

# ТРА

**ТЕХНОЛОГИЯ И  
КОНСТРУИРОВАНИЕ В  
ЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЕ**



К статье «Фрезеровально-гравировальные плоттеры  
для изготовления печатных плат»

**1(55) 2005**

**ЯНВАРЬ — ФЕВРАЛЬ**



6-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

## «СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

23–27 мая 2005 года Украина, г. Одесса

### ПРОБЛЕМАТИКА

- ♦ Состояние и перспективы обеспечения отраслей народного хозяйства электронными средствами.
- ♦ Современное состояние и проблемы экологического мониторинга окружающей среды.
- ♦ Передача и обработка сигналов. Аппаратные средства.
- ♦ Информационные технологии. Защита информации.
- ♦ Компьютерные технологии в приборостроении и машиностроении. Моделирование. Системы автоматизированного проектирования.

### КОНФЕРЕНЦИИ

- ♦ Проектирование и конструирование электронных средств. Надежность. Обеспечение тепловых режимов.
- ♦ Функциональная микро- и нанoeлектроника. Специальные материалы. Опто- и акустоэлектроника. Негатроника.
- ♦ Контроль качества. Техническая диагностика. Анализ отказов.
- ♦ Измерители-преобразователи. Датчики.
- ♦ Разработка технологических процессов. Производство электронных компонентов, узлов, аппаратов.

С текущей информацией по конференции  
можно знакомиться на сайте  
<http://tkea.wallst.ru/konfer.html>

Реквизиты для связи  
E-mail <tkea@odessa.net>  
тел./факс +38 (048) 728-49-46,  
тел. +38 (048) 728-18-50.  
Секретарь Оргкомитета "СИЭТ-2005"  
Тихонова Елена Анатольевна

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



### ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

#### По Украине.

Отделения связи. «Каталог изданий Украины». Индекс 23785.  
Подписное агентство «Идея», [www.idea.com.ua](http://www.idea.com.ua). Индекс 11146.  
Тел./факс +38 (062)381-09-32.  
Подписное агентство «KSS», [www.kss.kiev.ua](http://www.kss.kiev.ua). Индекс 20363.  
Тел. +38 (044)464-02-20.  
Подписное агентство «ПрессЦентр». E-mail: [info@prescentr.kiev.ua](mailto:info@prescentr.kiev.ua).  
Тел./факс +38 (044) 536-11-75, 536-11-80.

#### По России.

Отделения связи. Каталог «Пресса России». Индекс 71141.  
Представительство журнала «ТКЭА» в России:  
192286 С.-Петербург, п/о 286, п/я 416; «ЭРА».  
E-mail: [era48@mail.ru](mailto:era48@mail.ru), тел. +7 (812)595-40-89.

#### Через редакцию «ТКЭА».

Адрес редакции: Украина, 65005, г. Одесса, ул. Прохоровская, 45.  
E-mail: [tkea@odessa.net](mailto:tkea@odessa.net), web-сайт: [tkea.wallst.ru](http://tkea.wallst.ru),  
тел. +38 (048)728-18-50, 728-11-89,  
тел./факс 728-49-46.

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко, Е. Н. Курдюкова,  
А. М. Лейдерман, А. Н. Онищенко, М. С. Хлопова.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.  
Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корсукая.

В 2004 году журнал поддерживали:  
Министерство промышленной  
политики Украины,  
Академия связи Украины,  
НПП «Сатурн»,  
ОАО «Украналит»,  
Компания «Сатурн Дейта  
Интернешенл» (г. Киев),  
НПП «Карат» (г. Львов),  
Одесский национальный  
политехнический университет,  
Одесская национальная академия  
связи им. А. С. Попова,  
СКБ «Молния»,  
НИИ телевизионной техники,  
НИТИ «Темп» (г. Одесса),  
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

Подписано к печати 14.02 2005 г. Формат 60×84 1/8.  
Печать офсетная. Печ. л. 8,0. Уч.-изд. л. 9,9. Тираж 700 экз. Заказ № 5.  
Издательство «Нептун-Технология»  
(65028, г. Одесса, ул. Б. Хмельницкого, 59).  
Отпечатано в типографии издательства «ТЭС»  
(65012, г. Одесса, ул. Канатная, 81/2).

ТЕХНОЛОГИЯ  
И  
КОНСТРУИРОВАНИЕ  
В  
ЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЕ

2005 № 1 (55)

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

Год издания 29-й

Год регистрации 1992

Регистрационный номер  
КВ 2092 от 07.06.96 г.

Зарегистрирован в ВАК по разделам  
“Физико-математические науки”,  
“Технические науки”

Реферируется в Украинском РЖ “Джерело”  
(г. Киев)  
и в Реферативном журнале ВИНТИ  
(г. Москва)

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР  
К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

К.т.н. Н. М. Вакив  
Д.т.н. П. П. Воробиевко  
Д.т.н. В. Н. Годованюк  
К.т.н. А. А. Даиковский  
Д.т.н. Л. С. Лутченко  
Д.т.н. В. П. Малахов  
Д.т.н. В. Ф. Мачулин  
В. А. Мингалёв  
Е. А. Тихонова

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. А. А. Ащеулов  
К.т.н. Э. Н. Глушеченко  
Д.т.н. В. Т. Дейнега  
Д.т.н. Ю. А. Долгов  
Д.ф.-м.н. В. А. Дроздов  
К.т.н. И. Н. Еримичой,  
зам. гл. редактора  
К.т.н. А. А. Ефименко  
Д.ф.-м.н. Ф. Д. Касимов  
К.ф.-м.н. В. В. Ковальчук  
Д.ф.-м.н. Г. П. Ковтун  
Л. М. Лейдерман,  
отв. секретарь редакции  
Д.т.н. С. Ю. Лузин  
К.т.н. О. Н. Негоденко  
К.т.н. Ю. Е. Николаенко  
Д.ф.-м.н. В. В. Новиков  
К.т.н. В. И. Попов  
К.т.н. В. В. Рюхтин  
Д.ф.-м.н. О. И. Шпотюк

УЧРЕДИТЕЛИ

Институт физики полупроводников  
им. В. Е. Лашкарёва,  
Научно-производственное  
предприятие «Сатурн»,  
Одесский национальный  
политехнический университет,  
Редакция журнала «ТКЭА»

Техническая политика

Перспективы развития тонкопленочных микросборок. В. Г. Спириу 3

СВЧ-техника

Автодинные ЧМ-локаторы КВЧ-диапазона с непрерывным излучением. С. М. Смольский, С. Д. Воторопин, Н. Н. Савков, А. А. Плещеев, А. А. Трофилеев, П. С. Остапенков, А. М. Федотов 7

Экспериментально-расчетная методика определения комплексных проницаемостей ферромагнитных композитов. Б. А. Демьянчук 14

Системы передачи и обработки сигнала

Радиодальномер на основе J-корреляционного метода обработки сигнала. А. Г. Сорочан 18

Биомедицинская электроника

Термоэлектрическое устройство для термореконструктивной терапии. Л. Я. Кушнерик, Б. Н. Демчук, А. И. Середюк 22

Сенсоэлектроника. Датчики

Датчик для измерения криогенных температур на основе нитевидных кристаллов Si-Ge. А. А. Дружинин, И. П. Островский, С. М. Матвиенко, Ю. Р. Когут 26

Исследование возможности создания газоанализатора с транзисторным чувствительным элементом. М. Н. Муришудли, А. М. Алиева, М. И. Мусаев 28

Функциональная микро- и наноэлектроника

3D слоистые структуры в качестве основы ненакалываемых катодов и активных элементов фотодиодов. А. Ф. Белянин, М. И. Самойлович, В. Д. Житковский 31

Оптический аттенюатор. И. В. Докторович, И. М. Фодчук, В. К. Бутенко, В. Н. Годованюк, В. Г. Юрьев 36

Исследование фотоэлектрических свойств симметричной гетероструктуры “окисел-InSe-окисел”. З. Д. Ковальчук, В. Н. Катеринчук, О. Н. Сидор 38

Исследование пленок поликристаллического кремния для применения в фильтровых спектральных приборах. Н. Г. Джавадов 40

Обеспечение тепловых режимов

Система водяного охлаждения мощного процессора ПЭВМ. В. Ю. Кравец, В. И. Коньшин, Г. А. Пархоменко 42

Эффективная система охлаждения квантоскопов. Г. К. Лавренченко, М. Г. Хмельнюк, В. П. Савичев 45

Технологические процессы и оборудование

Конструкторско-технологические варианты коммутационных плат с подложкой из кремния. В. Г. Спириу 48

Фрезерально-гравировальные плоттеры для изготовления печатных плат. Е. М. Кудрявцев 51

Материалы электроники

Получение и свойства пористого карбида кремния. Л. А. Светличная, Н. Н. Московченко, П. В. Серба 53

Перспективные материалы для низкоомных толстопленочных резистивных элементов. А. Н. Смирнов, Н. С. Пучкова, Р. Г. Сидорец, В. Д. Лемза 58

Условия использования стеклообразных халькогенидных сплавов в дозиметрии высокоэнергетических  $\gamma$ -квантов. Н. М. Вакив, Р. Я. Головачак, А. П. Ковальский, О. И. Шпотюк 60

Библиография

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2004 г. 62

Новые книги 6, 52, 59

В портфеле редакции 64

Выставки. Конференции 13, 30, 2-я и 4-я стр. обложки

2005 № 1 (55)

ТЕХНОЛОГІЯ  
ТА  
КОНСТРУЮВАННЯ  
В  
ЕЛЕКТРОННІЙ  
АПАРАТУРІ  
(російською мовою)

## ЗМІСТ

### Технічна політика

Перспективи розвитку тонкоплівкових мікробірок. *В. Г. Спірін* (3)

### НВЧ-техніка

Автодинні ЧМ-локатори НВЧ-діапазону з безперервним випромінюванням. *С. М. Смольський, С. Д. Воторопін, М. М. Савков, О. О. Плещев, О. О. Трофілев, П. С. Остапенков, А. М. Федотов* (7)

Експериментально-розрахункова методика визначення комплексних проникностей ферромагнітних композитів. *Б. О. Дем'янчук* (14)

### Системи передачі та обробки сигналу

Радіодалекомір на основі *J*-кореляційного методу обробки сигналу. *А. Г. Сорочан* (18)

### Біомедицинська електроніка

Термоелектричний пристрій для терморексотерапії. *Л. Я. Кушнерик, Б. М. Демчук, О. І. Середюк* (22)

### Сенсоелектроніка. Датчики

Датчик для вимірювання криогенних температур на основі ниткоподібних кристалів Si-Ge. *А. О. Дружинін, І. П. Островський, С. М. Матвієнко, Ю. Р. Когут* (26)

Дослідження можливостей створення газоаналізатора з транзисторним чутливим елементом. *М. Н. Муриудлі, А. М. Алієва, М. І. Мусаєв* (28)

### Функціональна мікро- та наноелектроніка

3D шаруваті структури як основа нерозжарюваних катодів та активних елементів фотодіодів. *А. Ф. Белянін, М. І. Самойлович, В. Д. Житковський* (31)

Оптичний атенуатор. *І. В. Докторович, І. М. Фодчук, В. К. Бутенко, В. М. Годованюк, В. Г. Юр'єв* (36)

Дослідження фотоелектричних властивостей симетричної гетероструктури "окисень-InSe-окисень". *З. Д. Ковалюк, В. М. Катеринчук, О. М. Сидор* (38)

Дослідження плівок полікристалічного кремнію для застосування у фільтрових спектральних приладах. *Н. Г. Джавадов* (40)

### Забезпечення теплових режимів

Система водяного охолодження потужного процесора ПЕОМ. *В. Ю. Кравець, В. І. Коньшин, Г. О. Пархоменко* (42)

Ефективна система охолодження квантоскопів. *Г. К. Лавренченко, М. Г. Хмельнюк, В. П. Савічев* (45)

### Технологічні процеси та обладнання

Конструкторсько-технологічні варіанти комутаційних плат з підкладкою із кремнію. *В. Г. Спірін* (48)

Фрезерувально-гравіювальні плотери для виготовлення друкованих плат. *Є. М. Кудрявцев* (51)

### Матеріали електроніки

Здобування та властивості пористого карбиду кремнія. *Л. О. Светлична, М. М. Московченко, П. В. Серба* (53)

Перспективні матеріали для низькоомних товстоплівкових резистивних елементів. *А. М. Смирнов, Н. С. Пучкова, Р. Г. Сидорець, В. Д. Лемза* (58)

Умови використання склоподібних халькогенідних сплавів у дозиметрії високоенергетичних  $\gamma$ -квантів. *М. М. Ваків, Р. Я. Головачак, А. П. Ковальський, О. І. Шпотюк* (60)

### Бібліографія

Перелік статей, що опубліковані в журналі у 2004 році (62)

## CONTENT

### Technical polytic

Perspectives of thin-film micromodule development. *Spirin V. G.* (3)

### Microwave engineering

Autodyne FMCW radars of millimeter range with continuous radiation. *Smolskiy S. M., Votoropin S. D., Savkov N. N., Pleshcheev A. A., Trofileev A. A., Ostapenkov P. S., Fedotov A. M.* (7)

Experimental-settlement technique of definition complex permeability of ferromagnetic composites. *Dem'yanchuk B. A.* (14)

### Systems of transfer and processing of a signal

The radio range finder on base of the *J*-correlation method of a signal processing. *Sorochan A. G.* (18)

### Biomedical electronics

Thermoelectric device for thermoreflex therapy. *Kushneryk L. Ya., Demchuk B. M., Serebyuk A. I.* (22)

### Sensoelectronics. Sensors

Sensor based on Si-Ge whiskers for cryogenic temperatures measurement. *Druzhinin A. A., Ostrovskii I. P., Matvijenko S. M., Kogut Yu. R.* (26)

Research of the opportunity of creation of the gas analyzer with the transistor sensitive element. *Murshudli M. M., Alieva A. M., Musaev M. I.* (28)

### Functional micro- and nanoelectronics

3D-layer structures as cold cathode support and photodiode active elements. *Belyanin A. F., Samoylovich M. I., Jitkovsky V. D.* (31)

The optical attenuator. *Doctorovych I. V., Fodchuk I. M., Butenko V. K., Hodovaniouk V. M., Yuryev V. H.* (36)

Investigations of the photoelectrical properties of symmetrical oxide-InSe-oxide heterojunctions. *Kovalyuk Z. D., Katerynychuk V. M., Sydor O. N.* (38)

Research of films polycrystalline Si for use in filters spectral devices. *Javadov N. G.* (40)

### Ensuring of thermal modes

System of water cooling for modern computer's central processing units. *Kravets V. Yu., Kon'shin V. I., Parkhomenko G. A.* (42)

Effective system of cooling of the electron-beam scanner. *Lavrenchenko G. K., Khmelnyuk M. G., Savichev V. P.* (45)

### Technological processes and development

Structural/technological alternatives of switching cards on a silicon substrate. *Spirin V. G.* (48)

Milling-engraving plotter for manufacturing printed-circuit-boards. *Kudryavtsev E. V.* (51)

### Materials of electronics

Reception and properties porous silicon carbid. *Svetlichnaya L. A., Moskovchenko N. N., Serba P. V.* (53)

Perspective materials for low-resistivity thick-film of resistivity elements. *Smirnov A. N., Puchkova N. S., Sidorets R. G., Lemza V. D.* (58)

Operating conditions for vitreous chalcogenide alloys in high-energy gamma-quanta dosimetry. *Vakiv N. M., Golovchak R. Ya., Kovalsky A. P., Shpotyuk O. I.* (60)

### Bibliography

The articles list that have been published in journal during 2004 (62)

К. т. н. В. Г. СПИРИН

Россия, г. Арзамас, НПП "Темп-Авиа"  
E-mail: temp@arzamas.nnov.ru

Дата поступления в редакцию  
16.06 2004 г.

Оппонент С. Н. БАТИЩЕВ  
("Оризон-Навигация", г. Смела)

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МИКРОСБОРОК

*Рассмотрены некоторые конструктивно-технологические варианты микросборок и перспективы повышения их интеграции, а также особенности применения резистивных материалов в производстве тонкопленочных микросборок.*

Одно из основных противоречий современной микроэлектроники — различие плотности проводников современных сверхбольших интегральных схем (СБИС) (2500 линий/мм) и коммутационных плат (5 линий/мм), что обусловлено технологиями их изготовления. Данное противоречие снижает такие важнейшие параметры микроэлектронной аппаратуры как плотность упаковки, быстродействие, себестоимость.

Отставая от США и Японии по уровню развития субмикронных технологий, в СССР в 1970—1980 гг. интенсивно разрабатывалась технология больших гибридных интегральных схем (БГИС) [1, 2]. В результате эти микроэлектронные устройства функционально превосходили американские и японские СБИС. В конце 1980-х годов стали появляться сообщения об интенсивном развитии во многих странах, прежде всего в США, технологии многокристальных модулей (МКМ) [3, 4], которая по своей сущности основывалась на технологии БГИС.

