчета данных, полученных для одной пленки на нескольких участках с неизвестной толщиной или для нескольких пленок неизвестной толщины, нанесенных на одинаковые подложки с известными значениями оптических постоянных — показателя преломления  $n_3$  и показателя поглощения  $k_3$ .

Метод включает в себя вычислительную и графическую процедуры и заключается в том, что по измеренной паре эллипсометрических параметров с помощью описанной выше итерационной программы находят оптические постоянные пленки  $n_2$  и  $k_2$  при нескольких значениях толщины, выбранных произвольно в окрестности ожидаемых значений. Потом полученные пары значений оптических постоянных наносят на диаграмму, где по вертикальной оси откладывают показатель преломления  $n_2$ , а по горизонтальной — показатель поглощения  $k_2$ . В результате получают для каждого участка определенную кривую, которая объединяет полученные точки и вдоль которой изменяется толщина пленки. Таких кривых окажется столько, сколько исследовано участков. Если оптические постоянные пленки одинаковы на всех участках, то ясно, что полученные кривые пересекутся в одной точке, которой будет соответствовать пара значений оптических постоянных, общих для всех кривых. Положение точки пересечения на каждой из кривых даст толщину пленки на соответствующих участках.

Для иллюстрации метода можно рассмотреть однослойную систему с такими же оптическими постоянными как и система «пленка теллурида кадмия на смешанных кристаллах  $\text{CdHgTe}$ » ( $n_3=3,51$ ,  $k_3=1,488$ ,  $n_2=2,7$ ,  $k_2=0,4$ ). Ее эллипсометрические параметры  $\Phi$  и  $\text{tg}\psi$  были вычислены для трех значений толщины: 60 (участок 1), 80 (участок 2) и 100 нм (участок 3). Полученные пары значений  $\Phi$  и  $\text{tg}\psi$  использовали вместо экспериментальных и при помощи автоматизированной программы, изложенной выше, находили оптические постоянные пленки  $n_2$  и  $k_2$  для определенного массива значений толщины, который содержал действительную толщину пленки. Например, для участка 1 толщиной 60 нм этот массив охватывал значения от 50 до 70 нм с шагом 2 нм.

На рис. 5 представлены результаты расчетов в виде трех толщинных кривых. Здесь видно, что кривые действительно пересекаются в одной точке, координаты которой совпадают с оптическими постоянными пленки  $n_2$  и  $k_2$ , заданными в начале вычислений, при выбранных значениях толщины участков.

Детальный анализ показал, что в некоторых случаях кривые возможных решений могут не пересекаться, а касаться друг друга в одной точке.

В некоторых случаях для определенной пары эллипсометрических параметров может существовать несколько возможных решений относительно оптических постоянных пленки.

Следовательно, проводя поиск решений с помощью автоматизированной программы, нужно, варьируя начальные значения оптических постоянных в определенных границах, пытаться выявить все возможные решения. Истинное решение отличается от

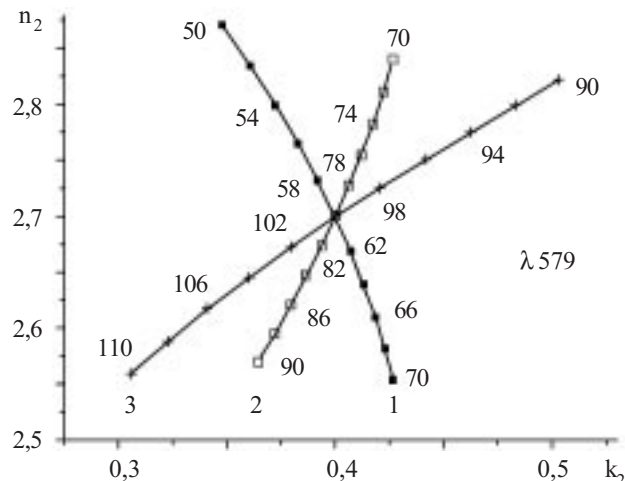


Рис. 5. Кривые возможных решений относительно оптических постоянных пленки, полученные для трех участков при варьировании ее толщины (числа возле засечек)

ложных тем, что толщинные кривые ложных решений расположены в разных участках номограммы и не имеют общей точки пересечения. В данном модельном эксперименте мы получали до трех решений на каждом из участков.

Наличие погрешности эксперимента приводит к тому, что толщинные кривые, полученные при автоматизированной обработке данных, смещены друг относительно друга и не пересекаются в одной точке на диаграмме определяемых величин, а сходятся в более или менее локальной области, в соответствии с допущенной погрешностью. В этом случае наилучшее решение для оптических постоянных исследуемой системы будет отвечать этой области схождения толщинных кривых.

На основе изложенного выше алгоритма были разработаны методы определения следующих параметров пленок: 1) показателя преломления, показателя поглощения и толщины пленки; 2) показателей преломления  $n_1$ ,  $n_2$  и толщины  $d_1$  и  $d_2$  двухслойной пленки; 3) толщины пленки и показателей преломления волн различной длины. Эти методы могут использоваться для исследования однородности пленочных структур.

#### Исследование однородности пленочных структур

Однородность пленки по площади исследуют, измеряя эллипсометрические параметры на разных участках ее поверхности. По измеренным значениям эллипсометрических параметров с помощью описанных выше автоматизированных программ находят оптические константы и толщину пленки на каждом участке. Для иллюстрации данного метода приведем результаты исследования однородности двух образцов пленок  $\text{CdTe}$ , которые были получены методом «горячей стенки» на кремнии с помощью эпитаксиальной установки в вакууме  $\approx 0,3$  мПа. Температура подложки составляла  $50-80^\circ\text{C}$ , толщина пленок зависела от времени осаждения.

Эллипсометрические измерения выполняли при фиксированном угле падения  $\varphi=60^\circ$  на разных участ-

ках площади образцов. Результаты измерений представлены на рис. 3.

Теоретические кривые для обеих пленок хорошо согласуются с экспериментальными результатами, полученными на разных участках. Можно сделать вывод, что оптические постоянные обеих пленок не изменяются по площади —  $n_1=2,2$ ,  $k_1=0,35$  для одной,  $n_1=2,015$ ,  $k_1=0,39$  для другой, а толщина первой изменяется от 55 до 78 нм, второй — от 62 до 80 нм.

Прибор вместе с разработанными методами обработки экспериментальных результатов позволяет также выявить и исследовать неоднородность пленок по их толщине.

На рис. 4 показаны результаты эллипсометрических измерений, проведенных на диэлектрических пленках  $\text{HfO}_2$ , нанесенных на оптическое стекло К8.

Пленки  $\text{HfO}_2$  получены распылением материала электронным пучком на установке УВН-60 при давлении в камере 0,26 мПа. Температура подложки составляла 160°C, ток луча — 250 мА при ускоряющем напряжении 6 кВ.

Расположение точек на диаграмме измеренных величин в модели однородной пленки нельзя описать одним согласованным набором параметров. Другими словами, значения показателя преломления являются индивидуальными для каждого образца, и поэтому иногда полученные значения не соответствуют реальным.

Например, эллипсометрические параметры одного из образцов, отмеченные на рис. 4 квадратиками, ложатся на кривую 1, вычисленную для показателя преломления 1,3. Параметры другого образца, отмеченные треугольниками, не согласуются ни с кривой 1, ни с 2, а вычисления при использовании однослойной модели дали результат больше 3. В то же время известно, что показатель преломления кристаллической двуокиси гафния в массивном состоянии близок к 2,15. Все это свидетельствует о неадекватности модели однородной пленки к исследованным образцам.

Совокупность полученных для  $\text{HfO}_2$  экспериментальных данных хорошо описывается моделью двухслойной пленки (кривая 3 на рис. 4). Такие результаты получены для следующих данных.

Пленка состоит из двух слоев — внешнего, с меньшим показателем преломления ( $n_1=1,825$ ) и толщиной 15 нм, и внутреннего, оптически более плотного ( $n_2=2,0$ ), толщина которого разная для разных образцов.

Такие результаты согласуются со столбиковой структурой пленок, полученных напылением электронным пучком. При этом внутренний слой отвечает собственно столбикам, а внешний — их вершинам, которые сужаются кверху. При такой структуре показатель преломления внешнего слоя должен быть меньше, чем внутреннего, ибо плотность упаковки столбиков вблизи поверхности меньше, чем в глубине пленки.

### Выводы

Благодаря тому, что отраженная световая волна формируется в тонком приповерхностном слое исследуемого вещества, отражательный эллипсометри-

ческий метод имеет высокую чувствительность к особенностям строения и параметрам вещества в области формирования отраженной волны.

Эллипсометрический прибор контроля, построенный по усовершенствованной схеме метода Битти «поляризатор—образец—анализатор», может использоваться при исследованиях диэлектрических и полупроводниковых объектов. Для увеличения точности в таком приборе, в отличие от классического, поляризатор должен быть установлен под углом, меньшим 45°. Измерения должны выполняться при оптимальном угле падения и максимальном наборе азимутов анализатора 0, 45, 90, -45° и диаметрально противоположных им.

Для определения по измеренным эллипсометрическими параметрам показателя преломления и толщины пленок может быть применена автоматизированная программа, основанная на итерационном методе решения уравнения эллипсометрии, а для общего наблюдения за процессами, происходящими в пленке (пленках), может применяться наглядный метод диаграмм измеренных величин.

Проведенные исследования показали применимость прибора и методов расчета для исследования однородности пленок как по их площади, так и по толщине.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Beattie J. R., Conn G. K. T. Optical constants of metals in the infra-red. Principles of measurements // Phil. Mag.— 1955.— Vol. 46, N 373.— P. 222—234.
2. Beattie J. R. Optical constants of metals in the infra-red — experimental methods // Phil. Mag.— 1955.— Vol. 46, N 375.— P. 235—245.
3. Одарич В. А. Измерение малых величин эллипсометрических параметров фотоэлектрическим методом // Заводская лаб.— 1977.— Т. 43, № 9.— С. 1093—1095.
4. Одарич В. А. Применение метода Битти и Конна для измерения оптических постоянных  $n$  и  $k$  полупроводников в области собственного поглощения // Ж. прикл. спектроскопии.— 1970.— Т. 12, вып. 1.— С. 164—167.
5. Поперенко Л. В., Сташук В. С., Шайкевич И. А., Одарич В. А. Діагностика поверхні поляризованим світлом.— К.: ВПЦ Київський університет, 2007.
6. Горшков М. М. Эллипсометрия.— М.: Сов. радио, 1974.
7. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет.— М.: Мир, 1981.
8. Основы эллипсометрии / Под ред. А. В. Ржанова.— Новосибирск.: Наука, 1979.
9. Archer R. J. Determination of the properties of films on silicon by the method of ellipsometry // J. Opt. Soc. Amer.— Vol. 52, N 9.— P. 970—977.
10. Одарич В. А., Москаленко Т. П., Ципенюк Р. С. Визначення параметрів відбивної системи методом еліпсометрії головного кута. Пряма задача еліпсометрії // Вісник КУ. Фіз.-мат. науки.— 1991.— Вып. 2.— С. 73—78.
11. Одарич В. А., Панасюк В. Й., Сташук В. С. Спектроэллипсометрические измерения показателя преломления и толщины слоев  $\text{HfO}_2$  на оптическом стекле // Ж. прикл. спектроскопии.— 1992.— Т. 56, № 5—6.— С. 827—830.
12. Бятец М. А., Куш В. И., Одарич В. А., Панасюк В. Й. Еліпсометричні дослідження діелектричних шарів, напилених на кварцове скло // Вісник КУ. Фіз.-мат. науки.— 1992.— Вып. 7.— С. 7—12.

К. ф.-м. н. М. В. ДМИТРИЕВ, к. т. н. И. Н. ЕРИМИЧОЙ,  
к. т. н. Л. И. ПАНОВ

Украина, Одесский национальный политехнический университет  
E-mail: panov.leonid@gmail.com

Дата поступления в редакцию  
25.02 2009 г.

Оппонент д. х. н. В. Н. ТОМАШИК  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТЕКЛОКЕРАМИКИ СО СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ ДЛЯ РАЗНЫХ СООТНОШЕНИЙ КОМПОНЕНТОВ И РЕЖИМОВ СПЕКАНИЯ

*Представлены способы прогнозирования диэлектрической проницаемости стеклокерамики и ее компонентов и их долей для разных соотношений стекла, наполнителя и кристаллической фазы при разной температуре и длительности спекания.*

Стеклокерамические композиционные материалы (СКМ) успешно заменяют керамику, традиционно используемую в производстве изолирующих изделий радио- и электротехники. Они выгодно отличаются от других материалов, главным образом, быстрым спеканием при низкой температуре и возможностью изменять их физические и эксплуатационные характеристики в широких пределах [1—5].

Разновидностью стеклокерамики является СКМ, состоящий из стекла, функционального наполнителя и образуемой при спекании новой кристаллической фазы в составе стекла, которая оказывает влияние на свойства СКМ как непосредственно, так и за счет изменения состава исходного стекла из-за расходования его доли на образование кристаллической фазы. Это приводит к изменению соотношения компонентов. Кроме того, соотношение компонентов СКМ можно существенно изменять, используя разные количества стекла и наполнителя [1, 6] или разные продолжительности спекания при заданных фиксированных значениях температурах [7, 8].

Очевидно, что соотношение компонентов влияет на свойства СКМ, поскольку их параметры отличаются друг от друга.

Одним из важных параметров изолирующего СКМ и его компонентов является диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ . Прогнозирование ее величин для разных соотношений компонентов позволяет существенно ускорить поиск СКМ с оптимальными свойствами, благодаря открывающейся возможности его выбора из числа материалов с различными свойствами, теоретически предсказываемыми для разных составов. Целесообразность аналитического прогнозирования свойств композитов обусловлена также получаемой возможностью значительно сокращать затраты времени и материальных средств в процессе разработки материала.

Чем больше будет создано аналитических методов прогнозирования свойств СКМ для разных условий их изготовления, тем ощутимее будет эффект от их использования. Их применение позволит на порядок сократить объем экспериментов при разработке новых и усовершенствовании ранее созданных композитов.

Возможность реализовывать при использовании СКМ энергосберегающие, наукоемкие и постоянно сменяемые технологии, обеспечивающие комбинацию улучшенных свойств материала, позволяет создавать конкурентоспособные изделия.

Целью статьи являлось показать, каким образом можно прогнозировать диэлектрическую проницаемость кристаллизующейся композиционной стеклокерамики и ее компонентов при совместном влиянии на них двух независимо действующих факторов: соотношения компонентов и длительности спекания при фиксированных значениях температуры. При этом ставилась задача получить численные значения диэлектрической проницаемости и объемных долей всех компонентов СКМ для широкого диапазона соотношения компонентов при разной длительности спекания и двух значениях температуры синтеза.