В настоящее время для изготовления МКМ используются конструкции четырех типов плат [5]:

- МКМ-L — с подложкой из стеклотекстолита;
- МКМ-C — с подложкой из технической керамики (толстопленочные БГИС);
- МКМ-D — тонкопленочные структуры (например, на подложках из ситалла и поликора);
- МКМ-Si — тонкопленочные структуры с подложкой из кремния.

Технология МКМ за рубежом последние десять лет развивалась в очень ускоренном темпе. Если в 1988 г. меньше десятка фирм США занимались разработкой и производством МКМ, то в 1991 г. их количество достигло сотни. Основными потребителями МКМ являются фирмы, создающие компьютеры. Технология МКМ L-типа доминирует в производстве модулей благодаря наличию сравнительно недорогих материалов для их подложек, отработанных процессов и оборудования для монтажа кристаллов. Однако по прогнозам рынок сбыта МКМ будет развиваться в сторону расширения производства модулей D- и Si-типов [5]. Поэтому анализ состояния и перспектив развития тонкопленочных микросборок (МСБ) представляет интерес.

В задачу настоящей работы входит рассмотрение конструктивно-технологических вариантов МСБ, основных российских промышленностей, и перспективы повышения их интеграции. Основные технико-экономические параметры МСБ приведены в табл. 1.

В настоящее время в России получили развитие печатные платы на стеклотекстолите для поверхностного монтажа компонентов. Однако их технические параметры, прежде всего плотность проводников (5 линий/мм), размер контактной площадки переходного отверстия ( $\varnothing 0,7$  мм), а также минимальное расстояние между отверстиями (как правило, не менее толщины платы) препятствуют увеличению интеграции МСБ. Кроме того, низкая теплопроводность стеклотекстолита не позволяет увеличить плотность компоновки и применять данный материал для установок компонентов с большой рассеиваемой мощностью.

Технология полиимидных плат, развивавшаяся высокими темпами в 80-х годах прошлого столетия [1, 2], в настоящее время находит ограниченное при-

Таблица 1

Материал подложки	Плотность проводников, линий/мм		ТКЛР, $10^{-6}$ 1/К	Удельная теплопроводность, Вт/(см·К)	Длина и ширина, мм	Предел прочности, МПа	Удельная цена, руб./см <sup>2</sup>	Плотность, г/см <sup>3</sup>
	достигнутая	перспективная						
Стеклотекстолит FR-4	5	10	14	0,02	500×500	300—400	0,1	1,8
Полиимид	5	10	25	0,0015	78×95	—	—	—
Ситалл	5	20	5	0,015	60×48	200—300	1,14	2,5
Поликор	5	20	8	0,3	60×48	320—450	7,98	4
Сапфир	10	500	8	0,47	$\varnothing 76$	700	24,0	4
Кремний	50	500	2,3	1,09	$\varnothing 100$	700	2,4	2,3

менение, а на ряде предприятий произошла замена полиимидных плат на стеклотекстолитовые. Это связано с тем, что полиимидные платы имеют более высокую себестоимость изготовления по сравнению с современными стеклотекстолитовыми платами, которые обеспечивают такую же плотность проводников (табл. 1). Недостатком печатных и полиимидных плат является то, что на них нельзя изготавливать интегральные резисторы. Установка на платы резисторов в мини-корпусах увеличивает себестоимость МСБ, снижает надежность и плотность ее упаковки.

Наибольшая плотность проводников в тонкопленочной МСБ обеспечивается применением алюминия в качестве тонкой пленки проводящего слоя. Результаты исследований, приведенные в [6, 7], позволяют проектировать тонкопленочные элементы на ситалловых и поликорковых подложках со значительно меньшими нормами топологических размеров: 25—50 мкм. Дальнейшее уменьшение размеров проводников уменьшает выход годных МСБ. Это связано с тем, что данные подложки имеют прямоугольную форму. При нанесении фоторезиста на углах подложек образуется валик, толщина которого может в несколько раз превосходить толщину основного слоя. В результате явления дифракции происходит засветка фоторезиста под элементами фотошаблона, что приводит к уменьшению ширины линий. Кроме того, воспроизводимость проводников и резисторов ухудшается из-за пористости ситалловых и поликорковых подложек.

Применение гребенчатых резисторов [8] значительно расширяет диапазон проектируемых тонкопленочных резисторов (ТПР) на одной подложке. Поэтому с целью существенного повышения интеграции на ситалловых и поликорковых подложках желательным применением резистивных материалов с удельным поверхностным сопротивлением  $10 \text{ кОм}/\square$ . В этом случае диапазон проектируемых ТПР составит  $20 \text{ Ом} \dots 3 \text{ МОм}$ . Так как наиболее употребительными являются ТПР с номинальными сопротивлениями  $100 \text{ Ом} \dots 300 \text{ кОм}$ , то такое решение значительно уменьшит площадь резисторов.

Минимальную ширину проводников с проводящей пленкой из алюминия можно получить на подложках из сапфира и кремния (1—10 мкм). Сапфир и кремний являются монокристаллами, поэтому не обладают пористостью, свойственной ситаллу и поликору. Шероховатость рабочей поверхности сапфира и кремния соответствует 14—15-му классам. Последнее обстоятельство, а также отсутствие пор и валика при нанесении фоторезиста, позволяют получать малую ширину проводников на этих монокристаллах. Получение сапфира сопряжено с большими затратами энергии (температура плавления сапфира составляет 2300 К), и поэтому он является полудрагоценным камнем. Кроме того, сапфир при его механической обработке имеет большие отходы, что и обуславливает его высокую стоимость и, соответственно, ограниченное применение.

Кремний оказался почти идеальным и пока единственным материалом для изготовления СБИС и микропроцессоров, широкое применение которых открыло путь для невиданно быстрого прогресса техники переработки информации. Кремний также является основным материалом микромеханики (технология МЭМС). Как видно из табл. 1, кремний по своим

техническим характеристикам в несколько раз, а то и на порядок, превосходит аналогичные параметры всех остальных материалов, а по стоимости значительно уступает только стеклотекстолиту.

Несмотря на превосходные технико-экономические параметры, тонкопленочные МСБ с подложками из кремния на предприятиях РФ, в отличие от США, практически не применяются. На наш взгляд, это обусловлено следующими основными причинами.

1. В настоящее время перед российскими предприятиями не стоит задача «догнать и перегнать». Ее сменила задача выживания. Как это ни парадоксально, но многие руководители российских предприятий эту задачу решают не путем разработки и внедрения новых технологий, а путем уничтожения имеющихся высоких технологий, в частности технологии тонких пленок.

2. Кремний, несмотря на высокую прочность, является хрупким материалом. В связи с этим необходимо решение задачи обеспечения допустимых деформаций при сборке, испытаниях и эксплуатации МСБ с подложкой из кремния.

3. Традиционно в качестве резистивных материалов в МСБ используются резистивные сплавы, например РС-3710, или керметы, например К-50С. Для их травления применяют сильные травители, в состав которых, как правило, входит плавиковая кислота, которая травит двуокись кремния. Данное обстоятельство ограничивает применение кремниевых подложек в аналоговых МСБ.

При одинаковом уменьшении размеров ТПР его площадь уменьшается пропорционально уменьшению квадрата его размера. Например, при переходе от норм проектирования 200 мкм к 50 мкм площадь ТПР уменьшается в 16 раз, а при переходе к 25 мкм — в 64 раза. В этом случае площадь ТПР практически не оказывает влияния на плотность упаковки МСБ. Поэтому в качестве резистивного материала можно использовать адгезионный подслоя хрома с величиной удельного поверхностного сопротивления  $\rho=250 \dots 500 \text{ Ом}/\square$ . Такое решение несколько увеличивает площадь ТПР, однако при этом можно значительно снизить себестоимость МСБ за счет исключения напыления резистивного материала, который, как правило, наносится в отдельном технологическом цикле перед напылением проводящего слоя. Кроме того, применение хрома в качестве резистивного материала позволяет изготавливать ТПР на подложках из кремния. (Как известно, хром травится серной или соляной кислотой, к которым устойчива двуокись кремния.) Стабильность сопротивления резистора из пленки хрома практически не уступает стабильности ТПР из резистивных сплавов [1, с. 87—102].

Изложим кратко технологию изготовления резистивных структур из хрома на подложках из кремния.

1. Формирование двуокиси кремния толщиной 1,3—1,7 мкм на поверхности кремниевой пластины.
2. Напыление проводящей структуры с адгезионным подслоем хрома, например Cr—Al, Cr—Cu—Ni, Cr—Cu—Cr.
3. Проведение первой фотолитографии.
4. Формирование проводников и контактных площадок, а также длины резисторов путем травления проводящего слоя до адгезионного подслоя хрома.

5. Проведение второй фотолитографии.  
6. Формирование ширины резисторов путем травления хрома.

7. Формирование защитной изоляции.

Одной из проблем производства МСБ, как в России, так и за рубежом, является недостаток бескорпусных кристаллов (БК). С начала 1990-х годов выпуск новых БК в РФ прекращен. Мало того, снимаются с производства освоенные БК. (Эти процессы характерны и для прибалтийских стран — бывших союзных республик.) Свои новые изделия российские предприятия разрабатывают на основе технологии поверхностного монтажа компонентов (ТПМК) на печатных платах [9]. Однако, как это следует из табл. 1, перспективы развития печатных плат весьма ограничены, и повышение интеграции разрабатываемой микросборочной аппаратуры в этом случае может быть достигнуто только за счет повышения интеграции СБИС.

Для повышения интеграции МСБ можно рекомендовать установку мини-корпусов, предназначенных для поверхностного монтажа, на платы из поликора [2, с. 76] или кремния. В этом случае в качестве проводящей структуры используют Cr—Cu—Cr с толщиной меди 2,5—5 мкм. После формирования защитной изоляции травят хром на контактных площадках, предназначенных для монтажа мини-корпусов. Затем групповым методом производят горячее облуживание контактных площадок. Сборку МСБ проводят методами ТПМК. Такой конструктивно-технологический вариант МСБ позволяет повысить интеграцию по сравнению с монтажом компонентов на печатную плату за счет увеличения плотности проводников и формирования ТПР на подложке. Кроме того, значительно улучшается теплоотвод от компонентов и резисторов.

Для того чтобы оценить плотность упаковки того или иного конструктивно-технологического варианта платы, достаточно рассчитать площадь размещения компонента с одним и тем же количеством выводов на плате по методике, изложенной в [10]. Эта площадь, обеспечивающая требуемую трассировку проводников, определяется выражением

$$S_k = (l + \Delta l)(b + \Delta l), \quad (1)$$

где  $l, b$  — длина и ширина компонента;

$\Delta l$  — увеличение требуемого размера платы относительно размера компонента.

Значение  $\Delta l$  при условии, что ширина проводников равна ширине зазора между ними, имеет аналитическую зависимость вида [10]

$$\Delta l = [(a_0 + a_1 K + a_2 K_c) / (2n)] 2b_n - c_1 h n, \quad (2)$$

где  $a_0, a_1, a_2, c_1$  — статистические коэффициенты;

$K$  — число выводов компонента;

$K_c$  — среднее число выводов, равное сумме выводов всех компонентов, размещенных на плате, деленной на число компонентов;

$n$  — число коммутационных слоев;

$b_n$  — ширина проводника в мм;

$h$  — расстояние между противоположными контактными площадками знакоместа компонента (этот параметр используется для компонентов, у которых выводы выходят на две противоположные стороны).

Для упрощения вычислений положим:  $K = K_c = 24$ ;  $h = 0$ ;  $n = 2$ . Этот случай соответствует плате с двумя уровнями коммутации, на которой находятся компоненты с 24 выводами, причем выводы расположены по всем четырем сторонам компонента и все они задействованы.

Учитывая приведенные допущения, а также то, что, согласно [10],  $a_0 = 9,7$ ;  $a_1 = 3,45$ ;  $a_2 = 0,32$ , формула (2) преобразуется к виду

$$\Delta l = 50 b_n. \quad (3)$$

Преобразуем выражение (1):

$$S_k = lb + \Delta l(l + b) + \Delta l^2 = S + \Delta S_1 + \Delta S_2 = S + \Delta S, \quad (4)$$

где  $S = lb$  — площадь компонента;

$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2$  — общее приращение площади платы относительно площади компонента;

$\Delta S_1 = \Delta l(l + b)$  — приращение площади платы первого порядка;

$\Delta S_2 = \Delta l^2$  — приращение площади платы второго порядка.

Используя выражение (3) проведем расчет параметров (4), а результаты расчета сведем в табл. 2. В табл. 2 приведено также сравнение площадей размещения на плате различных типов корпусов компонентов, приведенных в [9, с. 68]. Здесь ОВ — объемные выводы, мод. — модификация, LCCC — керамический мини-корпус, SOP — пластмассовый мини-корпус.

Как следует из таблицы, плотность упаковки кремниевой платы с БК может быть повышена в 5—12 раз по сравнению с монтажом мини-корпусов на печатную плату. На самом деле это преимущество еще выше. Дело в том, что формула (2) была получена при исследовании печатных плат, и ее статистические коэффициенты (по крайней мере, некоторые) напрямую зависят от диаметра переходных отверстий. В печатной плате потери из-за сквозных отверстий достигают 30% ее поверхности [11]. В кремниевой же плате диаметр переходных отверстий, а также расстояния между ними, будут значительно меньше, чем в печатной плате. Следовательно, и значения статистических коэффициентов для кремниевой платы будут ниже.

Как следует из формулы (2), преимущества тонкопленочной технологии в плотности упаковки возрастают при увеличении числа выводов компонентов. В случае установки мини-корпусов на кремниевую плату выигрыш в плотности упаковки не столь значительный. Тем не менее он составляет 1,75—3,75 раза.

Еще одним аргументом в пользу тонкопленочной технологии является то, что она обеспечивает высоко-

Таблица 2

Типы корпусов	$l, \text{ мм}$	$b, \text{ мм}$	$S, \text{ мм}^2$	$b_n, \text{ мм}$	$\Delta l, \text{ мм}$	$\Delta S_1, \text{ мм}^2$	$\Delta S_2, \text{ мм}^2$	$\Delta S, \text{ мм}^2$	$\Delta S_k, \text{ мм}^2$	Относительные единицы
БК с ОВ	6,57	5,65	37,12	0,01	0,5	6,11	0,25	6,36	43,48	1
БК(мод. 1, 2)	8,57	5,85	50,13			7,21		7,46	57,59	1,32
LCCC	11,18	11,18	125	0,1	5	11,18	25	11,43	136,4	3,14
				0,2	10	111,8	100	114,3	239,3	5,5
SOP	15,4	10,24	157,7	0,2	10	256,4	100	356,4	514,1	11,8

кое ресурсосбережение и экологическую безопасность. Достаточно сказать, что при травлении печатных плат в отходы уходит до 800 г меди с 1 м<sup>2</sup> поверхности, в то время как при травлении тонкопленочных плат этот показатель не превышает 6 г/м<sup>2</sup> [11]. К тому же при травлении меди образуются вредные вещества. Большая часть растворов для травления меди, являющихся опасными для окружающей среды, сбрасывается вместе со сточными водами. Поэтому при обосновании экономической целесообразности производства печатных плат необходимо учитывать затраты на строительство очистных сооружений и переработку гальванических стоков. Кроме того, в связи с истощением природных ресурсов цены на медь неизбежно будут возрастать (как, впрочем, и экологические требования к производителям печатных плат). Отсюда следует ожидать значительного повышения себестоимости производства печатных плат.

#### Выводы

Наибольшую интеграцию, максимальный теплоотвод и низкую себестоимость изготовления микросборки можно получить путем применения микросборок с подложкой из кремния. Для существенного уменьшения площади тонкопленочных резисторов следует использовать резистивные материалы с  $\rho=5...10$  кОм/□. Вместе с тем уменьшение норм проектирования топологических размеров резисторов до 50 мкм и менее позволяет использовать в качестве резистивного материала адгезионный подслой хрома с величиной  $\rho=250...500$  Ом/□. При этом площадь резистора возрастает незначительно, а себестоимость изготовления микросборки может быть существенно снижена. Кроме того, применение хрома позволяет изготавливать ТПР на кремниевых подложках.