При решении задачи был использован комплексный метод исследований, позволяющий определить параметры синтезированного СКМ.

Исходными данными для прогнозирования были результаты экспериментов, полученные в [7, 8] и приведенные в **табл. 1**. При этом использовался СКМ на основе свинцовоборосиликатного стекла, кристаллического наполнителя  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  и новой кристаллической фазы — крестобалита. Методики изготовления экспериментальных образцов и измерения аналогичны приведенным в [7—9].

Прогнозирование основано на использовании степенной связи параметров композиционного материала и его компонентов. В работе [10] подтверждено соответствие такой связи экспериментам на двух- и многокомпонентных СКМ.

Для диэлектрических параметров  $D$  (диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и удельного объемного электросопротивления) в общем виде формула степенной связи параметров СКМ имеет вид [10]

$$D^n = \sum_{i=1}^n y_i D_i^n, \quad (1)$$

где  $D_i$  — диэлектрический параметр  $i$ -го компонента СКМ;  
 $n$  — показатель степени ( $n \leq 10^{-4}$  для любых, практически встречаемых величин  $D_i$ );  
 $k$  — количество компонентов в составе синтезированного СКМ;  
 $y_i$  — объемные доли  $i$ -х компонентов.

Применив формулу (1) к относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  беспористого СКМ из стеклокристаллической матрицы и наполнителя, получим выражения для экспериментального образца и образца СКМ с  $i$ -м составом:

$$\epsilon_{\Sigma}^n = y_{\Sigma} \epsilon_{\Sigma}^n + y_{\Sigma} \epsilon_{\Sigma}^n; \quad (2)$$

$$\epsilon_i^n = y_{\Sigma} \epsilon_{\Sigma}^n + y_{ci} \epsilon_{ci}^n, \quad (3)$$

где индексы  $\Sigma$  и  $i$  соответствуют экспериментальным образцам и произвольно задаваемым  $i$ -тым составам СКМ;  
 $\epsilon_{\Sigma}$ ,  $\epsilon_c$  — диэлектрическая проницаемость наполнителя и стекла, соответственно;  
 $y_{\Sigma}$ ,  $y_c$  — объемные доли тех же компонентов.

Для используемого тугоплавкого наполнителя (температура плавления  $Al_2O_3$  равна  $2050^\circ C$ )  $\epsilon_{\Sigma} = \epsilon_{\Sigma} = \epsilon_{\Sigma}$  для всех составов и режимов спекания. При одинаковых режимах спекания  $\epsilon_{\Sigma} = \epsilon_{ci}$ . В этом случае решение системы уравнений (2) и (3) позволяет получить выражение для искомой прогнозируемой диэлектрической проницаемости СКМ  $\epsilon_i$  в виде

$$\epsilon_i^n = y_{\Sigma} \epsilon_{\Sigma}^n + \frac{y_{ci} (\epsilon_{\Sigma}^n - y_{\Sigma} \epsilon_{\Sigma}^n)}{y_{\Sigma}}. \quad (4)$$

Поскольку в рассматриваемом СКМ наполнитель не расходует на образование кристаллической фазы, его объемную долю  $y_{\Sigma}$  можно приравнять к объемной доле наполнителя в двухкомпонентном СКМ с некристаллизующимся стеклом. Для такого ком-

позита она была определена по методике, изложенной в [9] для случая, когда концентрация пор равна нулю. По определению,  $y_{\Sigma} = 1 - y_{\Sigma}$ . Для прогнозируемых  $i$ -х соотношений компонентов  $y_{ci}$  и  $y_{\Sigma}$  задаются произвольно, причем  $y_{\Sigma} = 1 - y_{ci}$ .

При расчете  $\epsilon_i$  по формуле (4) достаточно использовать значения только трех параметров, приведенных в табл. 1:  $\epsilon_{\Sigma}$ ,  $y_{\Sigma}$ ,  $y_{\Sigma}$ . Преимущество столь простого способа прогнозирования величин  $\epsilon_i$  состоит в том, что при этом не требуется знания объемных долей и диэлектрической проницаемости кристаллической фазы и остаточного стекла.

Как видно из табл. 1, изменение соотношения стекла и наполнителя приводит к ощутимым изменениям диэлектрической проницаемости СКМ, спекаемых в одинаковых условиях, что обусловлено различиями величин диэлектрической проницаемости наполнителя  $\epsilon_{\Sigma} = 11$  [9] и стекла:  $\epsilon_{ci} = \epsilon_i$  при  $y_{ci} = 1,00$  и для различных режимов спекания  $\epsilon_{ci} = 5,21 - 6,30$ . Видно также, что характеры изменения  $\epsilon_{\Sigma}$  и  $\epsilon_c$  (для всех соотношений компонентов) при увеличении продолжительности спекания аналогичны и это изменение менее ощутимо в зависимости  $\epsilon_c = f(\tau)$ , чем в зависимости  $\epsilon_i = f(y_{ci}, y_{\Sigma})$ . Значения  $\epsilon_{\Sigma}$  во всех рассмотренных случаях одинаковы, а величины  $\epsilon_i$  и  $\epsilon_c$  для всех  $i$ -х составов СКМ зависят от времени спекания  $\tau$ .

Для установления факта зависимости диэлектрической проницаемости стекла  $\epsilon_c$  от соотношения компонентов были вычислены значения  $\epsilon_{ci}$  для всех составов (табл. 1) по формуле

$$\epsilon_{ci}^n = \frac{\epsilon_i^n - y_{\Sigma} \epsilon_{\Sigma}^n}{y_{ci}}, \quad (5)$$

полученной из (3).

Выполненные расчеты показали, что для всех соотношений  $y_{ci} : y_{\Sigma}$  значения  $\epsilon_{ci}$  одинаковы и совпадают со значениями  $\epsilon_c$  при  $y_{ci} = 1,00$ , приведенными в табл. 1.

Помимо описанных, к числу прогнозируемых параметров относится объемная доля кристаллической

Таблица 1

Результаты прогнозирования параметров СКМ при разном соотношении долей стекла и наполнителя

| Экспериментальные данные                       |                     |              | Расчетные данные                         |           |                                          |           |                                          |           |                                          |           |                                          |           |                                          |           |                                       |           |
|------------------------------------------------|---------------------|--------------|------------------------------------------|-----------|------------------------------------------|-----------|------------------------------------------|-----------|------------------------------------------|-----------|------------------------------------------|-----------|------------------------------------------|-----------|---------------------------------------|-----------|
| $y_{\Sigma} = 0,505$ ,<br>$y_{\Sigma} = 0,495$ |                     |              | $y_{ci} = 0,45$ ,<br>$y_{\Sigma} = 0,55$ |           | $y_{ci} = 0,55$ ,<br>$y_{\Sigma} = 0,45$ |           | $y_{ci} = 0,65$ ,<br>$y_{\Sigma} = 0,35$ |           | $y_{ci} = 0,75$ ,<br>$y_{\Sigma} = 0,25$ |           | $y_{ci} = 0,85$ ,<br>$y_{\Sigma} = 0,15$ |           | $y_{ci} = 0,95$ ,<br>$y_{\Sigma} = 0,05$ |           | $y_{ci} = 1,00$ ,<br>$y_{\Sigma} = 0$ |           |
| $\tau$ , ч                                     | $\epsilon_{\Sigma}$ | $y_{\Sigma}$ | $\epsilon_i$                             | $y_{oci}$ | $\epsilon_i$                             | $y_{oci}$ | $\epsilon_i$                             | $y_{oci}$ | $\epsilon_i$                             | $y_{oci}$ | $\epsilon_i$                             | $y_{oci}$ | $\epsilon_i$                             | $y_{oci}$ | $\epsilon_i$                          | $y_{oci}$ |
| Температура спекания $900^\circ C$             |                     |              |                                          |           |                                          |           |                                          |           |                                          |           |                                          |           |                                          |           |                                       |           |
| 0,5                                            | 7,90                | 0,007        | 8,19                                     | 0,443     | 7,67                                     | 0,543     | 7,18                                     | 0,643     | 6,72                                     | 0,743     | 6,30                                     | 0,843     | 5,90                                     | 0,943     | 5,71                                  | 0,993     |
| 1,0                                            | 7,90                | 0,041        | 8,19                                     | 0,409     | 7,67                                     | 0,509     | 7,18                                     | 0,609     | 6,72                                     | 0,709     | 6,30                                     | 0,809     | 5,90                                     | 0,909     | 5,71                                  | 0,959     |
| 2,0                                            | 7,77                | 0,095        | 8,07                                     | 0,355     | 7,53                                     | 0,455     | 7,03                                     | 0,555     | 6,54                                     | 0,655     | 6,13                                     | 0,755     | 5,72                                     | 0,855     | 5,53                                  | 0,905     |
| 3,5                                            | 7,54                | 0,151        | 7,86                                     | 0,299     | 7,29                                     | 0,399     | 6,77                                     | 0,499     | 6,28                                     | 0,599     | 5,83                                     | 0,699     | 5,41                                     | 0,799     | 5,21                                  | 0,849     |
| Температура спекания $950^\circ C$             |                     |              |                                          |           |                                          |           |                                          |           |                                          |           |                                          |           |                                          |           |                                       |           |
| 0,5                                            | 7,92                | 0,035        | 8,20                                     | 0,415     | 7,69                                     | 0,515     | 7,21                                     | 0,615     | 6,75                                     | 0,715     | 6,33                                     | 0,815     | 5,93                                     | 0,915     | 5,74                                  | 0,965     |
| 1,0                                            | 8,30                | 0,092        | 8,56                                     | 0,358     | 8,09                                     | 0,458     | 7,66                                     | 0,558     | 7,24                                     | 0,658     | 6,85                                     | 0,758     | 6,48                                     | 0,858     | 6,30                                  | 0,908     |
| 2,0                                            | 8,21                | 0,166        | 8,48                                     | 0,284     | 8,00                                     | 0,384     | 7,55                                     | 0,484     | 7,11                                     | 0,584     | 6,72                                     | 0,684     | 6,34                                     | 0,784     | 6,16                                  | 0,834     |
| 3,5                                            | 7,90                | 0,219        | 8,19                                     | 0,231     | 7,67                                     | 0,331     | 7,18                                     | 0,431     | 6,73                                     | 0,531     | 6,30                                     | 0,631     | 5,90                                     | 0,731     | 5,71                                  | 0,781     |

Таблица 2

Прогнозируемые объемные доли  $y_{\phi}$  при разной длительности  $\tau$  и температуре спекания

| Температура 900°C, $B=0,30$ , $\Delta\tau=0,40$ ч |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\tau$ , ч                                        | 0,5   | 0,1   | 2,0   | 3,5   | 5,0   | 8,0   | 11,0  | 14,0  | 17,0  | 20,0  | 23,0  | 26,0  |
| $y_{\phi}$                                        | 0,007 | 0,041 | 0,095 | 0,151 | 0,187 | 0,224 | 0,240 | 0,246 | 0,248 | 0,249 | 0,250 | 0,250 |
| Температура 950°C, $B=0,60$ , $\Delta\tau=0,25$ ч |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| $\tau$ , ч                                        | 0,5   | 1,0   | 2,0   | 3,5   | 5,0   | 6,0   | 7,0   | 8,0   | 9,5   | 11,0  | 12,5  | 14,0  |
| $y_{\phi}$                                        | 0,035 | 0,092 | 0,166 | 0,219 | 0,269 | 0,242 | 0,246 | 0,257 | 0,256 | 0,255 | 0,255 | 0,255 |

фазы  $y_{\phi}$  при разной длительности спекания  $\tau$  для двух фиксированных значений температуры.

Прогнозирование можно осуществить не только для используемого в экспериментах диапазона времени спекания  $\tau$ , равного 0,5—3,5 ч, но и за его пределами, вплоть до наступления насыщения зависимости  $y_{\phi}=f(\tau)$  при максимальной степени кристаллизации стекла. Для этого можно воспользоваться формулой, приведенной в [6, 8]:

$$y_{\phi} = y_{\phi\max} y_{ci} [1 - e^{-B(\tau - \Delta\tau)}], \quad (6)$$

где  $y_{\phi\max}$  — максимально возможная величина объемной доли кристобалита в стекле, равная, согласно [8], 0,50 (при этом  $e^{-B(\tau - \Delta\tau)}=0$ );

$B$  — коэффициент, зависящий от скорости роста кристаллов и температуры спекания;

$\Delta\tau$  — отрезок времени от начала спекания СКМ до начала кристаллизации стекла.

Прогнозируемые значения  $y_{\phi}$  рассчитывались при  $\tau=0,5$ —3,5 ч, и двух значениях температуры спекания — 900 и 950°C, при этом, согласно [7, 8],  $y_{\phi\max} y_{ci}=0,25$ , а параметры  $B$  и  $\Delta\tau$  принимают значения, приведенные в табл. 2. Как и следовало ожидать, насыщение  $y_{\phi}$  при  $B=0,60$  (950°C) происходит значительно быстрее, чем при  $B=0,30$  (900°C). Это связано с тем, что зависимость скорости роста кристаллов и скорости образования центров кристаллизации от температуры нагрева стекла описывается кривой с максимумом [11, с. 84], который расположен ближе к режиму спекания 950°C.

К следующему прогнозируемому параметру СКМ относится диэлектрическая проницаемость остаточного стекла  $\epsilon_{oci}$  — одного из двух компонентов стеклокристаллической матрицы с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{ci}$ . Вторым компонентом является кристобалит с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{\phi}$ .

Поскольку стеклофаза представляет собой композит в составе СКМ, степенную связь параметров  $\epsilon_{ci}$ ,  $\epsilon_{oci}$ ,  $\epsilon_{\phi}$  можно выразить формулой

$$y_{ci} \epsilon_{ci}^n = y_{oci} \epsilon_{oci}^n + y_{\phi} \epsilon_{\phi}^n, \quad (7)$$

где  $y_{oci}$  — объемная доля остаточного стекла  $i$ -го состава.

Из (7) следует, что подлежащая прогнозированию диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{oci}$  определяется как

$$\epsilon_{oci}^n = \frac{y_{oci} \epsilon_{ci}^n - y_{\phi} \epsilon_{\phi}^n}{y_{oci}}. \quad (8)$$

Рассчитанные с помощью (8) значения  $\epsilon_{oci}$  представлены в табл. 3. Для расчета были использованы численные значения параметров  $y_{ci}$ ,  $y_{\phi}$ , приведенные в табл. 1 и 2, и объемная доля  $y_{oci}$ , равная  $y_{ci} - y_{\phi}$ . Диэлектрическая проницаемость кристобалита, согласно [8], принималась равной 4 во всех случаях.

Табл. 3 демонстрирует сложный характер изменения прогнозируемых величин диэлектрической проницаемости остаточного стекла  $\epsilon_{oci}$ , как при изменении только  $y_{ci}$ , так и при изменении только продолжительности спекания  $\tau$ .

Таблица 3

Результаты прогнозирования диэлектрической проницаемости остаточного стекла при различных соотношениях компонентов

| $\tau$ , ч                 | $\epsilon_{oci}$ |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|
|                            | $y_{ci}=0,45$    | 0,55 | 0,65 | 0,75 | 0,85 | 0,95 | 1,00 |
| Температура спекания 900°C |                  |      |      |      |      |      |      |
| 0,5                        | 5,74             | 5,74 | 5,73 | 5,73 | 5,73 | 5,73 | 5,72 |
| 1,0                        | 5,91             | 5,87 | 5,84 | 5,83 | 5,81 | 5,80 | 5,80 |
| 2,0                        | 6,03             | 5,92 | 5,85 | 5,80 | 5,76 | 5,73 | 5,72 |
| 3,5                        | 5,95             | 5,76 | 5,64 | 5,57 | 5,52 | 5,47 | 5,46 |
| Температура спекания 950°C |                  |      |      |      |      |      |      |
| 0,5                        | 5,91             | 5,88 | 5,86 | 5,84 | 5,83 | 5,82 | 5,82 |
| 1,0                        | 7,08             | 6,90 | 6,79 | 6,71 | 6,66 | 6,61 | 6,60 |
| 2,0                        | 7,93             | 7,40 | 7,14 | 6,96 | 6,84 | 6,75 | 6,71 |
| 3,5                        | 8,00             | 7,23 | 6,84 | 6,61 | 6,46 | 6,35 | 6,31 |

В первом случае, с ростом  $y_{ci}$  растет также и величина  $y_{oci}$ , остальные параметры —  $y_{fi}$  (табл. 1),  $\epsilon_f$  и  $\epsilon_{ci}$  — постоянны. Это приводит к уменьшению  $\epsilon_{oci}$  с ростом  $y_{ci}$  (формула (8) и табл. 3).

Во втором случае, с ростом  $\tau$  при неизменном  $y_{ci}$  уменьшается объемная доля  $y_{oci}$ , следовательно, увеличивается объемная доля  $y_{fi}$ , кривая  $\epsilon_{ci}=f(\tau)$  содержит максимум, не изменяется  $\epsilon_f$ . При этом  $\epsilon_{oci}$  изменяется сложным образом (формула (8) и табл. 3).

Все наблюдаемые изменения  $\epsilon_{oci}$  проявляются ощутимее при большей температуре спекания СКМ.

Приведенные методики позволили осуществить теоретическое прогнозирование следующих параметров трехкомпонентного СКМ для различных соотношений компонентов при разных режимах его спекания:

- диэлектрической проницаемости СКМ  $\epsilon_s$ ;
- диэлектрической проницаемости стеклокристаллического компонента  $\epsilon_{ci}$ ;
- диэлектрической проницаемости остаточного стекла  $\epsilon_{oci}$ ;
- объемной доли кристаллической фазы  $y_{fi}$ ;
- объемной доли остаточного стекла  $y_{oci}$ .

Входящие в формулы для расчетов соотношения всех исходных компонентов задаются в объемных долях (для массовых соотношений формулы отсутствуют), которые после выбора материала с нужными параметрами для изготовления СКМ необходимо пересчитать в массовые доли, что можно сделать с помощью общепринятых формул.

### Обсуждение результатов

В работе установлено, что к ощутимым изменениям диэлектрических свойств СКМ приводят изменение соотношения стекла и наполнителя из-за различия диэлектрической проницаемости этих компонентов при одинаковых условиях спекания, а также изменение температуры и продолжительности синтеза композита.

Для стеклокристаллической матрицы  $\epsilon_s$  не зависит от соотношения компонентов при одинаковых режимах спекания, однако зависит от продолжительности и температуры спекания и определяет такой же характер зависимости для композита.

Диэлектрическая проницаемость остаточного стекла  $\epsilon_{oc}$  изменяется сложным образом при изменении соотношения компонентов и режимов спекания.

Рассчитанные параметры позволяют не только оценить влияние каждого компонента на величину диэлектрической проницаемости СКМ, но и связать полученные результаты с процессом кристаллизации стекла. Наблюдаемое увеличение диэлектрической проницаемости остаточного стекла  $\epsilon_{oc}$  с ростом температуры становится тем больше, чем выше температура спекания композита. Это объясняется уменьшением вязкости стекла, что способствует повышению скорости роста кристаллов. Такое изменение  $\epsilon_{oc}$  связано с увеличением расходования диоксида кремния из состава стекла на образование кристобалита. Уменьшение доли  $\text{SiO}_2$  в остаточном стекле приводит к относительному повышению объемных долей других окислов стекла с более высокой диэлектрической проницаемостью, что приводит к увеличению  $\epsilon_{oc}$ .

Чем больше различается диэлектрическая проницаемость компонентов, тем большим становится влияние изменения их соотношения и режимов спекания на величину диэлектрической проницаемости СКМ.

Использованное в исследованиях свинцовоборосиликатное стекло начинает кристаллизоваться после некоторого инкубационного периода ( $\approx 25$  мин), поэтому при  $\tau \leq 25$  мин оно может использоваться в качестве некристаллизующего, как это сделано в работе [1], в которой использовался режим спекания  $900^\circ\text{C}$  в течение 10 мин.

Выполненная работа показывает путь сокращения трудоемкости разработки новых СКМ за счет замены части первичных натурных экспериментов быстро-выполняемыми несложными аналитическими расчетами, что в свою очередь, снижает затраты на вторичные вычислительные эксперименты.

Предложенные способы прогнозирования позволяют оценить все искомые параметры СКМ и выбрать состав с диэлектрическими свойствами, нужными для конкретного применения.

Полученные результаты могут использоваться при разработке новых и усовершенствовании существующих материалов, подобных рассмотренному СКМ, в том числе, более сложных композитов и простых стеклокристаллических материалов, получаемых методом порошковой металлургии или методом литья стекла.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Дмитриев М. В., Еримичой И. Н., Панов Л. И., Панова Е. Л. Прогнозирование диэлектрических свойств некристаллизующейся моноармированной полиматричной стеклокерамики // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2008. — № 5. — С. 58—62.
2. Дмитриев М. В. Композиционная радиостеклокерамика // Труды Одесского политехнического университета. — 1999. — Вып. 2(8). — С. 209—211.
3. А. с. 1782947 СССР. Стеклокерамический композиционный материал / Л. В. Буран, М. В. Дмитриев, В. Д. Лемза, Л. Н. Тартаковская. — 1992. — Бюл. № 3.
4. Дмитриев М. В. Стеклокерамические основания резисторов // Труды Одесского политехнического университета. — 1999. — Вып. 1(7). — С. 89—91.
5. Дмитриев М. В., Еримичой И. Н., Панов Л. И. Стеклокерамические основания конденсаторов // Тр. 9-й Междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ-2008». — 2008. — Одесса. — Т. II. — С. 84.
6. Дмитриев М. В. Прогнозирование диэлектрических свойств композиционной стеклокерамики с кристаллизующим стеклом для разных соотношений компонентов // Материалы электронной техники. — 2000. — № 3. — С. 35—37.
7. Дмитриев М. В. Влияние режимов спекания на параметры стеклокерамики с кристаллизующим стеклом // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2000. — № 1. — С. 36—39.
8. Дмитриев М. В., Еримичой И. Н., Панов Л. И. Оценка параметров компонентов моноармированной стеклокерамики со стеклокристаллической матрицей // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 2. — С. 51—57.
9. Дмитриев М. В. Влияние концентрации компонентов и пор на диэлектрическую проницаемость стеклокерамики // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1997. — № 4. — С. 34—38.
10. Дмитриев М. В. Степенная связь параметров композиционного материала и его компонентов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2002. — № 4-5. — С. 58—61.
11. Безбородов М. А. Стеклокристаллические материалы. — Минск: Наука и техника, 1982.

Д. т. н. Н. Г. СТАРЖИНСКИЙ, И. М. ЗЕНЯ,  
к. ф.-м. н. К. А. КАТРУНОВ, д. ф.-м. н. В. Д. РЫЖИКОВ

Украина, г. Харьков, Институт сцинтилляционных материалов  
E-mail: ns@isc.kharkov.com

Дата поступления в редакцию  
13.04 2009 г.

Оппонент д. ф.-м. н. Д. В. КОРБУТЯК  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## РАЗРАБОТКА СЦИНТИЛЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ $A^{IV}B^{VI}$ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО И ТЕХНИЧЕСКОГО РАДИАЦИОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

*Рассмотрены физико-технологические проблемы получения и основные свойства сцинтилляционных материалов на основе селенида цинка и других соединений  $A^{IV}B^{VI}$ . Приводятся данные о применении сцинтилляторов в различных радиационно-чувствительных устройствах.*

В настоящее время известно очень много материалов, светящихся под воздействием ионизирующих излучений, но только малая часть из них обладает свойствами, позволяющими отнести их к сцинтилляторам — веществам, по амплитудно-временным характеристикам свечения которых в режиме реального времени можно определять параметры ионизирующих излучений. С другой стороны, известно, что нет идеальных сцинтилляторов, подходящих для решения всех проблем радиационной физики, медицины и техники, и для каждой специфической области необходим поиск сцинтилляторов с подходящими функциональными характеристиками, причем среди основных свойств всегда желательны высокий световыход, низкая инерционность и радиационная стойкость [1—4].

При стремительном развитии таких областей радиационного приборостроения как рентгеновская медицинская и техническая томография (как и рентгеновская интроскопия в целом, включая системы контроля незаконного перемещения багажа и антитеррористической направленности), спектрометрия, дозиметрия мощных потоков ионизирующих излучений и др., требуются сцинтилляционные материалы, обладающие комплексом соответствующих свойств, а именно: высокие световыход и быстродействие, практически отсутствие послесвечения через 10—20 мс; температурная и радиационная стабильность выходных параметров; спектр их излучения должен быть сдвинут в «красную» область для лучшего спектрального согласования с современными фотоприемниками, например фотодиодами; желательно, чтобы они были негигроскопичными [1, 5, 6]. Однако такие сцинтилляторы как NaI(Tl), CsI(Tl), которые считаются одними из лучших на данный момент, имеют низкую радиационную стойкость (которая фактически не превышает  $10^4$  рад) и высокий уровень послесвечения

(до нескольких процентов после 20 мс); кроме того, они не являются водостойкими, что вызывает дополнительные трудности при их использовании в условиях высокой влажности. Оксидные кристаллы типа  $CdWO_4$ ,  $PbWO_4$ ,  $Bi_4Ge_3O_{12}$ ,  $Gd_2SiO_5$  имеют низкую конверсионную эффективность. Поэтому вопрос создания новых высокоэффективных сцинтилляционных материалов, изучение их свойств и разработка технологии их изготовления, несомненно, важны для многих традиционных и новых областей, где используются такие материалы.

Одним из многообещающих путей развития этого направления является использование изовалентнолегированных кристаллов  $A^{IV}B^{VI}$ , состоящих из элементов второй (Zn, Cd, Hg) и шестой (O, S, Se, Te) групп Периодической системы элементов. Установлено, что легирование этих соединений изовалентными примесями (ИВП) приводит к дефектообразованию в решетке матрицы и к образованию ассоциатов собственных точечных дефектов с ИВП, определяющих оптические и люминесцентные свойства кристаллов [7—10].

По своим электрофизическим, кристаллохимическим и оптическим свойствам (оптимальная ширина и форма запрещенной зоны, определяющая, с одной стороны, высокоэффективную реализацию излучательных переходов, и, с другой стороны, возможность подавления ловушек для носителей заряда и безызлучательных каналов релаксации возбужденных состояний, а также один, преимущественно  $n$ -тип проводимости) наилучшим для создания новых типов халькогенидных сцинтилляторов на основе соединений  $A^{IV}B^{VI}$  как кристалл-матрице является селенид цинка [1, 5, 6].

### Теоретические предпосылки

Рассмотрение процессов дефектообразования проведено на примере легированных кристаллов селенида цинка, при этом применение общего термодинамического подхода позволяет распространить результаты и выводы и на другие кристаллы этой группы. При легировании селенида цинка изовалентными примесями (типа Te или O, S) наблюдаются особенности дефектообразования, зависящие от электроотрицательности элементов, эффективных зарядов связи, кристаллохимических размеров. Это позволяет условно выделить два основных вида легирования — Te-подобное и O-подобное [11—14].

При Те-подобном легировании в области сопоставимых концентраций ZnSe и ZnTe образуют твердые растворы по классическому механизму замещения с образованием дефектов типа  $\text{Te}_{\text{Se}}$  и энергией образования  $U_1$ . В области малых концентраций ИВП, характерных для получения сцинтилляционных материалов (<1%), механизм простого замещения может оказаться энергетически менее выгодным, чем образование 2-х или 3-комплексных дефектов типа  $\text{V}_{\text{Zn}}\text{Te}_{\text{Se}}$  или  $\text{Zn}_i\text{V}_{\text{Zn}}\text{Te}_{\text{Se}}$  (где  $\text{Zn}_i$  — междоузельный атом цинка,  $\text{V}_{\text{Zn}}$  — вакансия цинка,  $\text{Te}_{\text{Se}}$  — теллур на месте селена) с энергиями образования  $U_2$  и  $U_3$ , соответственно, причем  $U_1 > U_2 > U_3$ . При таких концентрациях влияние ИВП Те на дефектообразование в решетке ZnSe(Те) можно также оценить из уравнения электронейтральности для эффективных зарядов  $e^*$ :

$$[\text{V}_{\text{Zn}}]e_{\text{ZnSe}}^* - [\text{Zn}_i]e_{\text{ZnSe}}^* - [\text{V}_{\text{Se}}]e_{\text{ZnSe}}^* + [\text{Se}_i]e_{\text{ZnSe}}^* - (e_{\text{ZnSe}}^* - e_{\text{ZnTe}}^*)[\text{Te}_{\text{Se}}] = 0;$$

$$e^* = (N \cdot \lambda^2 - (8 - N)) / (1 + \lambda^2),$$

где  $[\text{V}_{\text{Zn}}]$ ,  $[\text{V}_{\text{Se}}]$ ,

$[\text{Zn}_i]$ ,  $[\text{Se}_i]$  — соответственно, концентрация вакансий и междоузельных атомов в подрешетках Zn и Se;

$[\text{Te}_{\text{Se}}]$  — концентрация ИВП Те, замещающего атом Se;

$e_{\text{ZnSe}}^*$ ,  $e_{\text{ZnTe}}^*$  — соответственно, эффективный заряд связи Zn-Se и связи Zn-Te;

$N$  — валентность;

$\lambda$  — степень ковалентности,

$\lambda = 1 - \exp[-0,25(X_{\text{X}} - X_{\text{Zn}})]$ ;

$X$  — электроотрицательность,  $X_{\text{Zn}} = 1,5$ ;  $X_{\text{Se}} = 2,4$ ;  $X_{\text{Te}} = 2,1$ .