На кремниевые или поликорковые платы возможна установка как бескорпусных кристаллов, так и компонентов в мини-корпусах, предназначенных для поверхностного монтажа. Как следует из проведен-

ного анализа, площадь кремниевой платы может быть в 6—15 раз меньше печатной платы, что значительно сокращает разрыв в себестоимости их изготовления. Кроме того, в отраслях, где приоритетом является минимизация массогабаритных характеристик, преимущества кремниевой платы с бескорпусными кристаллами бесспорны.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Микроэлектронная аппаратура на бескорпусных интегральных микросхемах / И. Н. Воженин, Г. А. Блинов, Л. А. Коледов и др.— М.: Радио и связь, 1985.
2. Гуськов Г. Я., Блинов Г. А., Газаров А. А. Монтаж микроэлектронной аппаратуры.— М.: Радио и связь, 1986.
3. Лаймен Д. Многокристалльные модули — высокоэффективное средство сборки новых поколений СБИС // Электроника.— 1989.— № 6.— С. 10—13.
4. Узбер С. Многокристалльные модули — перспективное направление в области СБИС // Электроника.— 1989.— № 7.— С. 63—71.
5. Дорошевич К., Дорошевич В., Телец В. Многокристалльные модули: конструкция, технология, перспектива // Главный инженер: управление промышленным производством.— 2004.— № 2.— С. 24—27.
6. Спиринов В. Г. Математические модели сопротивления тонкопленочного резистора с размерами 50 мкм // Технология и конструирование в радиоэлектронной аппаратуре.— 2004.— № 2.— С. 14—16.
7. Спиринов В. Г. Расчет стационарного теплового режима тонкопленочной микросборки // Вестник МВВО. Сер.: Высокие технологии в радиоэлектронике, информатике и связи. (Н.-Новгород.)— 2003.— Вып. 1.— С. 15—19.
8. Спиринов В. Г. Оценка влияния сопротивления электродов на погрешность тонкопленочного резистора // Там же.— С. 11—14.
9. Мэнгин Ч.-Г., Маклеланд С. Технология поверхностного монтажа. Будущее технологии сборки в электронике.— М.: Мир, 1990.
10. Елизаров Б. А., Максимов А. В., Шелест В. И., Ширяев Ю. Н. Оценка электромонтажных параметров коммутационных плат на ранних этапах проектирования РЭС // Технология и конструирование в радиоэлектронной аппаратуре.— 2004.— № 2.— С. 3—6.
11. Скубилин М. Д., Письменов А. В., Гусев Б. А. Проблемы ресурсосбережения и экологической безопасности в гальванотехнологии // Там же.— С. 46—51.

#### НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



#### Умняшкин С. В. Математические основы цифровой обработки и кодирования сигналов.— М.: МИЭТ, 2004.— 176 с.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям «Информатика и вычислительная техника» и «Прикладная математика». Материал пособия включает в себя в основном наиболее общие теоретические вопросы, связанные с цифровым представлением сигналов и основами анализа линейных дискретных систем, на базе чего в дальнейшем возможно построение специализированных курсов цифровой обработки сигналов, ориентированных на конкретные специальности и направления. По этой причине учебное пособие может быть также рекомендовано для направлений радиотехнического и телекоммуникационного профиля, так как изложение материала опирается лишь на общеобразовательные математические курсы, читаемые в МИЭТ для всех технических специальностей.



Д. т. н. С. М. СМОЛЬСКИЙ, к. ф.-м. н. С. Д. ВОТОРОПИН,  
Н. Н. САВКОВ, А. А. ПЛЕЩЕЕВ, А. А. ТРОФИЛЕЕВ,  
П. С. ОСТАПЕНКОВ, А. М. ФЕДОТОВ

Россия, Московский энергетический институт;  
г. Томск, НИИ полупроводниковых приборов  
E-mail: SmolskiySM@mail.ru, Votoropin@mail.tomsknet.ru

Дата поступления в редакцию  
28.10 2004 г.

Оппонент В. И. МАЙ  
(НПП "Сатурн", г. Киев)

## АВТОДИННЫЕ ЧМ-ЛОКАТОРЫ КВЧ-ДИАПАЗОНА С НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*Предложен подход к теоретическому анализу ЧМ-автогенераторов и автодинов, позволяющий определить амплитуды и фазы автодиного сигнала и сигнала паразитной амплитудной модуляции.*

Системы ближней радиолокации (СБРЛ) — специфические радиолокационные устройства, отличительными особенностями которых являются соизмеримость дальности действия с геометрическими размерами взаимодействующих объектов и требование предельной компактности устройства. Это приводит в большинстве случаев к совмещению функций генерирования зондирующего и обработки отраженного сигналов в одном каскаде — специфической автоколебательной системе — автодине. От такой автоколебательной системы требуется не только сформировать сигнал и обеспечить необходимое управление его параметрами (мощностью, частотой, фазой, спектром), но и произвести начальную обработку переотраженного сигнала для выделения необходимой информации.

СБРЛ, работающие в диапазоне малых дальностей (от одного метра до одного километра), находят широкое применение как в военных, так и в гражданских системах, например в самолетных альтиметрах, навигационных РЛС, датчиках уровня различных продуктов (в частности нефтепродуктов), находящихся в закрытых резервуарах, датчиках малых (порядка десятка микрометров) перемещений отражающего объекта, системах охранной сигнализации и кодированного пропуска, устройствах сближения и стыковки, устройствах обнаружения движущихся объектов и измерения параметров их движения, в том числе для создания интеллектуальных систем управления транспортными потоками. В последние годы уверенный рост интереса к таким системам связан не только с развитием принципов построения и новых схемотехнических решений, но и с резким расширением частотного диапазона в сторону миллиметровых волн, с развитием микроэлектронных миллиметровых устройств (вплоть до комбинирования микроэлектронного приемо-передатчика со специфическими *patch*-антеннами), а также с существенным снижением стоимости СВЧ-узлов таких систем.

Успехи в разработке и активном использовании таких систем лежат на пути использования последних

результатов и объединения усилий специалистов локационных радиотехников, ориентированных на разработку СБРЛ, и специалистов по микроэлектронным технологиям СВЧ-приборов и устройств миллиметрового диапазона.

В статье обсуждаются современные подходы к теоретическому анализу частотно-модулированных автодиных устройств, пути исследования полезного автодиного эффекта и оптимизации режима автодинов на современных активных элементах КВЧ-диапазона и приводятся новые экспериментальные данные. В результате исследований в этом направлении намечается, как считают авторы, серьезный импульс к потенциальному технологическому прорыву (в том числе на международном рынке) в разработке миллиметровых автодиных датчиков локационного типа с повышенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками.

### Теоретическое рассмотрение автодиных ЧМ-локаторов

Теоретический анализ автодинов может быть основан на разнообразных моделях и теоретических подходах. В течение многих лет исследований транзисторных и диодных автодинов мы исходим из наиболее соответствующей практике модели автоколебательной системы [1], связанной с приемо-передающей антенной взаимной цепью и находящейся под воздействием отраженного от цели сигнала. Из-за доплеровского эффекта частота отраженного сигнала оказывается сдвинутой на доплеровскую поправку. В результате нелинейного преобразования излученного и принятого сигналов в автодинном узле выделяется разностная (доплеровская) частота, несущая информацию о скорости и дальности до цели.

Применение в автодиных локаторах ЧМ существенно улучшает эксплуатационные характеристики автодинов [2, 3]. В частности удается измерять расстояние до объекта при очень низких скоростях и даже при неподвижном объекте, когда доплеровский эффект отсутствует. Однако впрямую использовать результаты анализа обычных автодинов для систем с ЧМ нельзя, что объясняется следующей причиной.

Аналізу автоколебательных систем (АКС) посвящено громадное количество научных и технических исследований — начиная от классиков и кончая современными учеными. Один из наиболее удачных методов анализа был предложен С. И. Евтяновым и на-

зван методом символических укороченных уравнений. Вместе с тем обоснован этот метод С. И. Евтяновым для систем с *постоянными параметрами*, что не дает возможности напрямую использовать его для частотно-модулированных систем, в частности ЧМ-автодинов.

Ниже приведены результаты разработки общей методики анализа стационарных и переходных процессов для автодинных СБРЛ с частотной модуляцией колебаний, основанной на методе символических укороченных уравнений, распространенном на динамические системы с переменными во времени параметрами.

Главными предпосылками анализа ЧМ АКС являются следующие [1, 4]:

— колебательная система является высокодобротной (по выбранному напряжению или току), что позволяет использовать метод медленно меняющихся амплитуд;

— инерционные свойства активного элемента не меняются в полосе пропускания колебательной системы.

Эти допущения выполняются в большинстве практических случаев.

Перейдем к построению математической модели АКС с переменными во времени параметрами, для которых метод символических укороченных уравнений (МСУУ) непосредственно использовать нельзя. Привлекательность этого метода для радиоинженеров и научных работников очевидна, поскольку он позволяет использовать классический аппарат теории нелинейных колебаний, оперируя с привычными для инженера комплексными амплитудами.

Для применения МСУУ к ЧМ-генераторам рассмотрим схему ЧМ АКС на неагтроне — двухполосном активном элементе с нелинейной характеристикой  $i(u)$ , где  $i$  и  $u$  — временные сигналы тока и напряжения (рис. 1, где символически показаны двухполосный активный элемент (АЭ) и колебательная система (КС) с элементом, управляющим частотой, — управителем частоты).

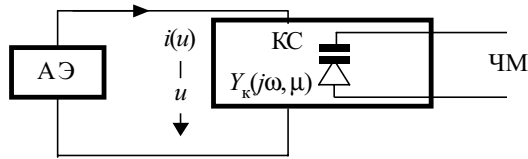


Рис. 1. Эквивалентная схема ЧМ-автодина на двухполоснике

Символическая проводимость контура  $Y_k(j\omega, \mu)$  зависит не только от оператора дифференцирования  $j\omega$ , но и от модулируемого параметра (или совокупности параметров)  $\mu$  и является, как в обычных цепях, отношением полиномов:

$$Y_k(j\omega, \mu) = R(j\omega, \mu) / Q(j\omega, \mu).$$

Полное дифференциальное уравнение ЧМ-генератора примет в символической форме вид

$$R(j\omega, \mu)u(t) = Q(j\omega, \mu)i(t) \quad (1)$$

и преобразуется в явное дифференциальное уравнение после замены  $j\omega \rightarrow d/dt$ .

Поставим задачу провести укорачивание уравнения (1) в общем виде, как это выполнено в [5, 6] для систем с постоянными параметрами. Для этого представим искомые сигналы в квазигармонической форме:

$$u(t) = \dot{U} \exp(j \int \omega_k dt); \quad i(t) = \dot{I} \exp(j \int \omega_k dt),$$

где  $\dot{U} = U \exp(j\varphi)$ ,  $\dot{I} = I \exp(j\varphi)$  — комплексные амплитуды сигналов,  $\omega_k$  — модулируемая частота контура.

Теперь полное символическое уравнение (1) примет вид

$$R(j\omega, \mu) \dot{U} \exp(j \int \omega_k dt) = Q(j\omega, \mu) \dot{I} \exp(j \int \omega_k dt). \quad (2)$$

Представляя теперь в (2) полиномы  $R$  и  $Q$  порядка  $l$  и  $n$  в явном виде, получим:

$$R(j\omega, \mu) = \sum_{m=0}^l \alpha_m(\mu)(j\omega)^m; \quad Q(j\omega, \mu) = \delta \sum_{m=0}^n \beta_m(\mu)(j\omega)^m.$$

Учитывая здесь, что любой из коэффициентов  $\alpha_m$  и  $\beta_m$  полиномов может зависеть от модулируемого параметра  $\mu$ , можно переписать уравнение (2) так:

$$\left[ \exp(j \int \omega_k dt) \right] \sum_{m=0}^l \sum_{l=0}^m \binom{m}{l} (j\omega)^l \alpha_m \dot{U} \left[ (j\omega)^{m-l-1} j\omega_k \right] = \delta \left[ \exp(j \int \omega_k dt) \right] \sum_{m=0}^n \sum_{l=0}^m \binom{m}{l} (j\omega)^l \beta_m \dot{I} \left[ (j\omega)^{m-l-1} j\omega_k \right]. \quad (3)$$

Здесь дифференциальные операторы  $j\omega$  действуют только на те функции времени, которые заключены с ними в квадратные скобки, и учтено, что для высокодобротной КС полином  $Q$  всегда содержит малое затухание  $\delta$  в качестве общего множителя.

Теперь уже в уравнении (3) можно провести сокращение на быстро осциллирующие члены  $\exp(j \int \omega_k dt)$ , поскольку они уже вынесены из-под оператора  $j\omega$ , но для укорачивания надо осуществить сортировку членов по порядку малости, мерой которого примем затухание КС. Считая, как обычно, что изменения амплитуды и фазы колебаний за период и скорость модуляции частоты малы, произведем сортировку членов в рядах (3) по порядку малости, предварительно разложив  $\alpha_m$  и  $\beta_m$  в ряды Маклорена по  $\delta$ :

$$\alpha_m(\mu) = \sum_{l=0}^{\infty} \alpha_{ml}(\mu) \delta^l, \quad \beta_m(\mu) = \sum_{l=0}^{\infty} \beta_{ml}(\mu) \delta^l.$$

После сортировки получим искомые дифференциальные уравнения первого приближения в дифференциальной форме (производные по времени обозначены жирной точкой сверху) —

$$\delta \alpha_{01} \dot{U} + j \alpha_{10} U \Delta \omega + j \delta \omega_0 \alpha_{11} \dot{U} + j \alpha_{20} U (j\omega \Delta \omega) + \left( j \omega \alpha_{10} \dot{U} \right) + 2 j \omega_0 \left( j \omega \alpha_{20} \dot{U} \right) = \delta \beta_{00} \dot{I} + j \delta \omega_0 \beta_{10} \dot{I} \quad (4)$$

и второго приближения —

$$j \delta \alpha_{11} U \Delta \omega + j \delta^2 \alpha_{12} U \omega_0 + j \delta \alpha_{21} \dot{U} (j\omega \Delta \omega) + j \alpha_{30} \dot{U} [(j\omega)^2 \Delta \omega] + \delta \left( j \omega \alpha_{11} \dot{U} \right) + 2 j \Delta \omega \left( j \omega \alpha_{20} \dot{U} \right) + 2 j \omega_0 \delta \left( j \omega \alpha_{21} \dot{U} \right) + 3 \left( j \omega \alpha_{30} \dot{U} \right) (j\omega \Delta \omega) + (j\omega)^2 \left( \alpha_{20} \dot{U} \right) + 3 j \omega_0 \left[ (j\omega)^2 \alpha_{30} \dot{U} \right] = \delta \beta_{01} \dot{I} + j \delta \beta_{10} \Delta \omega \dot{I} + j \delta \beta_{20} \dot{I} (j\omega \Delta \omega) + \delta \left( j \omega \beta_{10} \dot{I} \right) + 2 j \delta \omega_0 \left( j \omega \beta_{20} \dot{I} \right) \quad (5)$$

Уравнения второго приближения (5) целесообразно использовать тогда, когда уравнения первого приближения (4) обращаются в тождества и не дают возможности изучить процессы.

Таким образом, алгоритм использования предлагаемой процедуры получения укороченных уравнений АКС с модулируемыми параметрами следующий. Необходимо выписать выражение для символической проводимости КС  $Y_k$ , выделить полиномы его числителя и знаменателя и определить порядки малости коэффициентов. После этого необходимо вычислить выражения  $\alpha_{10}, \alpha_{01}, \alpha_{11}, \alpha_{20}, \beta_{00}, \beta_{10}$  и подставить их в выражение (4). Далее подставляя в (4), как и для систем с постоянными параметрами, выражения для комплексных амплитуд напряжения и тока, производим дифференцирование, разделение действительных и мнимых частей, и укороченные уравнения будут записаны в явной форме. Если при этом уравнение (4) превратится в тождество, то для анализа надо использовать уравнения второго приближения (5).

Предложенный подход к анализу частотно-модулированных АКС распространен в наших работах на более сложные случаи, когда помимо низкочастотного воздействия (модуляция) на КС осуществляют и другие виды воздействия [6—12].

### Уравнения одноконтурных ЧМ-автогенераторов при синусоидальной модуляции частоты

Рассмотрим процедуру получения укороченных дифференциальных уравнений одноконтурных автогенераторов. Принципиальная схема по высокой частоте показана на рис. 2 для примера в виде схемы с трансформаторной связью.

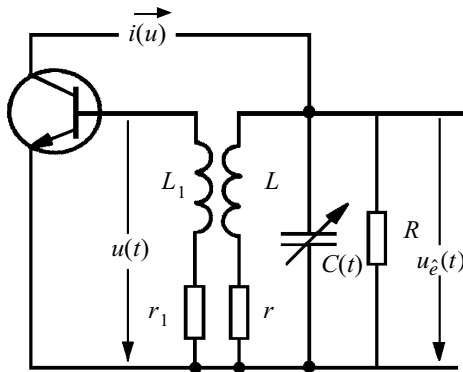


Рис. 2

Активный элемент представлен биполярным транзистором, который для простоты считаем безынерционным прибором, имеющим очень большое входное сопротивление на рабочей частоте. Под воздействием управляющего сигнала  $u(t)$  транзистор вырабатывает ток  $i(u)$ , втекающий в контур и компенсирующий общие потери. Управляющее напряжение  $u$  связано с выходным  $u_k$  через коэффициент обратной связи  $k = u/u_k$ , определяемый параметрами схемы.