Подстановка значений  $X$  дает  $e_{\text{ZnTe}}^*/e_{\text{ZnSe}}^* \approx 0,918$ . Учитывая, что  $[\text{Zn}_i] < [\text{V}_{\text{Zn}}]$  (так как подвижность междоузельного цинка существенно выше подвижности вакансий цинка), а также предположив, что  $[\text{V}_{\text{Se}}] \approx [\text{Se}_i]$ , окончательно получим

$$[\text{V}_{\text{Zn}}] \approx (1 - (e_{\text{ZnTe}}^*/e_{\text{ZnSe}}^*))[\text{Te}_{\text{Se}}],$$

т. е. концентрация вакансий цинка  $\text{V}_{\text{Zn}}$  линейно увеличивается с ростом концентрации ИВП Те.

Соотношение между концентрациями одиночных дефектов  $\text{Te}_{\text{Se}}$  ( $C_1$ ) и 3-комплексных ( $C_3$ ) имеет вид

$$C_1 = C_3 \exp(-b), \quad (1)$$

где  $b = (U_1 - U_3)/(kT) - (\sigma_3 - \sigma_2)/k + \ln \alpha_3 - C_V^0$ ;

$\sigma_p$ ,  $\alpha_i$  — соответственно химический потенциал и статистический вес дефектов ( $\alpha_3 = 16$ );

$C_V^0$  — концентрация вакансий;

$k$  — постоянная Больцмана.

Из (1) следует, что из-за малого вклада  $C_V^0$  практически при любых отклонениях от стехиометрии, так же как и в отсутствие таковых, концентрация изолированных дефектов  $\text{Te}_{\text{Se}}$  много меньше концентрации 3-комплексных дефектов.

Для концентрации 2-комплексных дефектов  $C_2$  имеем

$$C_2 = 1/2D[DC_{\text{Te}} + DC_V^0 + 1 - ((C_{\text{Te}} - C_V^0)^2 D^2 + 2D(C_{\text{Te}} + C_V^0) + 1)^{1/2}], \quad (2)$$

где  $D = (\alpha_2/\alpha_3) \exp\{-(U_2 - U_V - U_3)/(kT) - (\sigma_3 - \sigma_2)/k\}$ ;

$U_V$  — энергия образования изолированных вакансий.

Соотношение между концентрациями 2-х и 3-комплексных дефектов имеет вид

$$C_3 = C_{\text{Te}} - C_2. \quad (3)$$

Из уравнений (2), (3) ясно, что с ростом концентрации Те до 1%, практически линейно возрастают концентрации как 2-х, так и 3-комплексных дефектов, причем с ростом концентрации Те увеличивается преобладание 2-комплексов (например при  $|U_2 - U_V| = 0,5$  эВ и  $U_3 = 0,1$  эВ их концентрация превышает концентрацию 3-комплексов в два раза, при  $|U_2 - U_V| = 0,5$  эВ и  $U_3 = 1$  эВ — на три порядка).

Для случая, когда отклонение от стехиометрии отсутствует, и легированию подвергается стехиометрический ZnSe ( $C_V^0 = 0$ ), уравнение (2) примет вид

$$C_2 = C_3 \exp(2[C_{\text{Te}} - C_3]), \quad (4)$$

где  $H = \alpha_2/\alpha_3 \cdot \exp(-(U_3 - U_2)/(kT) - (\sigma_3 - \sigma_2)/k)$ .

Численное решение уравнения (4) при условии, что  $U_2 - U_3$  изменяется в интервале от 0,1 до 1 эВ, дает строго противоположный результат: концентрация триплетов существенно превышает концентрацию дублетов — при  $U_2 - U_3 = 0,1$  эВ превышение составляет один порядок, при  $U_2 - U_3 = 1$  эВ — четыре порядка.

Таким образом, имея в виду, что для применения в сцинтилляторах оптимальными являются именно 3-комплексы, очевидно, что технология их изготовления должна быть такой, чтобы минимизировать отклонение от стехиометрии в сторону недостатка Zn. Легирование ИВП Те по разрезу ZnSe–ZnTe в Гиббсовом треугольнике тройной системы Zn–Se–Te предполагает сохранение соотношения катионов и анионов 1:1. Только в этом случае вакансии Zn образуются одновременно с междоузельниками Zn, формируя 3-комплексы типа  $\text{Zn}_i\text{V}_{\text{Zn}}\text{Te}_{\text{Se}}$ .

При соизмеримых концентрациях бинарных компонентов как упругая, так и электростатическая энергия Те в позициях замещения уменьшается, поскольку и средний атомный радиус, и средний эффективный заряд приближаются к соответствующим параметрам ZnTe. Формирование комплексов с затратой энергии на образование междоузельников перестает быть выгодным, и поэтому механизм растворения переходит в классическое замещение.

Для реальных кристаллов селенида цинка, как и большинства соединений  $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ , свойственны отклонения от стехиометрии. При этом возможно отклонение как в сторону избытка Zn (с образованием вакансий в подрешетке селена), так и в сторону избытка Se (с образованием вакансий цинка  $\text{V}_{\text{Zn}}$ ). Первый вариант не представляет интереса при легировании по разрезу ZnSe–Te, поскольку вводимая ИВП Те будет локализоваться в вакансиях подрешетки селена, приближая систему к разрезу ZnSe–ZnTe с механизмом дефектообразования, описанным выше. Второй же вариант может дать новую возможность: ИВП Те будет локализоваться рядом с  $\text{V}_{\text{Zn}}$ , образуя 2-комплекс. На практике, как правило, встречается именно второй вариант отклонения от стехиометрии, что обуславливает необходимость послеростовой термообработки кристаллов ZnSe(Те) в среде Zn для перевода 2-комплексов в 3-комплексы типа  $\text{Zn}_i\text{V}_{\text{Zn}}\text{Te}_{\text{Se}}$ , кото-

рые, как было показано ранее, играют роль центров излучательной рекомбинации в халькогенидных сцинтилляторах (ХС)  $\text{ZnSe}(\text{Te})$ .

При введении других ИВП, в том числе при О-подобном легировании, вышеуказанные термодинамические представления и выводы остаются такими же, как для  $\text{ZnSe}(\text{Te})$ , с тем только отличием, что 2-комплексы представляют собой несимметричные диполи  $\text{X}^{\text{O}}\text{Zn}_i$  или  $\text{X}^{\text{Te}}\text{Zn}_i$ , где  $\text{X}^{\text{O}}$ ,  $\text{X}^{\text{Te}}$  — атомы замещения кислорода или теллура в халькогенидной подрешетке  $\text{ZnSe}$ , с суммарным положительным зарядом (поскольку положительный заряд  $\text{Zn}_i$  превосходит отрицательный заряд серы и даже кислорода в позициях замещения), и к ним присоединяется отрицательно заряженная  $\text{V}_{\text{Zn}}$ . Поэтому следует ожидать, что 3-комплексы в полупроводниках  $\text{ZnSe}(\text{S})$  и  $\text{ZnSe}(\text{O})$  имеют такой же состав, что и  $\text{ZnSe}(\text{Te})$ , т. е. состоят из  $\text{V}_{\text{Zn}}$ ,  $\text{Zn}_i$  и ИВП, однако взаимное расположение структурных компонентов в комплексах с  $\text{Te}$  другое. Если в 3-комплексах с теллуром  $\text{V}_{\text{Zn}}$  занимает положение между  $\text{Te}$  и  $\text{Zn}_i$  (поскольку последние отталкиваются), то в 3-комплексах с участием  $\text{S}$  и  $\text{O}$  в центре комплекса находится  $\text{Zn}_i$ , по разные стороны от которого в ближнем окружении локализованы  $\text{V}_{\text{Zn}}$  и ИВП. Из анализа описанных механизмов дефектообразования при О- и Те-подобном легировании следует, что центры типа  $\text{V}_{\text{Zn}}\text{Zn}_i\text{O}_{\text{Se}}$  и  $\text{Zn}_i\text{V}_{\text{Zn}}\text{Te}_{\text{Se}}$  являются антагонистическими. Для получения высокоэффективных сцинтилляторов  $\text{ZnSe}(\text{Te})$  следует уменьшать концентрацию кислорода в кристаллах, а для получения  $\text{ZnSe}(\text{O})$  — концентрацию теллура.

#### Получение халькогенидных сцинтилляторов

Основные технологические этапы получения ХС различных типов показаны на рис. 1. Следует отметить, что для получения ХС на основе  $\text{ZnSe}(\text{O})$  необходима операция введения примеси кислорода. Для этого предварительно выращенный слиток неактивированного селенида цинка подвергается механическому дроблению в кислородосодержащей атмосфере, при этом осуществляется механоактивация шихты кислородом. Альтернативным способом введения кислорода в шихту, улучшающим механические и

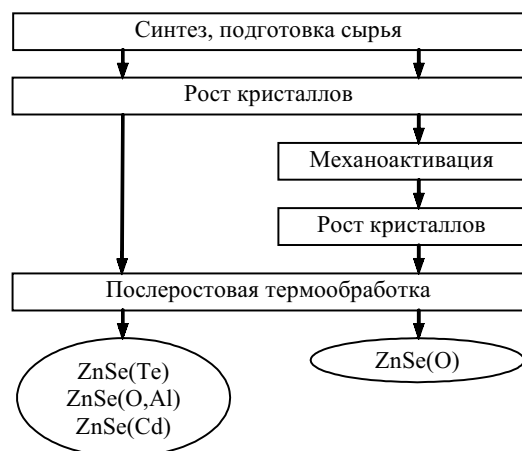


Рис. 1. Особенности технологии получения ХС различных типов

сцинтилляционные свойства кристаллов, является добавка оксидов металлов III группы, например  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (при массовой доле 0,03—0,1%) [15—19].

Для выращивания ХС использовался метод выращивания кристаллов из расплава под давлением инертного газа ( $\text{Ar}$ , до  $10^7$  Па) — метод Бриджмена—Стокбаргера, позволяющий получать кристаллы ХС диаметром до 40 мм, весом около 1 кг за сравнительно короткое время (несколько суток).

Опытно-промышленная установка для выращивания кристаллов ХС представляет собой компрессионную печь с резистивным графитовым нагревателем специальной конструкции и двухслойным графитовым тиглем, конструкция которого позволяет снизить массоперенос исходного вещества из зоны кристаллизации за пределы тигля.

На финишной стадии получения ХС различных типов в качестве стандартной процедуры использовалась термообработка кристаллов в парах  $\text{Zn}$  ( $T=1300$  К, 24—48 ч), при которой, как было сказано выше, происходит окончательное формирование центров люминесценции и подавление возможных каналов безызлучательной рекомбинации и уровней, обуславливающих светозапасание и послесвечение сцинтилляторов [20—28].

#### Спектрально-кинетические и энергетические характеристики ХС

В таблице приведены выходные параметры основных типов ХС, получаемых при различных методах легирования. Для сравнения в таблице приведены также характеристики широко используемого сцинтиллятора  $\text{CsI}(\text{Tl})$ . При всех имеющихся преимуществах перед другими сцинтилляторами, основным недостатком ХС является заметное самопоглощение излучения (коэффициент поглощения  $\alpha$  достигает

Основные выходные характеристики кристаллов ХС и  $\text{CsI}(\text{Tl})$

| Параметры                                                                 | $\text{ZnSe}(\text{O})$<br>$\text{ZnSe}(\text{O,Al})$ | $\text{ZnSe}(\text{Te})$ ,<br>$\text{ZnSe}(\text{Cd,Te})$ | $\text{CsI}(\text{Tl})$ |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------|
| Плотность, г/см <sup>3</sup>                                              | 5,42                                                  | 5,42                                                      | 4,51                    |
| Эффективный атомный номер                                                 | 33                                                    | 33                                                        | 54                      |
| Гигроскопичность                                                          | нет                                                   | нет                                                       | да                      |
| Полоса максимальной люминесценции, нм                                     | 590—605                                               | 630—640                                                   | 550                     |
| Послесвечение:<br>после 5 мс, %<br>после 20 мс, %                         | <0,01<br>≤0,005                                       | <0,2<br><0,05                                             | 1—2<br>0,3—2,0          |
| Показатель поглощения, см <sup>-1</sup>                                   | 0,1—0,15                                              | 0,1—0,2                                                   | <0,05                   |
| Световой выход с ФД относительно $\text{CsI}(\text{Tl})$ толщиной 2 мм, % | 90—110                                                | 100—120                                                   | 100                     |
| Время высвечивания, мкс                                                   | 1—2                                                   | 30—50                                                     | 1                       |
| Коэффициент спектрального согласования с фотодиодом                       | 0,9                                                   | 0,92                                                      | 0,75                    |

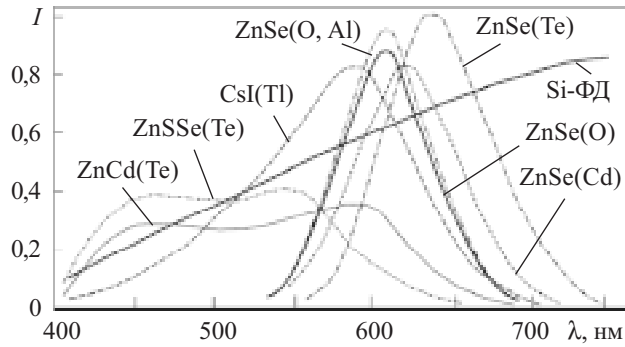


Рис. 2. Спектры излучения ХС на основе соединений  $A^{II}B^{VI}$  и спектральная чувствительность Si-фотодиода

0,1—0,2  $\text{см}^{-1}$ ). Очень высокий практический световой выход элементов толщиной не более 5 мм, измеряемый с помощью Si-фотодиода, объясняется двумя факторами: хорошей спектральной согласованностью спектра излучения сцинтиллятора со спектральной чувствительностью фотодиода (рис. 2) и высоким абсолютным световыходом  $I_{AC}$ , достигающим для некоторых типов ХС величины  $(6,3\text{—}7,6) \cdot 10^4$  фотон/МэВ, что превосходит световой выход одного из лучших сцинтилляторов — CsI(Tl) [29—34].

Для Те-легированных кристаллов ХС (ZnSe(Te), ZnSe(Cd,Te)) характерна высокая стабильность зависимости светового выхода ( $S$ ) от температуры образцов (рис. 3) — в диапазоне  $T=4,2\text{—}350$  К изменения величины  $S$  не превышает 20—30%. При этом ход зависимости  $S=f(T)$  немонотонен, в области  $T=300\text{—}350$  К наблюдается некоторое возрастание величины  $S$ , связанное с поэтапностью процессов термоионизации-термогашения в 3-комплексах  $\text{Te}_{\text{Se}}\text{—V}_{\text{Zn}}\text{Zn}_i$ . Спектральный состав излучения, в котором доминирует полоса с  $\lambda_{\text{max}}=630\text{—}640$  нм, остается практически неизменным [20, 38].

Для О-легированных кристаллов ХС (ZnSe(O), ZnSe(O, Al) и др.) при температуре 300 К характерна полоса излучения  $\lambda_{\text{max}}=600\text{—}605$  нм. Однако в диапазоне  $T=80\text{—}500$  К у таких кристаллов обнаружи-

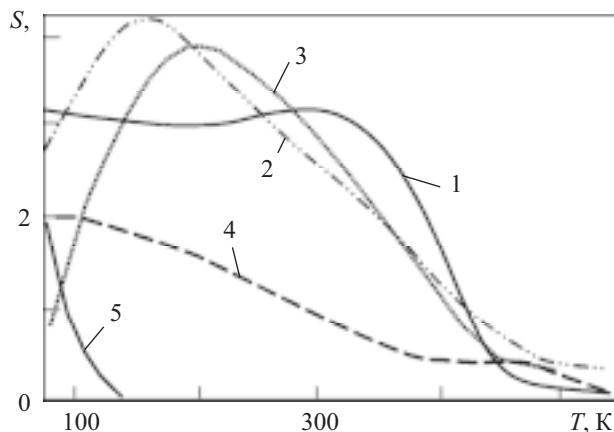


Рис. 3. Температурная зависимость световыхода ( $S$ ) Те-легированных (1) и О-легированных (2) ХС, а также интенсивности полос люминесценции кристаллов типа ZnSe(O), ZnSe(O,Al) с длиной волны излучения (в нм): 3 — 595—605; 4 — 630—640; 5 — 880

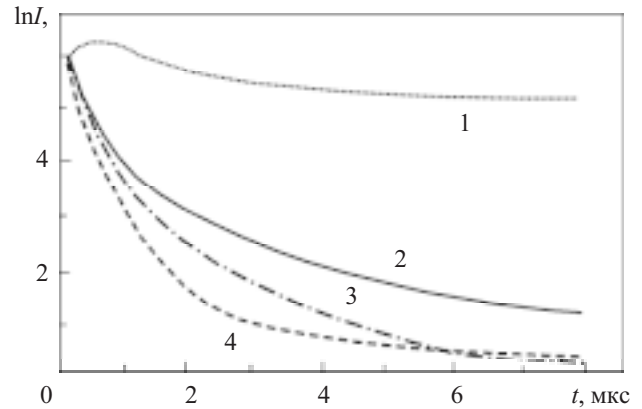


Рис. 4. Кинетика высвечивания ХС при  $T=300$  К: 1 — ZnSe(Te); 2 — ZnSe(Cd); 3 — ZnSe(O,Al); 4 — ZnSe(O)

вается двойная инверсия доминирующей полосы люминесценции: при  $T=80\text{—}100$  К  $\lambda_{\text{max}}=620\text{—}630$  нм (энергия активации термогашения  $\epsilon_T=0,05$  эВ), при  $T=110\text{—}350$  К  $\lambda_{\text{max}}=600\text{—}605$  нм ( $\epsilon_T=0,5$  эВ), а при  $T>400$  К снова  $\lambda_{\text{max}}=620\text{—}630$  нм ( $\epsilon_T=0,7$  эВ), что связано со сменой доминирующих полос излучения (рис. 3), обусловленной конкурированием основных центров свечения типа  $\text{V}_{\text{Zn}}\text{Zn}_i\text{O}_{\text{Se}}$  и вторичных, связанных, возможно, с неконтролируемыми примесями халькогенидов.

В отличие от «быстрой» кинетики высвечивания О-легированных ХС (табл. 1, рис. 4), кинетика люминесценции Те-легированных ХС сильно затянута (при массовой доле легирующего элемента  $C_{\text{Te}} \geq 0,5$  —

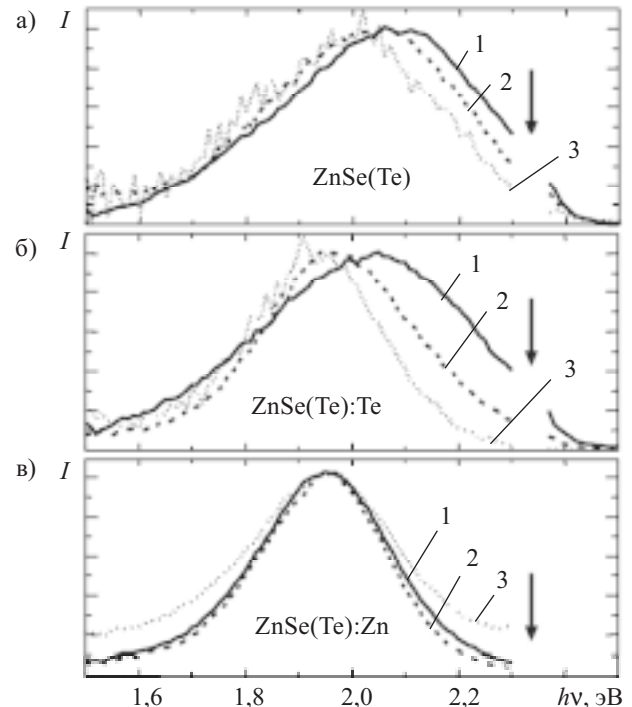


Рис. 5. Изменение спектров люминесценции кристаллов ZnSe(Te) неотожженных (а), отожженных в Те (б) и отожженных в Zn (в) с разной задержкой  $\Delta t$  после прекращения возбуждения: 1 — 0 мкс; 2 — 1 мкс; 3 — 10 мкс (стрелки указывают энергию кванта возбуждения)

2% время высвечивания  $\tau \geq 50$ —100 мкс) и немонотонна, что так же как и в случае особого хода термогашения люминесценции может быть связано с каскадными процессами энергопереноса в 3-комплексах  $\text{Te}_{\text{Se}}-\text{V}_{\text{Zn}}\text{Zn}_i$  [20, 23, 36, 37].

Уровень послесвечения для всех типов ХС очень низок (табл. 1), что свидетельствует об эффективном подавлении ловушек носителей заряда на заключительном этапе получения ХС путем термообработки в среде Zn, за счет чего кристаллы также приобретают высокую проводимость  $n$ -типа (концентрация свободных электронов  $10^{17}$ — $10^{19}$  см $^{-3}$ , их подвижность при  $T=80$ —350 К составляет 150—400 см $^2$ /(В·с) [6, 27, 38].

Вышеуказанные данные о свойствах рабочих полос люминесценции ХС (рис. 3, 4, табл. 1), а также характер изменения формы «крыльев» полос излучения после прекращения облучения (рис. 5), показывают, что у кристаллов ХС наблюдается симметричное относительно  $\lambda_{\text{max}}$  затухание в высоко- и низкоэнергетических областях полосы излучения (рис. 5, в). Это является одним из свидетельств рекомбинационной природы люминесценции, в отличие от донорно-акцепторной, характерной для высокоомных и не прошедших послеростовой отжиг в среде Zn кристаллов (рис. 5, а, б) с несимметричным затуханием излучения в полосе. На основании этого можно предложить схему основных переходов в ХС, приведенную на рис. 6, позволяющую объяснить возникновение полос люминесценции Л-600-620 и Л-635, особенности кинетики и термогашения люминесценции ХС [6, 20, 21, 39, 40].

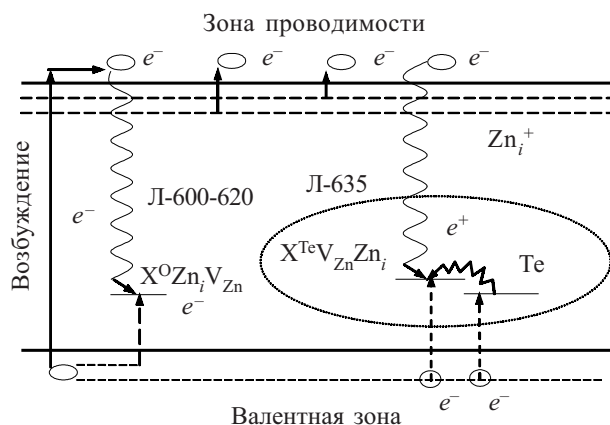


Рис. 6. Схема излучательных переходов в ХС различных типов

Учитывая, что примесь Te в ХС типа ZnSe(Te) может играть роль изоэлектронной ловушки с метастабильным состоянием, упрощенную схему излучательных переходов можно разбить на следующие этапы:

- первичная ионизация — распределение зарядов  $e^-$  и  $e^+$ ;
- локализация и накопление дырок  $e^+$  на метастабильных уровнях  $\text{Te}_{\text{Se}}$  в парах  $\text{Te}_{\text{Se}}-\text{V}_{\text{Zn}}\text{Zn}_i$ ;
- переход (термо- или фотоиндуктивный) дырок  $e^+$  на уровни  $\text{V}_{\text{Zn}}\text{Zn}_i$ ;
- излучательная рекомбинация свободного электрона  $e^-$  с локализованной на  $\text{V}_{\text{Zn}}\text{Zn}_i$  дыркой  $e^+$ .

При температурах, когда уже происходит термическое освобождение дырок  $e^+$  с уровня  $\text{Te}_{\text{Se}}$ , но еще нет термоионизации другого компонента 3-комплекса —  $\text{V}_{\text{Zn}}\text{Zn}_i$  (область  $T=300$ —350 К на рис. 3), эффективность излучательной рекомбинации увеличивается. Для кристаллов ХС с О-подобным типом легирования этап б) практически отсутствует, а кинетика высвечивания и ход термогашения имеют обычный вид.

Таким образом, для всех типов ХС люминесценция имеет примесную рекомбинационную природу с 3-комплексами в роли центров излучения, но в Te-легированных ХС, из-за наличия в составе центров свечения атомов Te, играющих одновременно роль изоэлектронной ловушки с метастабильными возбужденными состояниями, энергоперенос имеет каскадный характер с вытекающими последствиями для термогашения и кинетики люминесценции.

### Основные области практического использования ХС

Экспериментальные исследования показали, что ввиду повышенного самопоглощения излучения необходимо тщательно выбирать толщину сцинтилляционных элементов для конкретного диапазона энергии регистрируемых излучений (рис. 7). Одной из областей, где элементы на основе ХС малой (не более 3—5 мм) толщины признаны наиболее эффектив-

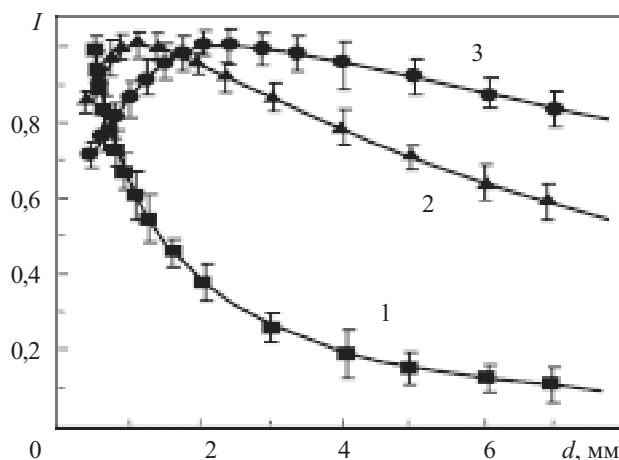


Рис. 7. Зависимость относительного световыхода от толщины образцов ХС при рентгеновском возбуждении: 1 — 20 кВ; 2 — 50 кВ; 3 — 100 кВ

ными с учетом их высокого световыхода, очень низкого уровня послесвечения и относительно невысокого атомного номера (для ZnSe  $Z_{\text{эф}}=33$ ), является мультиэнергетическая радиография [29, 37, 41—43]. В таких системах низкоэнергетические детекторы на основе ХС могут служить энергетическими фильтрами, а Te-легированные ХС, обладающие более длительным временем высвечивания  $\tau$ , чем другие сцинтилляторы ( $\tau_1 \gg \tau_2$ ,  $Z_{\text{эф}1} < Z_{\text{эф}2}$ ) — еще и частотно-зависимыми энергетическими фильтрами для модулирующего зондирующего рентгеновского излучения (рис. 8). Это позволяет существенно повысить чувствительность интроскопов к компонентам тестируе-

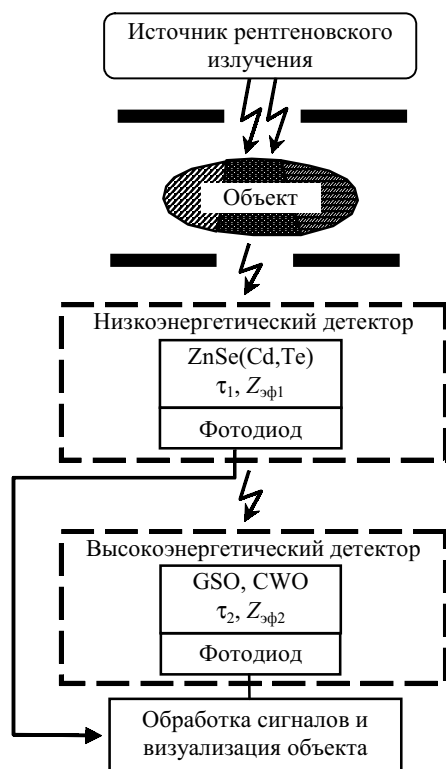


Рис. 8. Блок-схема детектирующего тракта с повышенной чувствительностью для мультиэнергетической радиографии

мых объектов с близким  $Z_{эф}$  (например мыло и взрывчатка). Для медицинских и технических интроскопов нового поколения, работающих в режиме реального времени, более подходящими являются О-легированные ХС.

В сочетании с другими сцинтилляторами (например CsI(Tl)) ХС в виде тонких пластин (1–2 мм) или в мелкозернистом виде могут использоваться в комбинированных и «фосфич»-детекторах для раздельной регистрации  $\alpha$ -,  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -квантов в смешанных радиационных потоках [44–47].

С учетом того, что ХС являются уникальными материалами, сочетающими свойства как полупроводников, так и высокоэффективных сцинтилляторов, очень интересным и перспективным решением было создание детекторов на основе ХС-элементов с интегрированной поверхностной фоточувствительной гетероструктурой типа «ХС/pZnTe–nCdSe» [1, 48, 49], обладающих большей, чем у «ХС–ФД»-детектора, рентгеночувствительностью (до 180–200 нА·мин/(Р·см²)), простотой конструкции, повышенной механической и радиационной стойкостью.