Будем считать, что омические потери контура сосредоточены в катушках индуктивности  $L_1$  и  $L$ , причем  $r_1/r = L_1/L$ . Будем считать, что модуляция частоты осуществляется по синусоидальному закону:

$$\omega = 1/\sqrt{L_{\text{общ}}C_{\text{общ}}(t)} = \sqrt{LC(t)} = \omega_0(1 + \varepsilon \cos \Omega_m t), \quad (6)$$

что обеспечивается модуляцией емкости контура по закону

$$C = C_0(1 - 2\varepsilon \cos \Omega_m t).$$

Теперь мы можем записать систему полных дифференциальных уравнений задачи, из которых вытекает уравнение (3). Это уравнение второго порядка не является особенно сложным и его можно напрямую свести к укороченным уравнениям. Эта процедура достаточно трудоемкая, особенно для сложных колебательных систем и в случаях автосмещения, когда выполнить прямую процедуру укорачивания без ошибок очень сложно. Поэтому далее мы используем разработанный в данной статье подход простого получения укороченных уравнений.

Опишем данный пример подробно.

Символический иммитанс задачи запишем в следующем виде, как рассмотрено выше:

$$Y_k(j\omega, \mu) = \frac{R + j\omega L + (j\omega)^2 LCR}{j\omega LR} = \frac{1 + \left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right) \frac{\rho}{R} + \left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2 (\omega_0^2) LC}{\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right) \rho} = \frac{1 + \left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right) \delta + \left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2 (1 - 2\varepsilon \cos \Omega_m t)}{\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right) \delta R}.$$

Здесь  $j\omega$  — дифференциальный оператор;

$\omega_0$  — постоянная составляющая частоты колебаний, вокруг которой модулируется частота по закону (6),

$\omega_0 = 1/LC_0 = \text{const}$ ;

$\rho$  — характеристическое сопротивление контура,

$\rho = \omega_0 L$ .

Теперь определим коэффициенты разложения в ряд Тэйлора числителя и знаменателя символического иммитанса  $Y_k(j, \omega, \mu)$  по  $j\omega$ :

$$\alpha_0 = 1; \alpha_1 = \frac{\delta}{\omega_0}; \alpha_2 = \frac{1 - 2\varepsilon \cos \Omega_m t}{\omega_0^2}; \beta_0 = 0; \beta_1 = \frac{R}{\omega_0}.$$

Итак, как видим, от времени зависит только коэффициент  $\alpha_2$ .

Выпишем теперь коэффициенты разложений всех коэффициентов в ряд Тэйлора по  $\delta$ :

$$\alpha_{00} = 1; \alpha_{01} = 0; \alpha_{10} = 0; \alpha_{11} = \frac{1}{\omega_0};$$

$$\alpha_{20} = \frac{1 - 2\varepsilon \cos \Omega_m t}{\omega_0^2}; \beta_{01} = 0; \beta_{10} = \frac{R}{\omega_0}.$$

Теперь сразу выписываем укороченное уравнение относительно комплексных амплитуд:

$$j\delta \dot{U} + j \frac{1 - 2\varepsilon \cos \Omega_m t}{\omega_0^2} \dot{U} (j\omega \Delta\omega) + 2j\omega_0 \left( j\omega \frac{1 - 2\varepsilon \cos \Omega_m t}{\omega_0^2} \dot{U} \right) = j\delta \omega_0 \frac{R}{\omega_0} \dot{I}. \quad (7)$$

Подставляя в (7) выражение для  $\Delta\omega = \omega(t) - \omega_0 = \varepsilon \omega_0 \cos \Omega_m t$  и обычные выражения для комплексных амплитуд, получим (при  $T = \frac{2}{\omega_0 \delta}$ ):

$$Ue^{j\varphi} + T \frac{1-2\varepsilon \cos \Omega_m t}{2} \varepsilon U e^{j\varphi} (-\Omega_m \sin \Omega_m t) +$$

$$+ T \left( [-2\varepsilon \Omega_m \sin \Omega_m t] U e^{j\varphi} + \right.$$

$$\left. + [1-2\varepsilon \cos \Omega_m t] \left( \frac{dU}{dt} e^{j\varphi} + j U e^{j\varphi} \frac{d\varphi}{dt} \right) \right) = R I e^{j\varphi}.$$

Здесь уже можно провести сокращения на экспоненциальный множитель (поскольку он уже вынесен за знак дифференциального оператора), и разделяя на действительные и мнимые части, имеем:

$$T(1-2\varepsilon \cos \Omega_m t) \frac{dU}{dt} + U - \varepsilon \Omega_m T U \sin \Omega_m t \times$$

$$\times \frac{1-2\varepsilon \cos \Omega_m t}{2} 2\varepsilon \Omega_m T U \sin \Omega_m t = R I(U); \quad (8)$$

$$T U (1-2\varepsilon \cos \Omega_m t) \frac{d\varphi}{dt} = 0. \quad (9)$$

Это и есть искомые укороченные уравнения рассматриваемого ЧМ-генератора. При отсутствии ЧМ (т. е. при  $\varepsilon=0$ ) эти уравнения сводятся к известным [1, гл. 3]. Из уравнения (9) следует, что  $d\varphi/dt=0$ , т. е. частота в установившемся и в переходном процессе равна модулируемой частоте контура. Это и понятно, т. к. при безынерционном активном элементе в рамках первых приближений частота не зависит от амплитуды.

При рассмотрении уравнений целесообразно учесть, что  $\varepsilon$  реально мало, и можно пренебречь членами с  $\varepsilon$  по сравнению с 1 и членами с  $\varepsilon^2$  по сравнению с  $\varepsilon$ . Тогда амплитудное уравнение (8) переписывается в виде

$$T \frac{dU}{dt} + U (1 - \frac{5}{2} \varepsilon \Omega_m T \sin \Omega_m t) = R I(U). \quad (10)$$

Это по виду простое уравнение и надо решать при рассмотрении паразитной амплитудной модуляции ЧМ-генератора и автодина.

Можно показать, что для всех одноконтурных ЧМ-автогенераторов структура укороченного уравнения для амплитуды будет полностью аналогичной (10), но коэффициент при слагаемом  $\varepsilon \Omega_m T \sin \Omega_m t$  будет меняться. Для схемы с трансформаторной обратной связью он равен  $-5/2$ , как видно из (10). Для схемы индуктивной трехточки коэффициент равен  $-3/2$ . Для других одноконтурных схем ЧМ-автогенераторов (например для емкостной трехточки) этот множитель будет другим.

### Паразитная амплитудная модуляция в ЧМ-автодинах

Пусть теперь частота колебаний автодина модулируется по произвольному закону с помощью переменной емкости:

$$\omega = 1/\sqrt{L_{\text{общ}} C_{\text{общ}}(t)} = \sqrt{LC(t)} = \omega_0 (1 + \varepsilon f(t)), \quad (11)$$

а емкость контура для этого меняется по закону  $C = C_0 [1 + \beta F(t)]$ .

Найдем связь между этими законами:

$$\omega(t) = \frac{1}{\sqrt{LC_0}} \frac{1}{\sqrt{1 + \beta F(t)}} = \omega_0 [1 + \varepsilon f(t)]$$

или

$$\frac{1}{1 + \beta F(t)} = [1 + \varepsilon f(t)]^2.$$

Считаем, что коэффициенты модуляции малы:

$$\beta \ll 1, \varepsilon \ll 1,$$

тогда

$$1 - \beta F(t) \approx 1 + 2\varepsilon f(t),$$

т. е.

$$\beta F(t) = -2\varepsilon f(t).$$

Итак, если частота колебаний модулируется по закону (11), то это обеспечивается модуляцией емкости контура по закону

$$C = C_0 [1 + \beta F(t)] = C_0 [1 - 2\varepsilon f(t)].$$

Символический иммитанс задачи примет прежний вид, но вместо множителя  $(1-2\varepsilon \cos \Omega_m t)$  в числителе появится множитель  $[1-2\varepsilon f(t)]$ .

Как и ранее, определим коэффициенты разложения в ряд Тэйлора числителя и знаменателя символического иммитанса:

$$\alpha_0 = 1; \alpha_1 = \frac{\delta}{\omega_0}; \alpha_2 = \frac{1-2\varepsilon f(t)}{\omega_0^2}; \beta_0 = 0; \beta_1 = \frac{R}{\omega_0}.$$

Выпишем коэффициенты разложений всех коэффициентов в ряд Тэйлора по  $\delta$ :

$$\alpha_{00} = 1; \alpha_{01} = 0; \alpha_{10} = 0; \alpha_{11} = \frac{1}{\omega_0};$$

$$\alpha_{20} = \frac{1-2\varepsilon f(t)}{\omega_0^2}; \beta_{01} = 0; \beta_{10} = \frac{R}{\omega_0}.$$

Теперь получаем укороченное уравнение относительно комплексных амплитуд:

$$j\delta \dot{U} + j \frac{1-2\varepsilon f(t)}{\omega_0^2} \dot{U} (j\omega \Delta\omega) + 2j\omega_0 \left( j\omega \frac{1-2\varepsilon f(t)}{\omega_0^2} \dot{U} \right) =$$

$$= j\delta \omega_0 \frac{R}{\omega_0} \dot{I}.$$

Подставляя сюда выражения для комплексных амплитуд

$$\dot{U} = U e^{j\varphi} \text{ и } \dot{I} = I e^{j\varphi}$$

(здесь учтено, что активный элемент безынерционен) и

$$\Delta\omega = \omega(t) - \omega_0 = \varepsilon \omega_0 f(t)$$

и проводя, как и выше, дифференцирование, получим:

$$U e^{j\varphi} + T \frac{1-2\varepsilon f(t)}{2} \varepsilon U e^{j\varphi} \left( \frac{df}{dt} \right) + T \left( \left[ -2\varepsilon \frac{df}{dt} \right] U e^{j\varphi} + \right.$$

$$\left. + [1-2\varepsilon f(t)] \left( \frac{dU}{dt} e^{j\varphi} + j U e^{j\varphi} \frac{d\varphi}{dt} \right) \right) = R I e^{j\varphi}.$$

Сокращая на экспоненциальный множитель, поскольку он уже вынесен за знак дифференциального оператора, и разделяя здесь действительные и мнимые части, имеем:

$$T(1-2\varepsilon f(t)) \frac{dU}{dt} + U - \varepsilon U T \frac{df}{dt} \frac{1-2\varepsilon f(t)}{2} -$$

$$- 2\varepsilon T U \frac{df}{dt} = R I(U); \quad (12)$$

$$TU(1 - 2\epsilon f[t]) \frac{d\phi}{dt} = 0. \quad (13)$$

Это и есть искомые укороченные уравнения рассматриваемого ЧМ-генератора при произвольном законе модуляции частоты. Если рассматривается случай небольшой перестройки частоты (именно так часто и бывает), т. е.  $\epsilon \ll 1$ , то (12) переписывается в виде

$$T \frac{dU}{dt} + U(1 - \frac{5}{2} \epsilon T \frac{df}{dt}) = RI(U). \quad (14)$$

Это уравнение и надо решать при рассмотрении паразитной амплитудной модуляции ЧМ-генератора. Как и ранее, для всех одноконтурных ЧМ-автогенераторов структура укороченного уравнения для амплитуды будет полностью аналогичной (14), но коэффициент при слагаемом  $\epsilon T \frac{df}{dt}$  будет меняться: для схемы с трансформаторной обратной связью он равен  $-5/2$ , для схемы индуктивной трехточки  $-3/2$ .

Определим теперь сигнал паразитной амплитудной модуляции (ПАМ) при конкретном законе модуляции частоты. Пусть при наличии ПАМ и автодинного отклика

$$U = U_0 + \eta(t) + \eta_{ад}(t), \quad (15)$$

где  $U_0$  — амплитуда напряжения автодина в рабочей точке (без ПАМ);

$\eta(t)$  — сигнал ПАМ;

$\eta_{ад}(t)$  — автодинный сигнал.

Считаем, как обычно, что  $\eta \ll U_0$ ,  $\eta_{ад} \ll U_0$ . Если встает задача определить уровень ПАМ при отсутствии автодинного отклика для разных законов модуляции частоты колебаний  $f(t)$ , то при обычных уровнях ПАМ можно линеаризовать уравнение (14), подставив в него вместо  $U$  выражение (15) при  $\eta_{ад} = 0$ :

$$T \frac{dU_0}{dt} + T \frac{d\eta}{dt} + (U_0 + \eta)(1 - \frac{5}{2} \epsilon T \frac{df}{dt}) =$$

$$= R[I(U_0) + \frac{d(GU)}{dU} \eta],$$

где нелинейная функция  $G(U) = I/U$  — крутизна по первой гармонике.

Это уравнение переписем, исключая отсюда уравнение стационарного режима:

$$T \frac{d\eta}{dt} - \frac{U_0}{G_\epsilon} \frac{dG}{dU} \eta = \Phi(t), \quad (16)$$

где

$$\Phi(t) = \frac{5}{2} U_0 \epsilon T \frac{df}{dt} \quad (17)$$

и  $G_\epsilon = 1/R$  — резонансная активная проводимость контура.

Уравнение (16) описывает установление сигнала ПАМ для одноконтурного автодина при произвольном законе модуляции частоты, определяемом через формулу (17). Общее решение уравнения (16) имеет вид

$$\eta(t) = \frac{1}{T} e^{-t/T'} \int e^{t'/T'} \Phi(t') dt', \quad (18)$$

где  $T' = T / \left( -\frac{U_0}{G_\epsilon} \frac{dG}{dU} \right)$  — приведенная постоянная времени контура.

Если  $f(t) = \cos \Omega_m t$ , то  $\Phi(t) = -\frac{5}{2} U_0 \epsilon \Omega_m T \sin \Omega_m t$ .

Теперь из (18) получаем:

$$\eta(t) = -\frac{5}{2} U_0 \epsilon \Omega_m e^{-t/T'} \int e^{t'/T'} \sin \Omega_m t dt. \quad (19)$$

Теперь получаем, интегрируя по частям:

$$\begin{aligned} \eta(t) &= -\frac{5}{2} U_0 \epsilon \Omega_m e^{-t/T'} \int e^{t'/T'} \sin \Omega_m t dt = \\ &= -\frac{5}{2} U_0 \epsilon \Omega_m e^{-t/T'} \left\{ \frac{1}{\Omega_m} (-\cos \Omega_m t) + T' \sin \Omega_m t e^{t'/T'} + C \right\} = \\ &= \frac{5}{2} U_0 \epsilon \left\{ \cos \Omega_m t - \Omega_m T' \sin \Omega_m t \right\} + C e^{-t/T'}, \end{aligned}$$

где  $C$  — константа интегрирования.

Вводя  $tg \Psi_1 = \Omega_m T'$ , получим:

$$\begin{aligned} \eta(t) &= \frac{5}{2} U_0 \epsilon \left\{ \cos \Omega_m t - tg \Psi_1 \sin \Omega_m t \right\} + C e^{-t/T'} = \\ &= C e^{-t/T'} + \frac{5 U_0 \epsilon \cos(\Omega_m t - \Psi_1)}{2 \sqrt{\left( \frac{U_0}{G_\epsilon} \frac{\partial G}{\partial U} \right)^2 + (\Omega_m T')^2}}. \end{aligned}$$

Итак, сигнал ПАМ при синусоидальной модуляции состоит из свободного экспоненциального множителя, описывающего установление сигнала ПАМ, и синусоидальной составляющей с частотой модуляции (собственно сигнала ПАМ). Фазовый сдвиг сигнала ПАМ определяется частотой модуляции и приведенной постоянной времени контура:  $\Psi_1 = \text{arctg}(\Omega_m T')$ . Амплитуда ПАМ пропорциональна амплитуде высокочастотных колебаний  $U_0$ , величине коэффициента модуляции частоты  $\epsilon$  и сложным образом зависит от режима автодина через нормированную производную  $\frac{U_0}{G_\epsilon} \frac{\partial G}{\partial U}$ .

### Экспериментальная часть

Для проверки выводов теоретического анализа проведены экспериментальные исследования КВЧ-радар на корпусном диоде Ганна АА768 в объемном исполнении с малым потреблением тока по цепи питания, работающего на частотах в диапазоне 33—55 ГГц. Конструкция устройства представлена на рис. 3. Апертура осесимметричной антенны 52 мм, усиление 23 дБ, диаграмма 10°. Габариты приемопередающего модуля 20×20×20 мм.

В диапазоне 55—63 ГГц исследованы автодинные модули в гибридно-интегральном исполнении в непрерывном режиме как с ЧМ по цепи питания диода Ганна (модуль М55314) с использованием диода Ганна планарной конструкции [13, 14], так и с ЧМ-модуля-



Рис. 3

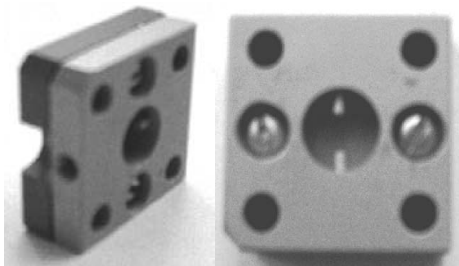


Рис. 4

цией по цепи варикапа (“Тигель-8”) в диапазоне 33,4—37,5 ГГц. Конструкция автодинных датчиков представлена на **рис. 4**. Габаритные размеры автодинного генератора M55314 — 15×15×6 мм, “Тигель-8” — 24×24×10 мм.