Если на поверхности кристаллов ZnSe(ИБП) (например типа ZnSe(Cd, Te), обладающего повышенной однородностью свойств в объеме элементов) сформировать фоточувствительную структуру Шоттки типа ZnSe(ИБП)–Ni, то такие элементы в сочетании с селективными оптическими фильтрами могут использоваться как высокоэффективные датчики для А-, В-, и С-диапазонов УФ-излучения [50, 51]. Кроме высокой чувствительности (0,02–0,1 А/Вт), та-

кие детекторы имеют также высокие эксплуатационные свойства, простую конструкцию и высокую стойкость к УФ-излучению.

С использованием детекторов на основе активированных кристаллов селенида цинка с фоточувствительными структурами Шоттки, оптических фильтров и фотометрической интегрированной сферы разработаны конструкции дозиметров, которые предназначены для контроля дозы и мощности УФ-излучения природного и техногенного происхождения в УФА- и УФБ-областях спектра [52].

### Заключение

Кристаллы ХС на основе селенида цинка и других соединений  $A^{IV}B^{VI}$  обладают специфическими спектрально-кинетическими свойствами люминесценции, которые зависят от вида изовалентной примеси и определяются двумя основными направлениями комплексообразования — при Те-подобном и О-подобном легировании. Такие особенности свойств ХС как высокие световыход и радиационная стойкость, очень низкий уровень послесвечения, относительно невысокий атомный номер и «медленная» или «быстрая» кинетика высвечивания, а также уникальное сочетание для всех типов ХС сцинтилляционных и полупроводниковых свойств позволяют создавать детектирующие системы для мультиэнергетической быстродействующей радиографии с повышенной чувствительностью, «фосфич»-детекторы, а также датчики ионизирующих излучений с интегрированными на поверхности ХС-кристаллов фотоприемниками на основе гетероструктур и барьеров Шоттки.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Атрошенко Л. В., Бурачас С. Ф., Гальчинецкий Л. П. и др. Кристаллы сцинтилляторов и детекторы на их основе. — Киев.: Наукова думка, 1998.
2. Гектин А. В., Гринев Б. В. Галоидные сцинтилляторы. Научные и инженерные разработки // Функциональные материалы для науки и техники. — Харьков: Институт монокристаллов. — 2001. — С. 28–47.
3. Гринев Б. В., Семиноженко В. П. Сцинтилляционные детекторы ионизирующих излучений для жестких условий эксплуатации. — Харьков: Изд-во «Основа» при Харьк. Ун-те, 1993.
4. Глобус М. Е., Гринев Б. В. Неорганические сцинтилляторы. Новые и традиционные материалы. — Х.: Акта, 2000.
5. Рыжиков В. Д. Сцинтилляционные кристаллы полупроводниковых соединений  $A^{IV}B^{VI}$ . Получение, свойства, применение. — М.: НИИТЭХИМ, 1989.
6. Рыжиков В. Д., Старжинский Н. Г., Гальчинецкий Л. П., Силин В. И. Полупроводниковые сцинтилляторы на основе соединений  $A^{IV}B^{VI}$  // Функциональные материалы для науки и техники. — Харьков: Институт монокристаллов. — 2001.
7. Уоткинс Дж. Дефекты решетки в соединениях  $A^{IV}B^{VI}$ . Точечные дефекты в твердых телах. — М.: Мир, 1979. — С. 221–242.
8. Баженов В. К., Фистуль В. И. Изозлектронные примеси в полупроводниках. Состояние проблемы // ФТП. — 1984. — Т. 18, № 8. — С. 1345–1362.
9. Георгобиани А. Н., Котляревский М. Б. Проблема управления составом точечных дефектов в соединениях  $A^{IV}B^{VI}$  // Физика соединений  $A^{IV}B^{VI}$ : Сб. научн. тр. — М.: Наука, 1986. — С. 72–108.
10. Thomas D. G. A review of radioactive recombination at isoelectronic donors and acceptors // Phys. Soc. Jap. — 1966. — Vol. 21. — P. 265–271.
11. Ryzhikov V. D., Starzhinskiy N. G., Gal'chinskii L. P. et al. The role of oxygen in formation of radiative recombination centers

in  $\text{ZnSe}_{1-x}\text{Te}_x$  crystals // International Journal of Inorganic Materials.— 2001.— Vol. 8, N 3.— P. 1227—1229.

12. Koshkin V. M., Dulfan A. Ya., Ryzhikov V. D. et al. Thermodynamics of isovalent tellurium substitution for selenium in ZnSe semiconductors // Functional Materials.— 2001.— Vol. 8, N 4.— P. 708—713.

13. Koshkin V. M., Dulfan A. Ya., Ganina N. V. et al. Tellurium, sulfur, and oxygen isovalent impurities in ZnSe semiconductor // Functional Materials.— 2002.— Vol. 9, N 3.— P. 438—441.

14. Atroschenko L. V., Galkin S. N., Gal'chinetskii L. P. et al. Influence of the growth parameters and subsequent annealing upon structural perfectness, optical and mechanical properties of  $\text{ZnSe}_{1-x}\text{Te}_x$  crystals // Functional Materials.— 2001.— Vol. 8, N 3.— P. 455—461.

15. Пат. 51766 України. Спосіб одержання скінтілятора на основі селеніду цинку, активованого телуrom / В. Д. Рыжиков, М. Г. Старжинський, Л. П. Гальчинецький, В. І. Сілін.— 16.12.2002. Бюл. №12.

16. Пат. 2170292 РФ. Способ получения скінтілятора на основе селенида цинка, активированного теллуrom / В. Д. Рыжиков, Н. Г. Старжинский, Л. П. Гальчинецкий, В. И. Силин.— 10.07.2001. Бюл. №19.

17. Пат. 51767 України. Спосіб одержання напівпровідникового матеріалу n-типу на основі селеніду цинку / В. Д. Рыжиков, М. Г. Старжинський, Л. П. Гальчинецький, В. І. Сілін.— 16.12.2002. Бюл. №12.

18. Пат. 2170291 РФ. Способ получения полупроводникового материала n-типа на основе селенида цинка / В. Д. Рыжиков, Н. Г. Старжинский, Л. П. Гальчинецкий, В. И. Силин (UA).— 10.07.2001. Бюл. №19.

19. Заяв. Укр. №20041210740. Спосіб одержання скінтіляційного напівпровідникового матеріалу на основі активованого селеніду цинку / М. Г. Старжинський, Б. В. Гриньов, К. О. Катрунов, В. Д. Рыжиков, В. І. Сілін.— Заявл. 27.12.04, рішення про видачу патенту від 24.11.05.

20. Рыжиков В. Д., Старжинский Н. Г. О механизме красной люминесценции активированных кристаллов селенида цинка // Укр. физ. журнал.— 1988.— Т. 33, № 6.— С. 818—824.

21. Ryzhikov V. D., Silin V. I., Starzhinskiy N. G. A new  $\text{ZnSe}_{1-x}\text{Te}_x$  scintillator: luminescence mechanism // Nucl. Tracks Radiat. Meas.— 1993.— Vol. 2, N 1.— P. 53—55.

22. Ryzhikov V. D., Starzhinskiy N. G., Gal'chinetskii L. P. et al. Luminescence of  $\text{ZnSe}(\text{Te})$  crystals melt grown from the charge enriched in super-stoichiometric components // Functional Materials.— 2000.— Vol. 7, N 2.— P. 204—208.

23. Ryzhikov V., Starzhinskiy N., Katrunov K. et al. Effects of annealing in zinc vapor upon the electron spectrum formation of  $\text{ZnSe}(\text{Te})$ -based scintillators // Functional Materials.— 2002.— Vol. 9, N 1.— P. 143—147.

24. Рыжиков В., Старжинский Н. Оптические и электрические свойства центров захвата в кристаллах  $\text{ZnSe}:\text{Te}$  // Пробл., получ. и исслед. монокристаллов.— Харьков, ВНИИМ.— 1988.— № 21.— С. 86—89.

25. Ryzhikov V. D., Starzhinskiy N. G., Gal'chinetskii L. P., Silin V. I. Semiconductor scintillators based on  $\text{A}^2\text{B}^6$  compounds // Telecommunications and Radio Engineering.— 2001.— Vol. 55, N 10—11.— P. 188—198.

26. Ryzhikov V. D., Starzhinskiy N. G., Gal'chinetskii L. P. et al. Effect of isovalent dopants upon spectral-kinetic characteristics of  $\text{ZnSe}$  crystals // Functional Materials.— 2002.— Vol. 9, N 1.— P. 139—142.

27. Ryzhikov V., Gashin P., Starzhinskiy N. et al. Luminescence properties of isovalently doped  $\text{ZnSe}$  crystals // Functional Materials.— 2003.— Vol. 10, N 2.— P. 207—210.

28. Ryzhikov V., Starzhinskiy N., Gal'chinetskii L. et al. Influence of isoelectric impurities on scintillation and luminescence properties of  $\text{ZnSe}$  based scintillators // Functional Materials.— 2002.— Vol. 9, N 3.— P. 433—437.

29. Ryzhikov V., Starzhinskiy N., Katrunov K. et al. Energy characteristics of scintillators for X-ray introscopy // Functional Materials.— 2004.— Vol. 11, N 1.— P. 210—215.

30. Katrunov K., Naydenov S., Ryzhikov V. et al. On the optimum geometric shapes of  $\text{ZnSe}$ -based scintillation elements // БАИТ. Сер. ядерно-физ. исследования.— 2004.— № 2.— С. 174—176.

31. Atroschenko L. V., Gal'chinetskii L. P., Galkin S. N. et al. Doping methods and properties of the solid solutions on  $\text{A}^{II}\text{B}^{VI}$  crystals base // Functional Materials.— 2005.— Vol. 12, N 4.— P. 610—615.

32. Ryzhikov V., Starzhinskiy N., Chugai O. et al. Studies of photoactive states of isovalently doped  $\text{ZnSe}$  crystals by the method of scanning photodielectric spectroscopy // Functional Materials.— 2004.— Vol. 11, N 3.— P. 563—565.

33. Рыжиков В. Д., Старжинский Н. Г., Катрунов К. А. и др. Люминесцентные свойства селенида цинка с изовалентными примесями // Наук. вісн. Інституту економіки та нових технологій ім. Ю. І. Кравченка. Нові технології.— 2004.— № 1—2.— С. 60—65.

34. Ryzhikov V., Starzhinskiy N., Katrunov K., Gal'chinetskii L. Absolute light yield of  $\text{ZnSe}(\text{Te})$  and  $\text{ZnSe}(\text{Te}, \text{O})$  scintillators // Functional Materials.— 2002.— Vol. 9, N 1.— P. 135—138.

35. Вакуленко О. В., Зеленский С. Е., Лысый В. С. и др. Нелинейная фотолюминесценция кристаллов  $\text{ZnSe}(\text{Te})$  // Журн. прикл. спектроскопии.— 1990.— Т. 52, № 2.— С. 231—234.

36. Ryzhikov V., Starzhinskiy N. Properties and peculiar features of application of isoelectronically doped  $\text{A}^{II}\text{B}^{VI}$  compound-based scintillators // J. Korean Asso. Radiat. Prot.— 2005.— Vol. 30, N 2.— P. 77—84.

37. Рыжиков В. Д., Старжинский Н. Г., Гринев Б. В. и др. Особенности применения и характеристики скінтіляторів для рентгеновської інтроскопії // Наук. вісн. Інституту економіки та нових технологій ім. Ю. І. Кравченка. Нові технології.— 2004.— № 1—2.— С. 5—7.

38. Гальчинецький Л. П., Дмитрієв Ю. Н., Ковтун Е. Д. и др. Особенности испарения кристаллов селенида цинка, легированных изовалентными примесями // Изв. АН СССР. Сер. неорганические материалы.— 1989.— Т. 25, № 10.— С. 1632—1636.

39. Вакуленко О. В., Кравченко В. Н., Рыжиков В. Д. и др. Влияние сверхстехиометрических компонентов на спектрально-кинетические характеристики люминесценции изовалентно легированных кристаллов  $\text{ZnSe}$  // ФТП.— 1997.— Т. 31, № 10.— С. 1211—1215.

40. Ибрагимова Э. М., Гафаров А. А., Машарипов К. Ю. и др. Кинетика фотолюминесценции  $\text{ZnSe}(\text{Te}, \text{O})$  скінтіляторів при импульсном лазерном возбуждении // Матер. Электрон. Техники.— 2001.— № 6.— С. 31—37.

41. Ryzhikov V., Starzhinskiy N., Seminozhenko V. et al. On luminescence kinetics of scintillators used in X-ray introscopy systems // Functional Materials.— 2004.— Vol. 11, N 1.— P. 61—65.

42. Рыжиков В. Д., Старжинский Н. Г., Козин Д. Н. и др. Выбор скінтілятора для интроскопических систем со сканирующими детекторами типа скінтілятор-фотодиод // Известия ВУЗов. Сер. материалы электронной техники.— 2000.— № 3.— С. 37—40.

43. Декл. пат. 44547A України. Детектувальна система для рентгеновської інтроскопії / В. Д. Рыжиков, М. Г. Старжинський, Л. П. Гальчинецький та ін.— 15.02.2002. Бюл. № 2.

44. Gavrylyuk V., Gal'chinetskii L., Katrunov K. et al. On the use of chaotic billiard geometry to improve the light output of a scintillator // Functional Materials.— 2003.— Vol. 10, N 4.— P. 744—746.

45. Ryzhikov V., Gal'chinetskii L., Katrunov K. et al. Composite detector for mixed radiations based on  $\text{CsI}(\text{Tl})$  and dispersions of small  $\text{ZnSe}(\text{Te})$  crystals // Nucl. Instruments & Meth. in Phys. Research.— 2005.— Vol. A540.— P. 395—402.

46. Рыжиков В., Старжинский Н., Катрунов К. та ін. Використання скінтіляторів на основі селеніду цинку в комбінованих детекторах для реєстрації змішаних потоків випромінювань // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія фізика.— 2005.— Вип. 17.— С. 43—46.

47. Ryzhikov V., Gal'chinetskii L., Starzhinskiy N. et al. Combined detectors of charged particles based on selenide scintillators and silicon photodiodes // ВАХТ. Сер. ядерно-физические исследования.— 2001.— № 5.— С. 174—176.

48. Focsha A. I., Gashin P. A., Ryzhikov V. D., Starzhinskiy N. G. Preparation and properties of an integrated system «photosensitive heterostructure-semiconductor scintillator» on the basis of compounds  $A^{II}B^{VI}$  // International Journal of Inorganic Materials.— 2001.— Vol. 3.— P. 1223—1225.

49. Focsha A. A., Gashin P. A., Ryzhikov V. D. et al. Properties of semiconductor scintillators and combined detectors of ionizing radiation based on  $ZnSe(Te,O)/pZnTe-nCdSe$  structures // Optical Materials.— 2002.— Vol. 19.— P. 213—217.