Структурная схема измерительной установки аналогична установке, описанной в [15, 16]. В качестве движущегося объекта использовался электромеханический имитатор с вращающимся в изгибе волноводного тракта зондом, позволяющий исследовать динамический режим работы автодинов до скоростей движения 220 м/с с изменением знака доплеровского смещения частоты, т. е. за один цикл работы устройства формируется отраженный сигнал, соответствующий приближающейся и удаляющейся цели [17—20]. Регулируемая величина погружения зонда-отражателя позволяет обеспечивать различные коэффициенты отражения. Выходные сигналы автодина регистрировались с помощью внешнего детектора  $u_a$  и с выхода частотного дискриминатора  $u_\omega$ , подключенного к тракту УПЧ анализатора спектра С4-60.

Для приближающегося отражателя при движении его с максимально достижимой скоростью экспериментальные осциллограммы автодинных откликов указанного генератора приведены на **рис. 5**, для удаляющегося — на **рис. 6**.

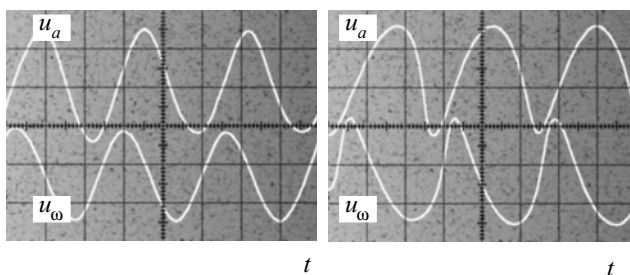


Рис. 5

Рис. 6

Из кривых на **рис. 5, 6** видно, что характер искажений (порядок следования пологих и крутых скатов и разность фаз) этих откликов зависит от направления движения отражателя, что соответствует известным представлениям. Однако величина автодинной девиации частоты (см. сигналы  $u_\omega$ ) в первом случае (**рис. 5**) больше на 4%, чем во втором (**рис. 6**), что позволяет сделать вывод о положительном знаке параметра неизохронности  $\gamma$  исследуемого генератора.

Внимательное изучение формы полученных сигналов  $u_a$  показывает, что степень их искажений несколько отличается. Это подтверждает правильность

выводов теоретического анализа. При снижении скорости движения отражателя до минимально возможного значения (около 0,3 м/с) характер искажений сигналов при смене направления сохранялся, но влияние дисперсии девиации частоты при этом не отмечалось. В процессе экспериментальных исследований динамического режима автодина в указанном диапазоне скоростей движения расстояния до имитатора изменялись от 0,8

до 5 м. При этом наблюдалось сохранение периодичности с доплеровской частотой и стабильности фазовых переходов автодинного отклика, что является важным для построения доплеровских СБРЛ на основе КВЧ-генераторов Ганна.

Хорошо видимые на осциллограммах **рис. 5, 6** изменения разности фаз сигналов  $u_a$  и  $u_\omega$  на  $180^\circ$  при перемене направления движения могут использоваться в автодинных радиолокационных устройствах для более надежной идентификации объектов по знаку радиальной скорости, чем это достигается путем сложного анализа формы автодинного сигнала.

### Заключение

Основные результаты, полученные в работе, можно свести к следующему.

1. Предложен подход к теоретическому анализу ЧМ-автогенераторов и автодинов, позволяющий определить амплитуды и фазы автодинного сигнала и сигнала паразитной амплитудной модуляции.

2. Точность квазистатического описания автодинного отклика КВЧ-генераторов уменьшается с увеличением скорости движения отражающих объектов, хотя качественная сторона описываемых квазистатической моделью явлений сохраняется и при больших скоростях.

3. Наблюдаемые экспериментально различия формы и степени искажения автодинного сигнала при изменении скорости и направления движения отражающего объекта объясняются неизохронностью КВЧ-генератора. Исследованы автодины в объемном и гибридно-интегральном исполнении на диодах Ганна в диапазонах длин волн 5 и 8 мм с малым потреблением тока по цепи питания. Эксперименты выполнены на стенде контроля параметров автодинов, позволяющем также регистрировать форму и спектр автодинных откликов на воздействие излучения, отраженного от движущегося равномерно либо с ускорением (замедлением) объекта.

4. В результате работы выяснены возможности работы автодинных систем в значительном динамическом диапазоне и при изменении знака радиальной скорости отражающего объекта.

5. Важным вопросом, требующим дополнительных исследований, является применение частотно-модулированных и импульсных автодинных генераторов КВЧ для улучшения основных характеристик систем ближней радиолокации и расширения области их применения.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Богачев В. М., Лысенко В. Г., Смольский С. М. Транзисторные генераторы и автодины.— М.: Изд-во МЭИ, 1993.
2. Komarov I., Smolskiy S. Fundamentals of short-range FM radar.— Norwood: Artech House Publisher, 2003.
3. Воторопин С. Д., Носков В. Я. Анализ режимов работы автодинных ГИС КВЧ на диодах Ганна // Изв. вузов. Физика.— 2002.— Вып. 2.— С. 88—96.
4. Воторопин С. Д., Носков В. Я. Обобщенная модель и основные уравнения КВЧ автодина на ДГ // Там же.— 2001.— Вып. 12.— С. 23—30.
5. Евтянов С. И. О связи между дифференциальными и «укороченными» уравнениями // Радиотехника.— 1946.— № 2.— С. 68—79.
6. Богачев В. М., Смольский С. М. Общие укороченные и характеристическое уравнения транзисторного автогенератора // Там же.— 1973.— Т. 28, № 5.— С. 51—59.
7. Моросанов С. А., Смольский С. М. Оптимизация режима и расчет автодинов на туннельных диодах // Там же.— 1981.— Т. 36, № 2.— С. 84—88.
8. Моросанов С. А., Смольский С. М., Филицина Ю. А. Двухтактные транзисторные автогенераторы и автодины // Радиотехника и электроника.— 1982.— Т. 27, № 4.— С. 764—769.
9. Артеменков С. Л., Смольский С. М. Автодинные свойства синхронизированных транзисторных автогенераторов // Тр. Моск. энерг. ин-та.— 1982.— Вып. 579.— С. 81—86.
10. Моросанов С. А., Смольский С. М. Кольцевые транзисторные автодины // Известия вузов. Радиоэлектроника.— 1984.— Т. 27, № 11.— С. 95—98.
11. Колтыгин О. Н., Смольский С. М. Коэффициент передачи транзисторного автодина с запаздывающей обратной связью // Радиотехника.— 1987.— Т. 42, № 5.— С. 30—33.
12. Попов А. В., Смольский С. М., Шатов В. Л. Взаимная синхронизация двух транзисторных автодинов // Радиотехника и электроника.— 1990.— Т. 35, № 2.— С. 382—388.
13. Воторопин С. Д., Носков В. Я. Приемопередающие модули на слаботочных диодах Ганна для автодинных систем // Электронная техника. Сер. СВЧ-техника.— 1993.— Вып. 4.— С. 70—72.
14. Пат. 2064718 РФ. Диод Ганна / С. Д. Воторопин, А. М. Кожемякин, В. И. Юрченко.— 1996.— Бюл. № 21.
15. Воторопин С. Д. Исследование путей создания автодинных приемопередающих модулей в диапазоне 3—8 мм / Отчет по НИР «Тамаринд» (НИИПП, г. Томск)— 1989.
16. Воторопин С. Д. Разработка автодинных датчиков 5-мм диапазона длин волн для транспортной электроники / Отчет по ОКР «Тигель» (НИИПП, г. Томск)— 1991.
17. А. с. 1659933 СССР. Имитатор доплеровского сигнала / В. Т. Бузыкин, С. Д. Воторопин, В. Я. Носков.— 1991.— Бюл. № 24.
18. Воторопин С. Д. Автодинный КВЧ радиолокатор для контроля параметров движения автомобиля // IV Междунар. НТК «Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ».— Самара.— 1999.— С. 16—17.
19. Воторопин С. Д., Носков В. Я. Сигналы автодинов КВЧ-диапазона длин волн при контроле параметров подвижных объектов // Изв. вузов. Физика.— 2000.— Вып. 7.— С. 54—60.
20. Воторопин С. Д., Носков В. Я. Способы детектирования автодинного сигнала в КВЧ-генераторах на полупроводниковых диодах // Электронная промышленность.— 2002.— Вып. 2.— С. 117—123.

## ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

## 15-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» 12–16 сентября 2005 года, г. Севастополь

ДОКЛАДЫ НА КОНФЕРЕНЦИЮ ПРИНИМАЮТСЯ ДО 11 МАЯ 2005 г.  
ПО СЛЕДУЮЩИМ НАПРАВЛЕНИЯМ

*Твердотельные приборы и устройства СВЧ (в т. ч. интегрированные устройства для средств связи и локации, а также для сопряжения с оптоволоконными и цифровыми устройствами);  
Моделирование и автоматизированное проектирование твердотельных приборов и устройств;  
Электрорадиотехника и микроволновые приборы СВЧ;  
Системы СВЧ-связи, вещания и навигации (в т. ч. методики оценки эффективности сетей связи);  
Антенны и антенные элементы (в т. ч. оптические технологии в антенной технике);*

*Пассивные компоненты (в т. ч. устройства на магнитостатических волнах);  
Материалы и технология СВЧ-приборов, нанoeлектроника и нанотехнология;  
СВЧ-электроника сверхбольших мощностей и эффекты;  
СВЧ-измерения;  
Прикладные аспекты СВЧ-техники;  
СВЧ-техника в медицине и экологии;  
Радиоастрономия, дистанционное зондирование и распространение радиоволн;  
История СВЧ-техники и телекоммуникаций (доклады о юбилеях университетов, НИИ, КБ, журналов, исторических событий, выдающихся ученых).*

15-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»  
12–16 сентября 2005 г., Севастополь, Украина

КрыМиКо 2005 CrMiCo

September 12–16, 2005, Sevastopol, Ukraine  
15th International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology»

**РАБОЧИЕ ЯЗЫКИ КОНФЕРЕНЦИИ —  
РУССКИЙ И АНГЛИЙСКИЙ**

Тел./факс: +380-692-440982  
e-mail: crimico-2005@sinfo.net.ua  
crimico-2005@mail.com  
<http://www.crimico-2005.sinfo.net.ua>  
<http://ieee.orbita.ru/aps/crim05.rhtm>

К. т. н. Б. А. ДЕМЬЯНЧУК

Украина, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова  
E-mail: boris998877@rambler.ruДата поступления в редакцию  
13.08 2004 г.Оппонент к. т. н. Н. Н. КОБАК  
(НТУУ "КПИ", г. Киев)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ПРОНИЦАЕМОСТЕЙ ФЕРРОМАГНИТНЫХ КОМПОЗИТОВ

*Методика определения параметров ферромагнитных композитов позволяет однозначно вычислять значения их проницаемостей и проводимостей по данным распределения поля в волноводе.*

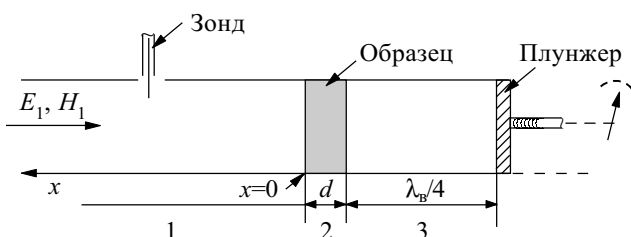
Определение составляющих комплексных проницаемостей образцов ферромагнитных материалов в заданном диапазоне частот осуществляется обычно громоздкими, сложными и плохо отработанными методами [1, 2], основанными на моделях, не адекватных конкретным ситуациям и не способствующих решению технологических задач, например, при отработке технологии создания материалов для экранирования радиоэлектронной аппаратуры.

В то же время требуется высокая точность и однозначность при решении, например, задачи точного согласования волнового сопротивления среды (с потерями) с воздушной средой, которое зависит от проницаемостей и проводимостей сред, т. е. от составляющих комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей.

Целью данной статьи является обсуждение сущности и особенностей оправдавшей себя и отработанной экспериментально модернизированной методики точного и однозначного оценивания электромагнитных параметров образцов полимерных ферромагнитных материалов, основанной на измерениях характеристик распределения поля в специально изготовленном измерительном волноводе с полосой пропускания в заданном диапазоне частот и на последующих расчетах.

Особенности расчета электрической и магнитной составляющих проницаемостей и проводимостей материала по данным измерений сводятся к следующему.

Пусть волноводный тракт составлен из трех участков (см. **рисунок**) — отрезка пустого волновода 1, участка 2, заполненного исследуемым материалом, отрезка 3 длиной  $\lambda_B/4$ .



Пусть начало пространственной координаты  $x$  совпадает с границей раздела участков 1 и 2, ось  $x$  направлена вдоль волновода справа налево.

В области 1 составляющие поля равняются

$$\dot{E}_1(x) = \dot{A}_{\pi 1} e^{\gamma_1 x} + \dot{A}_{o1} e^{-\gamma_1 x} = \dot{A}_{\pi 1} \left( e^{\gamma_1 x} + \frac{\dot{A}_{o1}}{\dot{A}_{\pi 1}} e^{-\gamma_1 x} \right); \quad (1)$$

$$\dot{H}_1(x) = \frac{\dot{A}_{\pi 1}}{W} e^{\gamma_1 x} - \frac{\dot{A}_{o1}}{W} e^{-\gamma_1 x} = \frac{\dot{A}_{\pi 1}}{W} \left( e^{\gamma_1 x} - \frac{\dot{A}_{o1}}{\dot{A}_{\pi 1}} e^{-\gamma_1 x} \right)$$

$$\gamma_1 = j \frac{2\pi}{\lambda_B} \quad \text{при } x > 0, \quad (2)$$

где  $\dot{A}_{\pi(o)}$  — комплексная амплитуда падающей (отраженной) волны;

$\frac{\dot{A}_{o1}}{\dot{A}_{\pi 1}} = \dot{\rho} = e^{-2\varphi} = e^{-2(\alpha + j\beta)}$  — комплексный коэффициент отражения (его параметры — коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  — зависят от проницаемостей материала и подлежат определению);

$W$  — характеристическое сопротивление пустого волновода.

На границе участков 1 и 2 ( $x=0$ ) получается характеристическое сопротивление в виде

$$\dot{Z}(0) = \frac{\dot{E}(0)}{\dot{H}(0)} = \frac{1 + \dot{\rho}}{1 - \dot{\rho}} W = W \frac{1 + e^{-2\varphi}}{1 - e^{-2\varphi}} = W \operatorname{cth} \varphi. \quad (3)$$

С учетом (2) поле имеет вид

$$\dot{E}_1(x) = \dot{A}_{\pi 1} \left[ e^{j \frac{2\pi}{\lambda_B} x} + e^{-j \left( \frac{2\pi}{\lambda_B} x + 2\beta \right)} \cdot e^{-2\alpha} \right];$$

$$\dot{H}_1(x) = \frac{\dot{A}_{\pi 1}}{W} \left[ e^{j \frac{2\pi}{\lambda_B} x} - e^{-2\alpha} \cdot e^{-j \left( \frac{2\pi}{\lambda_B} x + 2\beta \right)} \right]. \quad (4)$$

В точке первого узла, на некотором расстоянии от образца, равном  $l$ , когда разность фаз падающей и отраженной волн равняется  $\pi$ , т. е.

$$-\frac{2\pi}{\lambda_B} l + \left( -\frac{2\pi}{\lambda_B} l - 2\beta \right) = -\pi, \quad (5)$$

напряженность поля минимальна и имеет вид

$$E_{\min} = \dot{A}_{\pi 1} (1 - e^{-2\alpha}) = \dot{A}_{\pi 1} (1 - |\dot{\rho}|). \quad (6)$$

В пучности имеется напряженность

$$E_{\max} = \dot{A}_{\pi 1} (1 + e^{-2\alpha}) = \dot{A}_{\pi 1} (1 + |\dot{\rho}|). \quad (7)$$

Параметры  $\alpha$  и  $\beta$  коэффициента отражения  $\rho$  являются аргументами функции в виде сопротивления волновода на границе раздела 1 и 2. Их можно определить по результатам измерения величин  $l, \lambda_B, E_{\min}, E_{\max}$  в соответствии с (5)—(7) в виде

$$\beta = 2\pi \left( \frac{1}{4} - \frac{l}{\lambda_B} \right); \quad \alpha = \text{Ar th } \frac{E_{\min}}{E_{\max}}; \quad (8)$$

$$\text{th } \alpha = \frac{1 - e^{-2\alpha}}{1 + e^{-2\alpha}} = \frac{e^\alpha - e^{-\alpha}}{e^\alpha + e^{-\alpha}} = \frac{E_{\min}}{E_{\max}}, \quad (9)$$

где отношение  $E_{\min}/E_{\max} = r$  — коэффициент бегущей волны.