50. Avdeenko A. A., Gal'chinetskii L. P., Leo G. et al. Photoreceivers with Shottky barrier based on doped ZnSe crystals for UV radiation parameters metering devices // Functional Materials.— 2000.— Vol. 7, N 2.— P. 224—227.

51. Chugai O., Ryzhikov V., Starzhinskiy N. et al. Electrophysical properties of metal-semiconductor-metal structures based on isovalently doped zinc selenide crystals // Functional Materials.— 2004.— Vol. 11, N 4.— P. 684—687.

52. Ryzhikov V. D., Gal'chinetskii L. P., Starzhinskiy N. G. et al. A portable meter of the ultraviolet radiation in biologically active ranges of solar radiation based on the ZnSe semiconductor // Telecommunications and Radio Engineering.— 2001.— Vol. 55 (5), N 10—11.— P. 84—92.

## ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана  
ЦНИТИ «Техномаш»



**XV Международная научно-техническая конференция**  
**ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ**  
**(Материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники)**

**XXII Международный симпозиум**  
**ТОНКИЕ ПЛЕНКИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ**

Москва, 9—11 сентября 2009 г.

**УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ**

Екатерина Вадимовна Булыгина — Доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н. Э. Баумана  
Тел.: (916) 621-57-24  
Факс: (499) 267-17-39  
E-mail: k.bulygina@mail.ru

**АДРЕСА ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ:**

105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, МТ-11  
E-mail: panfilov@bmstu.ru  
Тел.: (916) 621-57-24  
Тел./факс: (499) 267-17-39

121108, Россия, г. Москва, ул. Ивана Франко, 4  
E-mail: samoylovich@technomash.ru  
Телю: (499) 146-10-95  
Тел./факс: (499) 146-19-42

**Основные направления:**

- ✦ Нанотехнология — инженерные проблемы и подготовка кадров
- ✦ Материалы, оборудование и технологии нанoeлектроники и микрофотоники
- ✦ Новые технологии производства, обработки и исследования наноструктурированных материалов
- ✦ Системы и устройства радиотехники и средств связи
- ✦ Наноструктурированные материалы на основе углерода и фотонные кристаллы в оптоэлектронике и оптическом приборостроении
- ✦ Технологии и оборудование для производства приборов электронной техники и радиоэлектронных устройств
- ✦ Микроэлектромеханические системы в медицине и промышленности
- ✦ Получение, свойства и применение тонких плёнок в электронике
- ✦ Слоистые структуры на основе тонких плёнок
- ✦ Методы контроля функциональных свойств материалов электронной техники, измерительная аппаратура и аналитические методы
- ✦ Моделирование и информационное обеспечение исследований

В. Н. РУДКОВСКИЙ, В. Н. ПИК

Украина, г. Киев, НПП «Сатурн»  
E-mail: chmil@jssaturn.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
23.04 2008 г.

Оппонент д. э. н. И. И. ГРУЗНОВ  
(ОНПУ, г. Одесса)

## ОТ АТТЕСТАЦИИ К МОТИВАЦИИ

*Приведены некоторые аспекты идентификации уровня необходимой компетенции и мотивации персонала при внедрении системы менеджмента качества на научно-производственных предприятиях.*

Продолжая тему, начатую в [1], остановимся на главном механизме, который продвигает и развивает систему менеджмента качества (СМК) на предприятии — его персонале.

Персонал — это научные работники, инженеры, служащие, рабочие или, как отражено в стандарте ISO 9001:2000, человеческие ресурсы. Согласно требованиям стандарта, персонал должен быть компетентным, исходя из необходимых для выполнения своих функций образования, подготовки, навыков и опыта. Это говорит о том, что руководство предприятий, ориентированных на долговременное функционирование, обязано регулярно идентифицировать уровень необходимой компетенции своих кадров (что на многих предприятиях делается от случая к случаю). «Люди делятся на реальных и нереальных. Реальные берутся за работу и делают ее, а нереальные ходят вокруг дела и долго объясняют, что им мешает добиться успеха. Они считают себя очень умными, образованными, вот только пользы от них мало» [2]. Поэтому необходима регулярная аттестация, которая позволит сделать выводы относительно:

- текущего и ожидаемого уровней квалификации;
- компетентности работников для решения поставленных задач;
- сотрудников, деморализующих и демотивирующих других сотрудников в ходе внедрения СМК, и откровенно саботирующих изменения [3].

Каждый год перед проведением аттестации персонала процесс кадровой оценки должен пересматриваться и совершенствоваться. Одним из примеров оценки служит подход в фирме «Customs & Tax Region Aarhus» (Дания), который может использоваться многими предприятиями. Предложены критерии оценки сотрудников, которые включают в себя следующие элементы:

- соответствие квалификации служащих требованиям, необходимым для выполняемой ими работы;

- способность сотрудника делиться с коллегами знаниями в процессе работы;
- потенциал и развитие служащих;
- адекватность восприятия сотрудником предназначения и стратегии его службы, целей и задач деятельности, а также расстановки приоритетов;
- план обучения служащего;
- обратная связь руководства предприятия с сотрудником в процессе работы;
- навыки и знания, которыми служащий обладает.

Руководители оценивают необходимую компетенцию для реализации стратегии и планов по всем направлениям деятельности. Уровень компетенции персонала измеряется с помощью модели «кусочек пирога» (рис. 1).

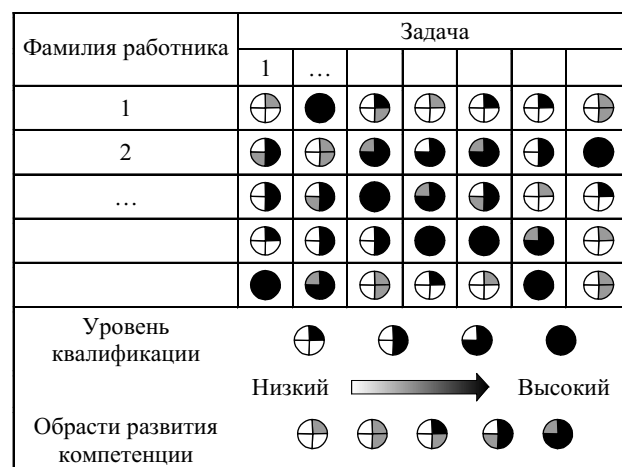


Рис. 1. Модель «кусочек пирога»

Уровни компетентности имеют цветовое кодирование — черное кольцо указывает на 100%-ную компетентность, секторы с серой штриховкой обозначают, что по данной компетенции проводится обучение. Задачи соответствуют процессам, осуществляемым службой в ходе деятельности.

Аттестация помогает только правильно расставить силы для решения поставленных задач при внедрении СМК. Но эти силы необходимо привести в движение в заданном направлении, ими нужно управлять, а персоналу нужна мотивация. Когда сотрудники знают, что руководство их ценит и готово вознаграждать за высокие достижения, они работают с большей отдачей, их энергичность, привязанность к пред-

приятно растут, повышается уверенность в себе, самоуважение, уровень квалификации. В результате появляются возможности для дальнейшего расширения масштабов деятельности предприятия, повышается эффективность и производительность труда, экономятся время и деньги [4]. Нельзя вовлечь в работу по повышению качества весь персонал без решения вопросов его мотивирования. Мотивация — многогранный, многоаспектный термин. В. А. Липидус определил его так: «Мотивация — это воздействие на работников компании с целью направить и интенсифицировать их действия в интересах организации» [5]. О системах мотивации опубликовано много материалов, но, в основном, за рубежом. Для отечественных руководителей проблемы мотивации персонала стали возникать не так давно (так же, как и проблемы конкурентоспособности и менеджмента качества). Воспользоваться опытом иностранных коллег в полной мере невозможно, т. к. организационные стратегии, в том числе и в отношении персонала, при изменении культурной среды могут потерять свою эффективность [6]. «Это происходит не только из-за различий в базовых ценностях работников, но также по причине различий в государственной политике и законодательстве, которые обычно четко отражают отличия в культурных позициях стран» [7]. В этом плане опыт, накопленный в СССР, когда люди работали с большим энтузиазмом, желанием, без принуждения и результативно, заслуживает не только одобрения, но и широкого изучения. Надо уметь пользоваться наработками предыдущих поколений. Система мотивации для каждого предприятия, для каждого сотрудника должна быть простой и понятной, а также индивидуальной. Западные ученые в результате исследования в странах Восточной Европы [8] выделили 18 факторов, способствующих позитивному отношению к работе:

- условия труда;
- качество менеджмента на предприятии;
- репутация на предприятии;
- качество работы на предприятии;
- интерес к работе;
- хорошая информированность о делах на предприятии;
- зарплата;
- возможность продвижения по службе;
- осмысленность и значимость работы;
- отношения с руководством;
- наличие достаточного количества информации для качественного выполнения работы;
- льготы (страховки, путевки);
- безопасность работы;
- ясность зон ответственности и должностных обязанностей;
- рабочий климат, отношения с коллегами;
- уровень личной ответственности;
- наличие достаточного количества времени для качественного выполнения работы;
- продолжительность рабочего дня.

Из анкетирования стало очевидным, что самыми важными факторами позитивного отношения к рабо-

те оказались условия труда, качество управления предприятием и репутация самого предприятия. Удовлетворенность качеством управления на предприятии оказалось самым сильным фактором роста производительности труда. Если сотрудники не уверены, что руководство стремится к выживанию и процветанию предприятия, если они не уверены в будущем предприятия, а значит и в своем собственном, это их сильно деморализует [9].

Для персонала, занятого научной деятельностью, система мотивации играет значительно большую роль, чем для других работников. Труд научных работников сложно нормировать, процесс контроля усложнен. Определяющее значение имеет потребность в знаниях, авторитете, творчестве, хотя известное выражение «не в деньгах счастье, а в их количестве» тоже актуально в условиях нашей неустановившейся экономики.

В. А. Ядов выделяет несколько групп ученых по типу мотивации [10]:

- энтузиасты, ученые классического типа;
- профессиональные и компетентные работники, которые трезво смотрят на жизнь и организацию науки, ее функции в обществе (они стремятся сочетать научное творчество с заслуженными материальными благами);
- честолюбивые, инициативные и достаточно прагматичные научные работники, которые озабочены достижением высокого положения в официальной структуре.

В процентном отношении научных работников второй и третьей групп намного больше, т. к. роль денег в нашем обществе значительно возросла. Когда заработная плата чрезмерно низка и незначительно превышает прожиточный минимум, деньги побуждают к действию и становятся одним из главных факторов мотивации. Поэтому научные работники, которые относятся к первой группе, требуют к себе особого внимания руководства предприятий. Если руководство стремится удержать таких работников, оно должно предоставить им, кроме материального обеспечения, ряд социальных льгот (беспроцентный кредит, пенсионное пособие, медицинское страхование и др.) и возможность использовать скользящий график работы, неполную рабочую неделю, возможность трудиться как на рабочем месте, так и дома. Работнику нужно предоставить максимально возможную степень самоконтроля, не забывая, конечно, и о системе оценки его труда.

\*\*\*

Грамотная мотивация и аттестация сотрудников возместят сторицей работу руководства предприятия, создадут благоприятную психологическую атмосферу, усилят развитие предприятия. Системы мотивации и аттестации не могут быть постоянными. Персонал быстро приспосабливается к ним, и они становятся неэффективными. Поэтому системы мотивации и аттестации должны совершенствоваться вместе с предприятием, с учетом специфики его деятельности и сложившейся субкультуры. Системы мотивации и аттестации должны быть логичны, справедливы и понятны персоналу — и тогда успех неизбежен.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Рудковский В. Н., Пик В. Н. Пять начальных шагов к внедрению стандарта серии ISO 9001 // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2007.— № 2.— С. 58—60.
2. Кивва Н. Евросетяне — победооголики и конкурентофилы // Деловое совершенство.— 2007.— № 7.— С. 46—51.
3. Рожкова Н. Ю. Организация и психологические аспекты внедрения СМК на приборостроительном заводе // Методы менеджмента качества.— 2008.— № 2.— С. 47—51.
4. Дженис Каллан. Лидерство: все зависит только от вас // Деловое совершенство.— 2007.— № 1.— С. 21—23.
5. Лапидус. В. А. Всеобщее качество (TQM) в российских компаниях / Гос. ун-т.; Национальный фонд подготовки кадров.— М. ОАО «Типография «Новости», 2000.

6. Скрипко Л., Требушук Н. Мотивация персонала в СМК российских компаний // Стандарты и качество.— 2008.— № 2.— С. 64—68.
7. Хофштеде Г. Мотивация, лидерство и организация: применимы ли американские теории в других странах ? // Вестник СПбГУ.— Сер. 8.— 2006.— Вып. 4.— С. 134—162.
8. Козлов А. Б., Ромашов В. В. Разработка и внедрение системы менеджмента качества. Учебное пособие.— К.: Сталь, 2003.
9. Козлов А. Б., Ромашов В. В. Интегрированная система менеджмента. Учебное пособие в таблицах и схемах.— К.: Изд-во Европейского ун-та.— 2005.
10. Козлов А. Б., Ромашов В. В. Социальные проблемы и факторы интенсификации научной деятельности // Сб. научных трудов под ред. В. А. Ядова, Д. Д. Райковой.— М.: Наука, 1992.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



**Старосельский В. И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники.— М.: Высшее образование; Юрайт-Издат, 2009.— 463 с.**

Рассмотрены базовые полупроводниковые приборы современной микроэлектроники и физические процессы, обеспечивающие их работу.

Анализируются статические, частотные и импульсные характеристики приборов, рассматриваются методы схемотехнического моделирования приборов и приводятся их эквивалентные схемы. Рассмотрены предельные параметры современных приборов микроэлектроники. Для каждого прибора делается краткий обзор современных методов их структурной реализации в интегральных схемах. Для студентов, а также научных работников, инженеров и аспирантов, стремящихся получить необходимые профессиональные знания.



ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

20-я Международная конференция  
«ЛАЗЕРЫ В НАУКЕ, ТЕХНИКЕ, МЕДИЦИНЕ»

21–25 сентября 2009 г.,

Конференция состоится в Туристическом центре «Черноморец»  
(г. Сочи, Адлерский р-н, пос. Весёлое)

**Контактные координаты:**

МНТОРЭС им. А. С. Попова,  
конференция «Лазеры-2009»,  
Россия, Москва, К-31, 107031, ул. Рождественка,  
6/9/20, стр. 1  
Тел.: (7-495) 624-09-19, 621-16-16  
Факс: (7-495) 624-62-14  
E-mail: mntores@mail.ru

**Основные направления:**

- ✦ Лазеры в системах локации, навигации, связи и дистанционного зондирования
- ✦ Лазеры в технологических процессах
- ✦ Биометрические применения лазеров
- ✦ Лазерные методы исследований
- ✦ Функциональные материалы для лазерной техники
- ✦ Оптико-электронные приборы

## АННОТАЦІЇ К СТАТТЯМ НОМЕРА

Непаяні контактні з'єднання в електронних друкованих вузлах. Єфіменко А. А., Собченко Д. Л.