Относительное характеристическое (волновое) входное сопротивление  $Z(0)/W$  с учетом (2), (8), (9) запишется в виде

$$\frac{Z(0)}{W} = \frac{1 + e^{-2\varphi}}{1 - e^{-2\varphi}} = \frac{e^\varphi + e^{-\varphi}}{e^\varphi - e^{-\varphi}} = \frac{e^{\alpha+j\beta} + e^{-\alpha-j\beta}}{e^{\alpha+j\beta} - e^{-\alpha-j\beta}} = \frac{e^\alpha e^{j\beta} + e^{-\alpha} e^{-j\beta}}{e^\alpha e^{j\beta} - e^{-\alpha} e^{-j\beta}} = \frac{\text{th } \alpha - j \text{ctg } \beta}{1 - j \text{th } \alpha \cdot \text{ctg } \beta} = \frac{r - j \text{tg } 2\pi \frac{l}{\lambda_B}}{1 - jr \text{tg } 2\pi \frac{l}{\lambda_B}}. \quad (10)$$

Сопротивление  $Z(0)$ , являющееся функцией параметров материала образца, помещенного в волновод, зависит, как следует из (10), от трех измеряемых на участке  $l$  величин —  $r, l, \lambda_B$ . Оно зависит также и от того, в максимум или минимум поля помещен образец, т. е. в пучности или в узле распределения поля в пустом волноводе помещается исследуемый материал.

Получим эти зависимости.

На участке 2, заполненном образцом, поле имеет вид

$$E_2(x) = A_{п2} e^{\gamma_2 x} + A_{о2} e^{-\gamma_2 x};$$

$$H_2(x) = \frac{A_{п2}}{Z_2} e^{\gamma_2 x} - \frac{A_{о2}}{Z_2} e^{-\gamma_2 x}, \quad (11)$$

где  $Z_2$  — волновое сопротивление волновода, заполненного исследуемым материалом;

$\gamma_2$  — постоянная распространения в волноводе с образцом.

Известно, что для волны  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе величины  $Z_2$  и  $\gamma_2$  зависят от искомых проницаемостей  $\epsilon$  и  $\mu$  в виде

$$Z_2 = W \mu = \frac{1 - \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}} \right)^2}{\mu \epsilon - \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}} \right)^2}; \quad \gamma_2 = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\mu \epsilon - \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_B} \right)^2}, \quad (12)$$

где  $\lambda_0$  — длина волны в свободном пространстве;

$\lambda_{кр} = 2a_0$ ;

$a_0$  — размер широкой стенки волновода.

Следовательно, для определения  $\epsilon$  и  $\mu$  достаточно  $Z_2$  и  $\gamma_2$  выразить через сопротивление  $Z(0)/W$ , зависящее от измеряемых величин  $r, l, \lambda_B$  на участке  $l$ .

Величина  $Z(0)$  должна быть определена для двух случаев:

а) короткозамыкающая пластина отстоит на  $\lambda_B/4$  от задней границы образца, т. е.  $x_{кз} = -d - \lambda_B/4$  (волновод открыт);

б) короткозамыкающая пластина находится непосредственно у задней стенки образца, т. е.  $x_{кз} = -d$ ; это позволит после измерений составить систему из двух уравнений с двумя неизвестными для однозначного определения величин  $Z_2$  и  $\gamma_2$ .

Для случая а), согласно (10) и (11), электрическую компоненту поля в месте короткого замыкания выразим в виде

$$0 = A_{п2} e^{-\gamma_2 d} \cdot e^{-\gamma_1 \frac{\lambda_B}{4}} + A_{о2} e^{\gamma_2 d} \cdot e^{-\gamma_1 \frac{\lambda_B}{4}} =$$

$$= \left( -A_{п2} e^{-\gamma_2 d} + A_{о2} e^{\gamma_2 d} \right) \cdot e^{-\gamma_1 \frac{\lambda_B}{4}} \Rightarrow \frac{A_{о2}}{A_{п2}} = e^{-2\gamma_2 d}. \quad (13)$$

Из (11), учитывая (13), получаем сопротивление  $Z(0)$  для случая а) в виде

$$Z_0(0) = \frac{E_2(0)}{H_2(0)} = Z_2 \frac{A_{п2} + A_{о2}}{A_{п2} - A_{о2}} =$$

$$= Z_2 \frac{1 + e^{-2\gamma_2 d}}{1 - e^{-2\gamma_2 d}} = Z_2 \text{cth } \gamma_2 d. \quad (14)$$

В случае б) получим:

$$0 = A_{п2} e^{-\gamma_2 d} + A_{о2} e^{\gamma_2 d} \Rightarrow \frac{A_{о2}}{A_{п2}} = -e^{-2\gamma_2 d}. \quad (15)$$

Тогда, подобно (14), получим  $Z(0)$  для случая б) — сопротивление короткого замыкания — в виде

$$Z_к(0) = \frac{E_2(0)}{H_2(0)} = Z_2 \frac{1 - e^{-2\gamma_2 d}}{1 + e^{-2\gamma_2 d}} = Z_2 \text{th } \gamma_2 d. \quad (16)$$

Из (14) и (16) следуют искомые функции в виде

$$\gamma_2 = \frac{1}{d} \text{Ar th } \sqrt{\frac{Z_к(0)}{Z_0(0)}}; \quad (17)$$

$$Z_2 = \sqrt{Z_0(0) \cdot Z_к(0)}. \quad (18)$$

В результате из (12), согласно (17) и (18), учитывая (10), а также зависимости  $\epsilon$  и  $\mu$  от проводимостей  $\sigma_3, \sigma_M$

$$\epsilon = \epsilon - j \frac{\sigma_3}{\epsilon_0 \cdot 2\pi f_0}, \quad \mu = \mu - j \frac{\sigma_M}{\mu_0 \cdot 2\pi f_0}, \quad (19)$$

получаются искомые параметры исследуемого материала с учетом частоты генератора  $\omega_0$  в виде

$$\epsilon = \text{Re} \left\{ \frac{j \sqrt{1 - \left[ \frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}} \right]^2}}{\frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{Z_2}{W} \gamma_2} \left[ \left( \frac{2\pi}{\lambda_{кр}} \right)^2 - \gamma_2^2 \right] \right\};$$

$$\sigma_3 = \epsilon_0 \omega_0 \text{Im} \left\{ \frac{j \sqrt{1 - \left[ \frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}} \right]^2}}{\frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{Z_2}{W} \gamma_2} \left[ \frac{2\pi}{\lambda_{кр}} - \gamma_2^2 \right] \right\};$$

$$\mu = \operatorname{Re} \left\{ \frac{\frac{Z_2}{W} \gamma_2}{\frac{2\pi}{\lambda_0} j \sqrt{1 - \left[ \frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{кр}}} \right]^2}} \right\}; \quad \mu = \mu_0 \omega_0 \operatorname{Im} \left\{ \frac{\frac{Z_2}{W} \gamma_2}{\frac{2\pi}{\lambda_0} j \sqrt{1 - \left[ \frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{кр}}} \right]^2}} \right\};$$

$$\text{где } \frac{Z_2}{W} = \left[ \frac{\left( r_k - j \operatorname{tg} 2\pi \frac{l_k}{\lambda_{\text{БК}}} \right) \left( r_0 - j \operatorname{tg} 2\pi \frac{l_0}{\lambda_{\text{ВО}}} \right)}{\left( 1 - j r_k \operatorname{tg} 2\pi \frac{l_k}{\lambda_{\text{БК}}} \right) \left( 1 - j r_0 \operatorname{tg} 2\pi \frac{l_0}{\lambda_{\text{ВО}}} \right)} \right]^{\frac{1}{2}};$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{d} \operatorname{Arth} \left[ \frac{\left( r_k - j \operatorname{tg} 2\pi \frac{l_k}{\lambda_{\text{БК}}} \right) \left( 1 - j r_0 \operatorname{tg} 2\pi \frac{l_0}{\lambda_{\text{ВО}}} \right)}{\left( 1 - j r_k \operatorname{tg} 2\pi \frac{l_k}{\lambda_{\text{БК}}} \right) \left( r_0 - j \operatorname{tg} 2\pi \frac{l_0}{\lambda_{\text{ВО}}} \right)} \right]^{\frac{1}{2}};$$

$\lambda_{\text{ВО}}/\lambda_{\text{БК}}$  — длина волны в открытом (короткозамкнутом) волноводе.

Последовательность операций, позволяющих однозначно определять параметры исследуемого материала  $\epsilon$ ,  $\sigma$ ,  $\mu$ ,  $\sigma_M$ , приводится ниже.

**Р**асчет параметров образцов включает следующие этапы.

1. Измерить длину волны генератора  $\lambda_0$ , размер широкой стенки волновода  $a_0$  и среднюю толщину образца  $d$ , электромагнитные параметры которого необходимо однозначно определить.

2. Измерить с помощью модернизированной измерительной линии параметры:

$r_0 = \frac{E_0^{\min}}{E_0^{\max}}$  — коэффициент бегущей волны открытого волновода;

$r_k = \frac{E_k^{\min}}{E_k^{\max}}$  — коэффициент бегущей волны короткозамкнутого волновода;

$\lambda_{\text{ВО}} = \left( l_{oi}^{\min} - l_{oi-1}^{\min} \right) \cdot 2$  — длину волны в открытом волноводе;

$\lambda_{\text{БК}} = \left( l_{ki}^{\min} - l_{ki-1}^{\min} \right) \cdot 2$  — длину волны в короткозамкнутом волноводе;

$l_0 = l_{\text{кон}} - l_{\text{о кон}}^{\min}$  — удаление первого минимума от образца в открытом волноводе;

$l_k = l_{\text{кон}} - l_{\text{к кон}}^{\min}$  — удаление первого минимума от образца в короткозамкнутом волноводе.

3. Вычислить величины

$$T_0 = \operatorname{tg} 2\pi \frac{l_0}{\lambda_{\text{ВО}}}; \quad T_k = \operatorname{tg} 2\pi \frac{l_k}{\lambda_{\text{БК}}}.$$

4. Проверить условия

$$\xi = \frac{T_k T_0 (1 - r_k^2) (1 - r_0^2)}{r_k r_0 (1 + T_k^2) (1 + T_0^2)} \gg -1; \quad T_k \gg 0.$$

5. Вычислить корень из отношения волновых сопротивлений:

$$\sqrt{\frac{Z_k W}{W Z_0}} = a e^{-j \frac{1}{2} \rho}, \quad a = \frac{(T_k^2 - T_0^2) (1 + r_0^2 T_0^2)}{(1 - r_k^2 T_k^2) (T_0^2 + T_0^2)};$$

$$\rho = \begin{cases} \operatorname{arctg} \frac{r_0 T_k (1 - r_k^2) (1 + T_0^2) - r_k T_0 (1 - r_0^2) (1 + T_k^2)}{r_0 r_k (1 + T_k^2) (1 + T_0^2) + T_k T_0 (1 - r_k^2) (1 - r_0^2)}, & \text{если } \xi > -1; \\ \pi + \operatorname{arctg} \frac{r_0 T_k (1 - r_k^2) (1 + T_0^2) - r_k T_0 (1 - r_0^2) (1 + T_k^2)}{r_0 r_k (1 + T_k^2) (1 + T_0^2) + T_k T_0 (1 - r_k^2) (1 - r_0^2)}, & \text{если } \xi < -1, T_k > 0; \\ -\pi + \operatorname{arctg} \frac{r_0 T_k (1 - r_k^2) (1 + T_0^2) - r_k T_0 (1 - r_0^2) (1 + T_k^2)}{r_0 r_k (1 + T_k^2) (1 + T_0^2) + T_k T_0 (1 - r_k^2) (1 - r_0^2)}, & \text{если } \xi < -1, T_k < 0. \end{cases}$$

Необходимость усложнения операции вычисления фазы (в данном случае  $\rho$ ) с помощью условных переходов объясняется тем, что необходимо учесть зависимость

$$Z = \alpha + j\beta = d e^{j\varphi}; \quad d = |Z|; \quad \varphi = \arg Z,$$

а также то, что область главных значений аргумента комплексного числа  $Z$ , равная  $-\pi \leq \arg Z \leq \pi$ , не полностью совпадает с областью главных значений

$$\operatorname{arctg} \frac{\beta}{\alpha}, \quad \text{которая равняется } -\frac{\pi}{2} < \arg \frac{\beta}{\alpha} < \frac{\pi}{2}.$$

6. Записать постоянную распространения  $\gamma_2$ :

$$\gamma_2 = \begin{cases} \frac{1}{d} \operatorname{Arth} \left( a e^{-j \frac{1}{2} \rho} \right), & \text{если } a > 1; \end{cases}$$

$$\gamma_2 = \begin{cases} \frac{1}{2d} \ln \frac{1 + a e^{-j \frac{1}{2} \rho}}{1 - a e^{-j \frac{1}{2} \rho}}, & \text{если } a < 1. \end{cases}$$

7. Найти значение коэффициента затухания  $P$  в составе постоянной распространения (коэффициент фазы  $q$  определяется в п. 9):

$$\gamma_2 = \frac{1}{4d} \ln \frac{1 + a^2 + 2a \cdot \cos \frac{1}{2} \rho}{1 + a^2 - 2a \cdot \cos \frac{1}{2} \rho} - j \frac{1}{2d} q = \frac{1}{4d} P - j \frac{1}{2d} q;$$

$$P = \ln \frac{1 + a^2 + 2a \cdot \cos \rho / 2}{1 + a^2 - 2a \cdot \cos \rho / 2}.$$

8. Проверить условия

$$\zeta = \frac{a^2 \cdot \sin^2 \frac{1}{2} \rho}{1 - a^2} \gg 1; \quad \eta = \frac{a \cdot \sin \frac{1}{2} \rho}{1 + a \cdot \cos \frac{1}{2} \rho} \gg 0;$$

$$\delta = a \cdot \cos \frac{1}{2} \rho \gg 1.$$

9. Вычислить коэффициенты фазы:

$$q = \begin{cases} \operatorname{arctg} \frac{2a \cdot \sin \frac{1}{2} \rho}{1 - a^2}, & \text{если } \zeta < 1, \delta < 1; \\ \pi + \operatorname{arctg} \frac{2a \cdot \sin \frac{1}{2} \rho}{1 - a^2}, & \text{если } \zeta > 1, \eta > 0, \delta < 1; \end{cases}$$

$$q = \begin{cases} -\pi + \operatorname{arctg} \frac{2a \cdot \sin \frac{1}{2} \rho}{1 - a^2}, & \text{если } \zeta > 1, \eta < 0, \delta < 1; \\ \operatorname{arctg} \frac{2a \cdot \sin \frac{1}{2} \rho}{1 - a^2}, & \text{если } \zeta > 1, \delta > 1. \end{cases}$$

10. Вычислить постоянную распространения:

$$\gamma_2 = \alpha \cdot e^{-j\beta} = \sqrt{\left(\frac{1}{4d} p\right)^2 + \left(\frac{1}{2d} q\right)^2} \cdot e^{-j \operatorname{arctg} \left(\frac{2q}{p}\right)};$$

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{1}{4d} p\right)^2 + \left(\frac{1}{2d} q\right)^2}; \quad \beta = \operatorname{arctg} \left(\frac{2q}{p}\right).$$

11. Проверить условие

$$\xi = \frac{T_k T_o (1 - r_k^2) (1 - r_o^2)}{r_k r_o (1 + T_k^2) (1 + T_o^2)} \gg 1.$$

12. Вычислить среднегеометрическое значение произведения  $Z_k Z_o$ :

$$\frac{Z_2}{W} = \sqrt{\frac{Z_k Z_o}{W^2}} = b \cdot e^{-j \frac{1}{2} g}, \quad b = 4 \sqrt{\frac{(r_k^2 + T_k^2)(r_o^2 + T_o^2)}{(1 - r_k^2 T_k^2)(1 + r_o^2 T_o^2)}};$$

$$g = \begin{cases} \operatorname{arctg} \frac{r_k T_k (1 - r_k^2) (1 + T_o^2) + r_k T_o (1 - r_o^2) (1 + T_k^2)}{r_k r_o (1 + T_k^2) (1 + T_o^2) - T_k T_o (1 - r_k^2) (1 - r_o^2)}, & \text{если } \xi < 1; \\ \pi + \operatorname{arctg} \frac{r_k T_k (1 - r_k^2) (1 + T_o^2) + r_k T_o (1 - r_o^2) (1 + T_k^2)}{r_k r_o (1 + T_k^2) (1 + T_o^2) - T_k T_o (1 - r_k^2) (1 - r_o^2)}, & \text{если } \xi > 1, T_k > 0; \\ -\pi + \operatorname{arctg} \frac{r_k T_k (1 - r_k^2) (1 + T_o^2) + r_k T_o (1 - r_o^2) (1 + T_k^2)}{r_k r_o (1 + T_k^2) (1 + T_o^2) - T_k T_o (1 - r_k^2) (1 - r_o^2)}, & \text{если } \xi > 1, T_k < 0. \end{cases}$$