Розглянуто варіанти конструкторської реалізації контактних електричних з'єднань виводів електронних компонентів в електронних друкованих вузлах без використання процесу паяння: контактні з'єднання, що виконані методом «press-fit»; контактні з'єднання, утворенні за рахунок прижимання; контактні з'єднання, утворені за рахунок нарощування металу на виводи електронних компонентів. Проведено аналіз переваг та недоліків цих методів, а також розглянуто деякі питання їх використання.

Моделювання електричних характеристик та розрахунок конструктивних параметрів кремнієвого стабілітрона з напругою стабілізації 6,5 В. Дудар Н. Л., Сякерський В. С., Коритко М. М.

Приведено результати оптимізаційного моделювання оригінального техпроцесу виготовлення та електричних характеристик стабілітронів з напругою стабілізації  $U_{ст} = 6,5 \pm 0,5$  В. Маршрут виготовлення стабілітрона включає формування областей охоронних кілець  $n^+$ -типу в підкладці  $p$ -типу; формування  $p$ - $n$ -переходу в підкладці  $p$ -типу; формування міжшарового оксиду; напilenня металу. В результаті розрахунків електричних характеристик були одержані значення напруги стабілізації і диференціального опору зворотньої гілки ВАХ стабілітрона нормальної, зниженої і підвищеної температури.

До питання про мінімізацію числа міжшарових переходів при трасуванні плат. Лузін С. Ю., Петросян Р. С., Полубасов О. Б.

Розглянуто підходи до проблеми мінімізації числа міжшарових переходів на друкованій платі. Запропоновано способи скорочення числа міжшарових переходів за рахунок підключення до переходу, який з'єднано з контактом або точкою галуження провідників. Традиційні методи, що скорочують число переходів на провідниках за рахунок зміни шару їх сегментів, цю можливість не враховують.

Помножувач/дільник з підвищеною швидкістю. Синегуб М. І.

Розглянуто питання розробки оригінальної структури помножувача/дільника, в якому на першому ступені апаратно суміщаються операції множення і віднімання цілих чисел в доповняльному коді, що дозволяє підвищити швидкість пристрою. Крім того, в запропонованому пристрої множення/ділення відсутні операції пересилки чисел, що також підвищує швидкість даного пристрою.

Non-soldering contact connections for electronic printed circuit boards. Yefimenko A. A., Sobchenko D. L.

The variants of designer realization of contact electric connections of electronic component's pins in electronic printed circuit boards without soldering are considered. They are the contact connections executed by the method of «press-fit»; the contact connections, formed by press; the contact connections formed due to increasing of metal on the pins of electronic components. The analysis of advantages and deficiencies of these methods, and also some questions of their employment are considered.

The electric characteristics simulation and structural parameters calculation of Si-based stabilatron with stabilizing voltage 6,5 V. Dudar N. L., Syakerskiy V. S., Koritko N. N.

The results of an optimization simulation of original manufacturing process and electric characteristics of stabilitrons with stabilizing voltage  $U_{st} = (6,5 \pm 0,5)$  V are presented. The flow of manufacturing process of simulated stabilatron includes the  $n^+$ -type guard rings regions formation in the  $p$ -type substrate; the  $p$ - $n$ -junction formation in the  $p$ -type substrate; intermediate oxide formation; metal deposition. The stabilizing voltage and differential resistance of the stabilatron voltage-current characteristic reverse branch values were received as the result of calculations at the normal, reduced and high temperature.

On minimizing the number of vias while routing printed circuit boards. Luzin S. Yu., Petrosjan G. S., Polubasov O. B.

The approaches to minimization the number of vias on the printed circuit board were examined in this article. A method of reducing the number of vias through connecting wires not to the contact, but to the via, attached to a contact or a junction. Traditional methods of reducing the number of vias do not take this option into consideration, but make reduction by changing the layer of segments.

Multiplier/divisor with rapid action. Sinegub N. I.

The problem of working out the original multiplier's/divisor's structure being combined apparatuses on first degree operations of multiplication and subtraction of integers in additional code permitting to raise rapid action of the device has been considered. Moreover operations of sending integers are absent in offered device raising rapid action of given device as well.

Кремній мультипористої текстури для фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії. Єрохов В. Ю., Дружинін А. О.

Показано можливість створення кремнію мультипористої текстури як матеріалу структури фотоелектричних перетворювачів (ФЕП). Розглянуто морфологічні елементи пористого кремнію щодо різних параметрів пори. Показано, що при використанні колоноподібного мультипористого кремнію, який виростили хімічним і електрохімічним методами, інтегральний коефіцієнт відбивання фронтальної поверхні ФЕП зменшується.

Датчик кута повороту генераторного типу з елементом на поверхневих акустичних хвилях. Лепіх Я. І.

Представлено результати розробки інтелектуалізованого датчика кута повороту з елементом на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ). Описано структурну схему сенсора генераторного типу, в якому елемент на ПАХ грає роль відповідної лінії затримки. Представлено основні характеристики датчика, показано область його застосування.

Арсенід-галлієві  $p^+-n-p^+$ -структури з базовою областю, що збіднюється. Каримов А. В., Йодгорова Д. М., Абдулхаєв О. А.

У роботі експериментально показано, що механізм токопереносу через  $p^+GaAs-nGaAs-p^+GaAs$ -структуру визначається інжекційно-тунельним і генераційно-рекомбінаційним механізмами. При модуляції частини бази, що містить дефекти, превалує інжекційно-тунельний струм, а при модуляції частини бази з меншою дефектністю визначальними є генераційно-рекомбінаційні струми. Такі структури представляють інтерес для створення на їх основі обмежувачів напруги і електронних перемикачів.

Рідкокристалічні монітори для авіаційної техніки. Коваленко Л. Ф., Жураківський І. Ю., Стасьєвський В. В., Севастьянов В. В.

Розглянуто умови експлуатації РК-моніторів в складі авіаційних бортових приладів. Сформульовано вимоги до конструкторської побудови РК-монітора для роботи в жорстких умовах. Проаналізовано можливі варіанти реалізації підсвітки РК-матриці для забезпечення необхідної яскравості в залежності від зовнішнього освітлення екрану монітора.

Формування МОН-транзисторів з ізоляцією активних елементів окисленням пористим кремнієм. Новосядлий С. П., Вівчарук В. М.

Надтонкі функціональні шари МОН-транзисторів вимагають якісної ізоляції активних елементів. Запропоновано новий метод формування епітаксійних структур для технології «кремній-на-ізоляторі» на основі пористого кремнію. Це дозволить формувати три види транзисторів — біполярні, КМОН, ДМОН.

Porous silicon multitexture for photoelectric converter structures of solar energy. Yerokhov V. Yu., Druzhinin A. O.

The possibility of creation of porous silicon's multitexture, as material of structure of photoelectric converter (FEC) is shown. The morphological elements of porous silicon are considered relative to different pore parameters. The integral coefficient of frontal surface reflection of FEC with using of columnar multitexture in the range from 400 nm up to 1150 nm decreased.

The turn angle gauge of generating type with an element on surface acoustic waves. Lepikh Ya. I.

The results of intellectualized angle of rotation sensor with an element on the surface acoustic waves (SAW) development are presented. The generating type sensor block diagram, in which the element on SAW plays a role of the appropriate line of a delay is described. The sensor basic characteristics are given and the area of its application are shown.

Gallium arsenide  $p^+-n-p^+$ -structures with impoverished base area. Karimov A. V., Yodgorova D. M., Abdulkhaev O. A.

It is displayed experimentally, that the current transport's mechanism through  $p^+GaAs-nGaAs-p^+GaAs$ -structure is formed by injection-tunnel and generation-recombination mechanisms. Injection-tunnel current prevails at modulation of base's part which contains defects, and generation-recombination currents are determinative at modulation of base's part with lesser defectiveness.  $p^+GaAs-nGaAs-p^+GaAs$ -structures are of interest for creating voltage suppressors and electronic switches on their base.

Liquid crystal displays for aircraft engineering. Kovalenko L. F., Zhurakovskiy I. Y., Stashevskiy V. V., Sevastyanov V. V.

Operating conditions for liquid-crystal displays of aircraft instruments have been examined. Requirements to engineering of a liquid-crystal display for operation in severe environment have been formulated. The implementation options for liquid-crystal matrix illumination have been analyzed in order to ensure the sufficient brightness depending on external illumination of a display screen.

Formation of MOS-transistors with isolation of active elements by oxiden porous silicon. Novosyadlyi S. P., Vivcharuk V. M.

The superthin functional layers of MOS-transistors require qualitative isolation of active elements. The new method of formation of epitaxial structures for technology «silicon - on-isolator» is offered on the basis of porous silicon. It will allow to form three kinds of transistors — bipolar, SMOS, DMOS.

Прилад і методи вимірювання параметрів і ступеню однорідності плівкових структур. Макара В. А., Одарич В. А., Кепич Т. Ю., Преображенська Т. Д., Руденко О. В.

У роботі проведено конструкторсько-технологічний аналіз схеми вимірювання еліпсометричних параметрів, розрахунку показника заломлення і товщини плівки, розроблено блок-схему і створено макет приладу для контролю однорідності плівкових структур в процесі їх виготовлення. Розроблено пакет автоматизованих програм обчислення показника заломлення і товщини плівок по зміряних еліпсометричних параметрах, які засновані на ітераційному методі вирішення рівняння еліпсометрії. Проведено апробацію приладу на прикладі визначення показника заломлення і товщини плівок CdTe і плівок  $\text{HfO}_2$ , яка показала можливість контролю однорідності плівок як за площею, так і по товщині.

Прогнозування параметрів склокераміки із склокристалічною матрицею для різних співвідношень компонентів і режимів спікання. Дмитрієв М. В., Єрмічой І. М., Панов Л. І.

Представлено способи прогнозування діелектричної проникності склокераміки і її компонентів та їх часток для різних співвідношень скла, наповнювача і кристалічної фази при різній температурі і тривалості спікання.

Розробка сцинтиляторів на основі сполук  $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$  для медичного і технічного радіаційного приладобудування. Старжинський М. Г., Зеня І. М., Катрунов К. А., Рижиков В. Д.

Розглянуто фізико-технологічні проблеми отримання і основні властивості сцинтиляційних матеріалів на основі селеніду цинку і інших сполук  $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ . Визначено вплив властивостей легуючих домішок на процеси формування комплексних дефектів ґрат, які виступають в ролі центрів світіння. Показано, що такі особливості властивостей як високий світловихід і дуже низький рівень післясвітіння, а також унікальне поєднання сцинтиляційних і напівпровідникових властивостей дозволяють використовувати їх в різних областях радіаційного приладобудування.

Від атестації до мотивації. Рудковський В. М., Пік В. М.

Приведено деякі аспекти ідентифікації рівня необхідної компетенції і мотивації персоналу при впровадженні системи менеджменту якості на науково-виробничих підприємствах.

Apparatus and methods for measuring of the film structures homogeneity degree. Makara V. A., Odarych V. A., Kepich T. Y., Preobragenskaya T. D., Rudenko O. V.

The designer-technological analysis of ellipsometric parameters measuring and calculation of the film refraction index and thickness scheme is conducted in this article. The flow-chart is developed and the model of apparatus for the film refraction index and thickness measuring and control of the film structures technology making is created. Package of automated programs of the film refraction index and thickness calculating on the measured ellipsometric parameters, based on the iteration method of decision of ellipsometry equation was developed. The approbation of device, which showed the checking feature of films homogeneity both on an area and on a thickness on the example of determination of CdTe and  $\text{HfO}_2$  films refraction index and thickness is conducted.

Forecasting of the parameters of glass-ceramics with glass-crystalline matrix for different proportions of components and sintering regimes. Dmitriyev M. V., Yermichoy I. N., Panov L. I.

This article deals with methods of forecasting of dielectric permittivity of glass-ceramics and its components as well as their parts for different proportions of glass, the filler and crystalline phase at different temperature and duration of sintering.

Development of scintillators on the basis of  $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$  compounds for radiation instruments used in medical and technical applications. Starzhinskiy N. G., Zhenya I. M., Katrunov K. A., Ryzhikov V. D.

Physico-technological problems of preparation and main properties of scintillation materials based on zinc selenide and other  $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$  compounds are considered. Effects have been determined of dopant properties on formation processes of complex lattice defects playing the role of luminescence centers. It is shown that such property features as high light output and very low afterglow level, as well as a unique combination of scintillation and semiconductor properties allow application of these materials in different fields of radiation instrument technologies.

From appraisal to motivation. Rudkovsky V. N., Pik V. N.

Some aspects related to identifying the level of the necessary personnel competence and motivation on introducing the quality management system in research and production enterprises are quoted.

ЭЛЕКТРОНИКА

КОМПОНЕНТЫ • ОБОРУДОВАНИЕ • ТЕХНОЛОГИИ

# ChipEXPO - 2009

ОКТАБРЬ 21-23

7-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА  
РОССИЯ • МОСКВА • ЭКСПОЦЕНТР

## КОНФЕРЕНЦИИ:

- Контрактное производство электроники
- Технологии печатных плат и монтажа компонентов (совместно с IPC)
- Дистрибуция электронных компонентов в России

## ТЕМАТИЧЕСКАЯ ЭКСПОЗИЦИЯ:

- Производство электроники в России

ИНФОРМАЦИОННАЯ  
ПОДДЕРЖКА



eFind.ru

КОМПОНЕНТЫ  
И ТЕХНОЛОГИИ



ЭЛЕКТРОНИКА

ПРОИЗВОДСТВО  
ЭЛЕКТРОНИКИ

[www.chipexpo.ru](http://www.chipexpo.ru)

ТОВ «ЕКСПОСЕРВІС» запрошує прийняти участь у  
**12-й СПЕЦІАЛІЗОВАНІЙ ВИСТАВЦІ**



**КОНТРОЛЬНО-  
ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ**



**ЕЛЕКТРОНІКА  
ІНФОРМАТИКА ЗВ'ЯЗОК**



**ЕНЕРГЕТИКА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА  
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

**27-29 ЖОВТНЯ 2009 РОКУ**

**ХАРКІВ**



**Організатор  
ТОВ «ЕкспоСервіс»**

Тел./факс:

(057) 758 70 30

758 72 30

758 70 29

E-mail:

expo@kharkov.ukrtel.net



ПВЦ «Радмир Эксполл»

[www.expos.com.ua](http://www.expos.com.ua)

*Номер готували  
Винница, Ивано-Франковск, Киев,  
Львов, Минск, Одесса, С.-Петербург,  
Ташкент, Харьков.*



Пишите  
Подписывайтесь  
Читайте