13. Вычислить произведение постоянной распространения на значение волнового сопротивления:

$$x = \gamma_2 \frac{Z_2}{W} = b \alpha \cos \left(\frac{g}{2} + \beta\right) - j b \alpha \sin \left(\frac{g}{2} + \beta\right).$$

14. Вычислить обратную величину произведения:

$$y = \frac{1}{\gamma_2 Z_2} = \frac{1}{b \alpha} \cdot \cos \left(\frac{g}{2} + \beta\right) + j \frac{1}{b \alpha} \cdot \sin \left(\frac{g}{2} + \beta\right).$$

15. Вычислить отношение постоянной распространения к значению волнового сопротивления и константы  $D, C, E$ :

$$z = \frac{\gamma_2}{Z_2} = \frac{\alpha}{b} \cdot \cos \left(\frac{g}{2} - \beta\right) + j \frac{\alpha}{b} \cdot \sin \left(\frac{g}{2} - \beta\right);$$

$$D = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_o}{\lambda_{кр}}\right)^2}; \quad C = \frac{2\pi}{\lambda_o}; \quad E^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\right)^2 = \left(\frac{2\pi}{2a_o}\right)^2.$$

16. Вычислить искомую диэлектрическую проницаемость:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon} &= \epsilon - j \frac{\sigma_3}{\epsilon_o \omega_o} = j \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_o}{\lambda_{кр}}\right)^2}}{\frac{2\pi}{\lambda_o}} \frac{1}{\frac{\gamma_2 Z_2}{W}} \left[ \left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\right)^2 - \gamma_2^2 \right] = \\ &= j \frac{D}{C} E^2 y - j \frac{D}{C} z. \end{aligned}$$

17. Вычислить искомую магнитную проницаемость:

$$\dot{\mu} = \mu - j \frac{\sigma_M}{\mu_o \omega} = j \frac{\frac{\gamma_2 Z_2}{W}}{\frac{2\pi}{\lambda_o} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_o}{\lambda_{кр}}\right)^2}} = -j \frac{1}{DC} x.$$

18. Вычислить удельную электрическую и магнитную проводимость и относительную диэлектрическую и магнитную проницаемость:

$$\sigma_3 = \epsilon_o 2\pi f_o \operatorname{Im} \dot{\epsilon}, \quad \epsilon = \operatorname{Re} \left\{ j \frac{D}{C} E^2 y - j \frac{D}{C} z \right\};$$

$$\sigma_M = \mu_o 2\pi f_o \operatorname{Im} \dot{\mu}, \quad \mu = \operatorname{Re} \left\{ -j \frac{1}{DC} x \right\}.$$

Расчеты с помощью ЭВМ по громоздким формулам многократно упрощают эту процедуру.

\*\*\*

Подводя итоги, отметим некоторые важные моменты.

1. Задача точного контроля электромагнитных параметров, т. е. проницаемостей и проводимостей образцов композитов, в процессе синтеза материалов требует совершенного оборудования и изобретательности исследователей.

2. Модернизированная методика измерений, предлагаемая здесь, является вполне приемлемой и по точностным показателям, и по сложности в реализации, и по простоте технологического оборудования. Она позволяет (за счет оперативного и точного контроля) целенаправленно корректировать их параметры в заданном конкретном направлении, например с целью согласования волновых сопротивлений сред, с учетом требований, обсуждаемых ранее [3]. (Речь идет о согласовании, повышающем эффективность решения различных прикладных задач, в частности, экранирования радиоэлектронной аппаратуры от промышленных помех или электромагнитной развязки узлов при создании этой аппаратуры.)

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Саусворт Дж. К. Принципы и применения волновой передачи.— М.: Сов. радио, 1955.
2. Никольский В. В., Никольская Т. И. Электродинамика и распространение радиоволн.— М.: Наука, 1989.
3. Демьянчук Б. А. Основы технологии согласования волновых сопротивлений на границе воздуха и ферромагнитной среды // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2004.— № 5.— С. 19—22.

К. т. н. А. Г. СОРОЧАН

Украина г. Донецк, НИИ комплексной автоматизации  
E-mail: niika@dn.farlep.netДата поступления в редакцию  
08.11 2004 г.Оппонент д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ  
(ДонНУ, г. Донецк)РАДИОДАЛЬНОМЕР НА ОСНОВЕ  $J$ -КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА ОБРАБОТКИ СИГНАЛА

*Впервые предложен радиодальномер, реализованный на основе корреляционной обработки сигнала. Получены полезные соотношения, дающие оценку предложенного метода.*

Корреляционные методы обработки получили широкое распространение в радиотехнических системах, однако в радиолокационных станциях применение этих методов ограничено. Прежде всего это связано с неблагоприятным влиянием эффекта Доплера на корреляционную функцию, т. к. в этом случае максимум корреляционной функции  $R(z)$  при  $z = 0$  уменьшается и изменяется ход корреляционной функции. Поэтому локация движущихся целей с помощью корреляционной пеленгации сильно затруднена [1, с. 112]. В [2] предложен метод измерения дальности, основанный на  $J$ -корреляционной обработке сигнала [3].

Цель работы — статистический анализ радиодальномера на основе  $J$ -корреляционной обработки сигнала, определение потенциальной точности измерения.

Структурная схема радиодальномера приведена на рисунке, где Ан.1, Ан.2 — передающая и приемная антенны, соответственно, ЛТ — линейный тракт, УМ — усилитель мощности, КГ — кварцевый генератор, РЛЗ — калиброванная регулируе-

мая линия задержки, СМ — смеситель, X1—X3 — первый — третий множители, ЛЗ — линия задержки, ФНЧ — фильтр нижних частот, УПФ — узкополосный полосовой фильтр, ГНЧ — генератор низкой частоты, УЦО — устройство цифровой обработки сигнала.

В модуляторе на частоте  $W_c$  формируется ЧМ-сигнал, модулированный по частоте гармоническим колебанием с частотой  $\Omega$  и индексом модуляции  $\beta$ , т. е.

$$U(t) = U_c \cos[W_c t + \beta \sin(\Omega t + \varphi)], \quad (1)$$

где  $U$  и  $\varphi$  — амплитуда и начальная фаза сигнала.

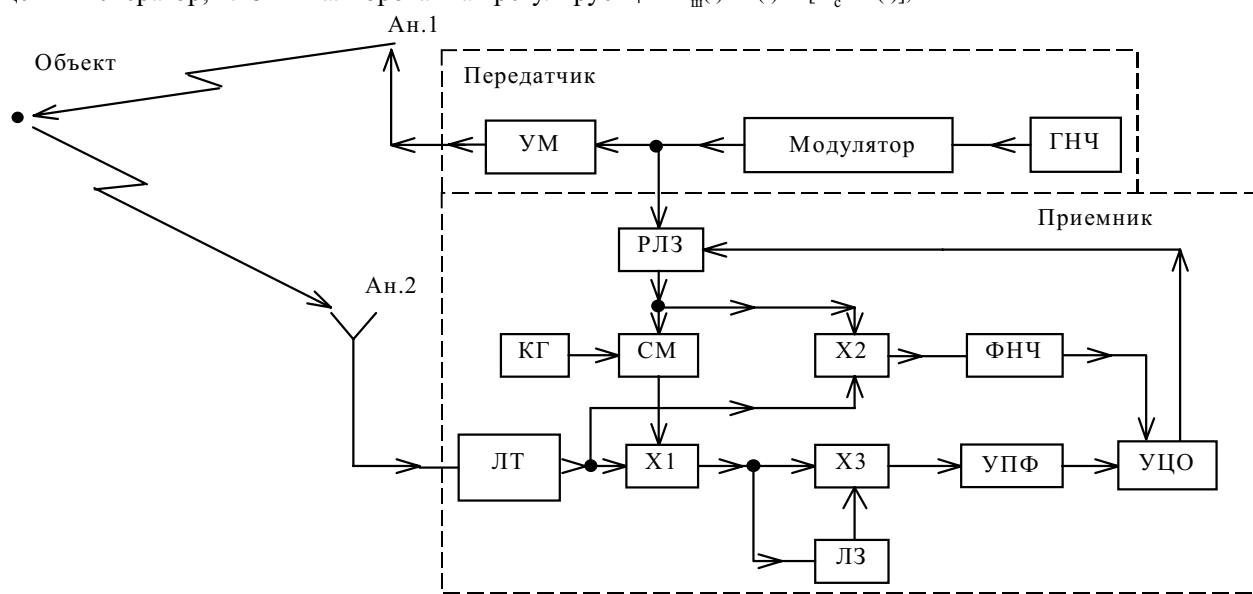
Сигнал (1) делится на две части, одна из которых после усиления излучается в пространство. Отраженный от объекта сигнал с пространственно-временной задержкой  $\tau = 2D/C$  ( $D$  — расстояние до объекта,  $C$  — скорость распространения электромагнитной волны в свободном пространстве) поступает на вход приемника, в котором выходной сигнал усилителя ВЧ, содержащий две составляющие — сигнальную  $U_c(t-\tau)$  и шумовую  $U_{ш}(t)$ , можно представить как

$$S(t) = U_c(t-\tau) + U_{ш}(t) = U_c \cos[W_c(t-\tau) + W_d t + \beta \sin(\Omega(t-\tau) + \varphi)] + U_{ш}(t), \quad (2)$$

где  $U_c$  — амплитуда сигнала;

$U_{ш}(t)$  — нормальный стационарный шумовый процесс в полосе частот  $\Delta\Omega$  со средней частотой  $W_c > \Delta\Omega$ ;

$$U_{ш}(t) = A(t) \cos[W_c t + \Phi(t)];$$



Структурная схема радиодальномера

$\Delta\Omega$  — входная полоса приемника;  
 $A(t)$  — огибающая;  
 $\Phi(t)$  — мгновенная фаза, равномерно распределенная на интервале  $0-2\pi$ ;  
 $W_d$  — частота доплеровского сдвига (для движущегося объекта).

Корреляционная функция шумового процесса описывается выражением  $R_{\text{ш}}(z)=\sigma_{\text{ш}}^2\rho(z)$ , у которой  $\sigma_{\text{ш}}^2$  — дисперсия процесса, а  $\rho(z)=\sin(\Delta\Omega z)/\Delta\Omega z$  — коэффициент корреляции.

Вторая часть сигнала (1) после задержки в РЛЗ на время  $\theta_x$  и преобразования в смесителе СМ имеет вид

$$U(t-\theta_x)=U\cos[(W_c-W_r)(t-\theta_x)+\beta\sin(\Omega(t-\theta_x)+\varphi)], \quad (3)$$

где  $W_r$  — частота гетеродина.

Сигнал (3) перемножается в Х1 с отраженным сигналом (2), из результата перемножения на его выходе выделяется сигнал

$$S_1(t)=[U_c(t-\tau)+U_{\text{ш}}(t)]U(t-\theta_x)=$$

$$=K_1U_c\cos[W_r t+W_d t+2\beta\sin(0,5\Omega(\theta_x-\tau)]\times$$

$$\times\cos\Omega[t-0,5\Omega(\tau+\theta_x)]+\varphi]+2K_1A(t)\cos[W_c t+\Phi(t)]\times$$

$$\times\cos[(W_c-W_r)(t-\theta_x)-\beta\sin(\Omega(t-\theta_x)+\varphi)],$$

где  $K_1$  — коэффициент пропорциональности;  
 $\varphi=W_c(\theta_x-\tau)-W_r\theta_x$ .

Полученный сигнал  $S_1(t)$  делится на две равные части  $S_1'(t)=S_1''(t)=0,5S_1(t)$ , одна из которых  $S_1'(t)$  задерживается на время  $\tau_1$ . Значение задержки определяется интервалом корреляции шумового напряжения. Сигналы  $S_1'(t)$  и  $S_1''(t)$ , детерминированные функции которых выражены в виде ряда суммы гармонических составляющих с коэффициентами разложения по функциям Бесселя, определяются в виде

$$S_1'(t)=0,5K_1U_c\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_n(\beta')\cos[(W_r+W_d)t+$$

$$+n\Omega[t-0,5(\tau+\theta_x)]+n\varphi'+\varphi]+K_1A(t)\cos[W_c t+\Phi(t)]\times$$

$$\times\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_n(\beta)\cos[(W_c-W_r)(t-\theta_x)+n\Omega(t-\theta_x)+n\varphi]=S_c'(t)+S_{\text{ш}}'(t); \quad (4)$$

$$S_1''(t)=0,5K_1U_c\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_n(\beta')\cos[(W_r+W_d)(t-\tau_1)+$$

$$+n\Omega[(t-\tau_1-0,5(\tau+\theta_x)]+n\varphi''+\varphi]+K_1A(t-\tau_1)\times$$

$$\times\cos[W_c(t-\tau_1)+\Phi(t)]\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_n(\beta)\cos[(W_c-W_r)(t-\theta_x-\tau_1)+$$

$$+n\Omega(t-\theta_x-\tau)+n\varphi]=S_c''(t)+S_{\text{ш}}''(t), \quad (5)$$

где  $J_n(\beta)$  — функция Бесселя  $n$ -го порядка от аргумента  $\beta$ ;  
 $\varphi'= \varphi+0,5\pi$ .

Сигнальные составляющие  $S_c'(t)$ ,  $S_c''(t)$  расположены на несущей частоте  $W_r+W_d$  и содержат спектральные составляющие, кратные частоте  $\Omega$ , уровень которых  $0,5K_1U_cJ_n(\beta')$  определяется вновь сформированным индексом модуляции

$$\beta'=2\beta\sin[0,5\Omega(\theta_x-\tau)]. \quad (6)$$

Значение  $\beta'$  зависит от разности временных задержек РЛЗ  $\theta$  и пространственной  $\tau$ . Шумовые составляющие  $S_{\text{ш}}'(t)$  и  $S_{\text{ш}}''(t)$  расположены на центральной частоте  $W_r$  и описываются корреляционной функцией

$$R_{\text{ш}1}(z)=B\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_n^2(\beta)\sigma_{\text{ш}}^2\rho(z)\cos[(W_r+n\Omega)z],$$

где  $B$  — коэффициент пропорциональности.

Спектры сигналов (4) и (5) перемножаются в Х3. Из результата перемножения спектральных составляющих  $n$ -го порядка со спектральными составляющими  $(n-1)$  и  $(n+1)$  порядков фильтром УПФ с центральной частотой  $\Omega$  выделяется сигнал

$$U_1(t)=S_c'(t)S_c''(t)+S_{\text{ш}}'(t)S_c''(t)+S_c'(t)S_{\text{ш}}''(t)+S_{\text{ш}}'(t)S_{\text{ш}}''(t),$$

в котором

$$S_{\infty\text{cc}}(t)=S_c'(t)S_c''(t)=KU_c^2\times$$

$$\times\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_n(\beta')J_{(n-1)}(\beta')\cos[\Omega t+\Psi_{11}]; \quad (7)$$

$$S_{\infty\text{шc}}(t)=S_{\text{ш}}'(t)S_c''(t)=KU_cA(t)\times$$

$$\times\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_n(\beta')J_{(n-1)}(\beta)\cos[\Omega t+\Psi_{12}+\Phi(t)];$$

$$S_{\infty\text{см}}(t)=S_c'(t)S_{\text{ш}}''(t)=KU_cA(t-\tau_1)\times$$

$$\times\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_n(\beta')J_{(n-1)}(\beta)\cos[\Omega t+\Psi_{13}+\Phi(t-\tau_1)];$$

$$S_{\infty\text{шш}}(t)=S_{\text{ш}}'(t)S_{\text{ш}}''(t)=KA_1(t-\tau_1)\times$$

$$\times\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_n(\beta)J_{(n-1)}(\beta)\cos[\Omega t+\Psi_{14}+\Phi_1(t)],$$

где  $K$  — коэффициент пропорциональности;

$$\Psi_{11}=-0,5\Omega(\tau_1+\theta_x+\tau)+\varphi;$$

$$\Psi_{12}=\Psi_{13}=-0,5\Omega(\tau_1+1,5\theta_x+0,5\tau)+\varphi;$$

$A_1(t-\tau_1)$ ,  $\Phi_1(t)$  — огибающая и фаза вновь сформированного шумового сигнала;

$$\Psi_{14}=\Psi+\varphi.$$

Сигнальная составляющая  $S_{\text{cc}}(t)$  представляет собой гармонический сигнал с частотой  $\Omega$  и не зависит от радиальной скорости объекта. Уровень этого сигнала определяется суммой произведений амплитуд спектральных составляющих, описываемых функционалами Бесселя  $J_n(\beta')$  порядков  $(n-1)$  и  $n$ . Из (6) и (7) следует, что функционал Бесселя является строгой периодической зависимостью от разностной временной задержки  $(\theta_x-\tau)$  [4]. Следовательно, однозначное определение дальности ограничено. Поведение функционала Бесселя на периоде его действия определяется величиной индекса модуляции  $\beta$ , а однозначность отсчета измеряемой дальности определяется постоянством знака производной функционала или равенством ее нулю на интервалах временных задержек  $(\theta_x-\tau)>0$  и  $(\theta_x-\tau)<0$ . Графическое решение выражения  $S_{\text{cc}}(t)$ , описывающего огибающую сигнала, показывает, что максимальная продолжительность участка с постоянным знаком производной достигается при максимальном значении индекса модуляции  $\beta'_M=\beta'_M=1,6$ . Тогда из выражения (6) следует, что максимальное значение индекса модуляции  $\beta$  излучаемого сигнала не может превышать значения  $\beta_M=0,8$ , т. к.  $\sin[0,5\Omega(\theta_x-\tau)]$  1. Из условия  $\sin[0,5\Omega(\theta_x-\tau)]=1$  определяется максимальная дальность однозначного отсчета  $D_{\text{макс}}=\pi C/2\Omega$ . Из полученного выражения следует, что максимально измеряемая дальность обратно пропорциональна удвоенному значению модулирующей частоты  $\Omega$ .

Для полного представления случайных процессов  $S_{\text{шc}}(t)$ ,  $S_{\text{см}}(t)$  и  $S_{\text{шш}}(t)$  определим их корреляционные функции, которые запишутся в виде

$$R_{\text{см}}(z)=\overline{S_{\text{см}}(t)S_{\text{см}}(t-z)}=K^2U_c^2\times$$

$$\times\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_n^2(\beta')J_{(n-1)}^2(\beta)\sigma_{\text{ш}}^2\rho(z)\cos[\Omega z]; \quad (8)$$

$$R_{\text{шс}}(z) = \overline{S_{\text{шс}}(t)S_{\text{шс}}(t-z)} = K^2 U_c^2 \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(\beta') J_{(n-1)}^2(\beta) \sigma_{\text{ш}}^2 \rho(z) \cos[\Omega z]; \quad (9)$$

$$R_{\text{шсш}}(z) = \overline{S_{\text{шсш}}(t)S_{\text{шсш}}(t-z)} = K^2 \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(\beta') J_{(n-1)}^2(\beta) \sigma_{\text{ш}}^4 \rho^2(z) \cos[\Omega z],$$

где прямая линия означает математическое ожидание.

Из выражений (8), (9) следует, что ширина спектра шума составляющих  $S_{\text{шс}}(t)$ ,  $S_{\text{сш}}(t)$  на выходе перемножителя ХЗ равна ширине спектра шума на входе, т. е. выходной процесс является нормальным стационарным, тогда как составляющая  $S_{\text{шсш}}(t)$  нормализуется после прохождения УПФ.

Среднеквадратическое отклонение шумового напряжения, образованного суммой шумовых составляющих  $S_{\text{шс}}(t)$ ,  $S_{\text{сш}}(t)$  и  $S_{\text{шсш}}(t)$  на выходе УПФ с полосой  $\Delta z < \Delta \Omega$  и центральной частотой  $\Omega$ , определяется выражением

$$\sigma_{\text{ш1}} = K \left[ \left( \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(\beta) J_{(n-1)}^2(\beta) \sigma_{\text{ш}}^4 + 4U_c^2 \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(\beta') J_{(n-1)}^2(\beta) \sigma_{\text{ш}}^2 \right) \frac{\Delta z}{2\Delta \Omega} \right]^{0,5}.$$

При приближении разности временных задержек  $(\theta_x - \tau)$  к нулю в устройстве устанавливается режим, при котором индекс модуляции  $\beta' < 0,5$ . На этом участке сигнальная составляющая будет описываться выражением

$$S_{\text{сш}}(t) = KU_c^2 \sum_{n=1}^1 J_n(\beta') J_{(n-1)}(\beta') \cos[\Omega t + \Psi_{11}], \quad (10)$$

а шумовая — оцениваться среднеквадратическим отклонением:

$$\sigma_{\text{ш1}} = K \left[ \left( \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(\beta) J_{(n-1)}^2(\beta) \sigma_{\text{ш}}^4 + 4U_c^2 \sum_{n=1}^1 J_n^2(\beta') J_{(n-1)}^2(\beta) \sigma_{\text{ш}}^2 \right) \frac{\Delta z}{2\Delta \Omega} \right]^{0,5}.$$

При малых значениях  $\beta'$  и уменьшении его до нуля множитель  $J_0(\beta') = 1$ . Поэтому на этом участке изменения  $\beta'$  поведение  $S_{\text{сш}}(t)$  (10) определяется множителем  $J_1(\beta')$ , для которого при установлении в РЛЗ временной задержки  $\theta_x = \theta_0 = \tau$  индекс модуляции  $\beta'$  обращается в нуль, следовательно, сигнальная составляющая принимает значение, равное нулю, при этом шумовая определится выражением

$$\sigma_{\text{ш1}} = K \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) J_{(n-1)}(\beta) \sigma_{\text{ш}}^2 \sqrt{\frac{\Delta z}{2\Delta \Omega}}.$$

Уровень шумового напряжения на выходе измерителя дальности связан прямо пропорциональной зависимостью квадрата уровня шумового напряжения на входе, корня квадратного из отношения входной и выходной полос пропускания приемника и индекса модуляции сигнала, выраженного функциями Бесселя.

Значение задержки  $\theta_x = \theta_0$  в РЛЗ определяет расстояние до объекта как  $D = 0,5C\theta_0$ . Точность определения дальности оценивается крутизной характеристики измерителя временной задержки, относительное значение которой вблизи локального минимума равно

$$F(\theta_x - \tau) = 0,5\beta\Omega,$$

из чего следует, что повышение точности измерения достигается увеличением модулирующей частоты (т. к. индекс модуляции ограничен).

Потенциальная точность измерения дальности оценивается среднеквадратической ошибкой измерения, которая определяется из условия равенства наименьшего различного изменения выходного напряжения сигнала, вызванного действием шума  $\Delta U_{\text{ш}} = \sigma_{\text{ш1}}$ , изменению выходного сигнала  $\Delta U_c$ , вызванного отклонением пространственной временной задержки на величину  $\Delta \theta$  за счет изменения дальности. Полагаем, что в некоторой точке  $\theta_x - \tau = \tau_0$  на интервале  $\Delta \theta$  средняя крутизна относительной характеристики измерителя дальности постоянна и равна  $F(\tau_0) = 0,5\beta\Omega$ . Тогда при небольших отклонениях задержки справедливо выражение

$$\Delta U_c = F(\tau_0) \Delta \theta U_{\text{сш}},$$

где  $U_{\text{сш}} = KU_c^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta'_M) J_{(n-1)}(\beta'_M)$  — максимальный уровень выходного сигнала при максимальном значении индекса модуляции  $\beta' = \beta'_M$ .

Из условия равенства  $\Delta U_c = \Delta U_{\text{ш}}$  следует:

$$F(\tau_0) \Delta \tau U_{\text{сш}} = \sigma_{\text{ш1}}, \quad (11)$$

откуда среднеквадратическое отклонение задержки определится как

$$\sigma_{\tau 1} = \frac{\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) J_{(n-1)}(\beta) \sigma_{\text{ш}}^2 \sqrt{\frac{\Delta z}{2\Delta \Omega}}}{U_c^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta'_M) J_{(n-1)}(\beta'_M) \beta \Omega} = \frac{0,57 \sigma_{\text{ш}}^2 \sqrt{\frac{\Delta z}{2\Delta \Omega}}}{\beta \Omega U_c^2}.$$

Поскольку индекс модуляции  $\beta$  ограничен значением 0,8, повышение потенциальной точности измерения достигается увеличением модулирующей частоты и уменьшением отношения полос входа и выхода приемника.

В теоретических основах радиолокации и радиотехнических систем [5, с. 121; 6, с. 113] показано, что потенциальная точность измерения временной задержки определяется выражением

$$\sigma_{\tau}^2 = \frac{1}{(U_c / \sigma_{\text{ш}})^2 (2\pi \Delta f)^2},$$

где  $2\pi \Delta f = 2\Omega(1 + \beta + \sqrt{\beta})$  — ширина спектра сигнала.

Тогда представив произведение  $\beta\Omega$  как

$$\Omega(1 + \beta + \sqrt{\beta}) \frac{\beta}{(1 + \beta + \sqrt{\beta})},$$

потенциальную точность измерения временной задержки определим как

$$\sigma_{\tau 1} = \frac{0,57 \sigma_{\text{ш}}^2 \sqrt{\frac{\Delta z}{2\Delta \Omega}}}{\beta \Omega U_c^2} = 2,7 \frac{\sigma_{\tau}}{G} \sqrt{\frac{\Delta z}{\Delta \Omega}},$$

где  $G$  — квадрат отношения сигнал/шум по напряжению на входе приемника.

Последнее равенство получено при условии, что индекс модуляции зондирующего сигнала имеет

максимальное значение  $\beta=0,8$ . А так как в приемнике отношение полос пропускания выхода ( $\Delta z$ ) и входа ( $\Delta\Omega$ ) всегда не превышает 1, то при определенном входном отношении сигнал/шум точность измерения временной задержки может превышать потенциальную  $\sigma_\tau$ .

Цифровые методы обработки сигнала позволяют получить достоверную информацию при выходном отношении сигнал/шум 10 дБ и выше, т. е.  $U_{\text{см}} > 3,16\sigma_{\text{ш1}}$ . Следовательно, минимальный уровень входного сигнала, при котором выполняется равенство  $U_{\text{см}} = 3,16\sigma_{\text{ш1}}$ , равен

$$U_{\text{см1}} = 1,7\sigma_{\text{ш}}^2 \sqrt{\frac{\Delta z}{\Delta\Omega}}.$$

Полученное выражение определяет чувствительность дальномера, которая пропорциональна корню из отношения выходной и входной полос пропускания, среднеквадратическому отклонению входного шумового напряжения. Так как  $\Delta z < \Delta\Omega$ , то входное соотношение сигнал/шум может достигать значений, меньших 1.

Повышение точности измерения временной задержки может быть достигнуто введением на выходе устройства логарифмического усилителя. В этом случае характеристика измерителя будет иметь вид

$$f_2(\theta-\tau) = \log\left[K_1 \sum_{n=1}^1 J_n(\beta') J_{(n-1)}(\beta')\right].$$

Из последнего равенства следует, что крутизна измерителя дальности в непосредственной близости к экстремальной точке определится как

$$F_1(\theta-\tau) = \frac{[2J_0^2(\beta') + 3J_1^2(\beta')] \beta\Omega}{9,2J_0(\beta')J_1(\beta')} = \frac{\beta\Omega}{4,6J_1(\beta')}. \quad (12)$$

Из выражения (12) следует, что при  $\theta_x = \tau$  характеристика измерителя имеет разрыв второго рода [7, с. 138], т. е. при приближении к экстремальной точке крутизна характеристики стремится к бесконечности.

Воспользовавшись равенством (11), определим потенциальную точность измерителя дальности с логарифмическим усилением:

$$\sigma_{\tau 2} = \sigma_{\text{ш1}} / U_{\text{см}} F_1(\theta_x - \tau) = \frac{0,5KJ_1(\beta')\sigma_{\text{ш}}^2 \sqrt{\frac{\Delta z}{\Delta\Omega}}}{\beta\Omega \log(0,85KU_c^2)}.$$

При приближении временной задержки  $\theta_x$  в РЛЗ к значению, равному задержке в пространстве  $\tau$ , индекс модуляции  $\beta'$  стремится к нулю и, как следует

из последнего выражения, ошибка измерения стремится к нулю.

Незначительное усложнение схемного решения, связанное с введением перемножителя X2 и фильтра нижних частот ФНЧ, позволяет выделить частоту доплеровского сдвига. В этом случае перемножаемые третьим перемножителем напряжения описываются выражениями (2) и

$$U_1(t-\theta_x) = U_c \cos[W_c(t-\theta_x) + \beta \sin(\Omega(t-\theta_x) + \varphi)].$$

Из результата перемножения в X2 при установлении в РЛЗ задержки  $\theta_x = \tau$  фильтром нижних частот выделяется сигнал вида

$$S_1(t) = [U_c(t-\tau) + U_{\text{ш}}(t)] U_1(t-\theta_x) = K_3 U_c \cos[W_d t + \varphi_1'] +$$

$+ K_3 \sigma_{\text{ш}} \cos[\beta \sin(\Omega(t-\theta_x) + \varphi)], \varphi_1' = W_c(\theta_x - \tau),$  который представляет собой смесь гармонического колебания с частотой, равной частоте доплеровского сдвига  $W_d$ , и шумового напряжения.

\*\*\*

Статистический анализ радиодальномера на основе J-корреляционного метода обработки сигнала показал, что в предложенном методе измерения дальности поведение корреляционного интеграла не зависит от частоты Доплера. Метод измерения дальности обладает неоднозначностью, которая определяется параметрами зондирующего сигнала, модулирующей частотой, индексом модуляции. Определены параметры сигнала, при которых обеспечивается однозначное измерение дальности.

При определенных параметрах входного сигнала и полос приемника точность измерения временной задержки может превышать потенциальную точность, определяемую известным равенством. Повышение точности измерения достигается введением логарифмического усиления.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ланге Ф. Статистические аспекты построения измерительных систем.— М.: Радио и связь, 1981.
2. Пат. 70379 Украины. J-корреляційний спосіб вимірювання далькості і пристрій, який його реалізує / А. Г. Сорочан., С. М. Лігінов, В. І. Литвиненко.— 2004.— Бюл. № 10.
3. Сорочан А. Г. J-корреляционный метод пеленгации // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 2001.— № 11.— С. 57—65.
4. Сорочан А. Г. J-корреляционный метод пеленгации при обработке псевдошумового сигнала // Вісн. Донецького ун-ту. Сер. А: Природничі науки.— 2004.— Вип. 1.— С. 249—254.
5. Теоретические основы радиолокации / Коростелев А. А., Ключев Н. Ф., Мельник Ю. А. и др.— М.: Сов. радио, 1978.
6. Лезин Ю. С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем.— М.: Радио и связь, 1986.
7. Ильин В. А., Позняк Э. Г. Основы математического анализа. Часть I.— М.: Наука, 1980.

Л. Я. КУШНЕРИК, Б. Н. ДЕМЧУК, к. ф.-м. н. А. И. СЕРЕДЮК

Украина, г. Черновцы, Институт термоэлектричества  
E-mail: vikhorl@ukr.net

Дата поступления в редакцию  
10.08 2004 г.

Оппонент к. т. н. В. П. ЗАЙКОВ  
(НИИ "Шторм", г. Одесса)

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ТЕМОРЕФЛЕКСОТЕРАПИИ

*Разработана конструкция и схемотехническое решение многоканального автономного прибора для терморефлексотерапии с использованием термоэлектрических микромодулей.*

Термоэлектрическое охлаждение получило признание во многих отраслях науки и техники. Сравнение с традиционными охлаждающими устройствами по энергетическим и массогабаритным характеристикам выявляет множество областей, где применение термоэлектрического охлаждения неоспоримо, это также и медицина и биология [1].

В работах [2, 3] показано, что различного рода воздействия на биоактивные точки человеческого организма при отработанной клинической методике имеют положительные стороны. Иглокальвание, аку-, электро- и термопунктура получили признание в официальной медицине и являются на данный момент одними из методов рефлексотерапии [4]. В ряде ведущих клиник Киева и Харькова успешно применяется метод терморефлексотерапии с использованием жидкого азота в качестве хладагента, что ограничивает применение этого метода стационаром. Метод осуществляется двумя путями — выдержкой зондов в криожидкости и последующим использованием без какой-либо терморегуляции, либо использованием достаточно сложной конструкции зонда с терморегули-

ровкой посредством прокачивания через него паров азота при заданной температуре.

Целью настоящей работы является разработка многоканального автономного (в понятии отсутствия криожидкости) мобильного недорогого прибора для терморефлексотерапии.

Метод рефлексотерапии, согласно принципам традиционной восточной медицины, является основным при восстановлении энергетического равновесия организма человека или равновесия между инь и янь. Рефлексотерапия заключается в воздействии на активные точки или их сочетания при различных заболеваниях. Термопунктура — один из разделов рефлексотерапии, который предусматривает воздействие теплом и пониженной температурой на активные точки, чтобы вызвать ответную реакцию организма.

Принципиальным при разработке прибора для терморефлексотерапии представляется использование термоэлектрических микромодулей [1, 5] вместо хладагента-криожидкости. Применение термомодулей, основанных на использовании эффекта Пельтье, позволяет решить вопрос автономности такого типа приборов (в смысле хладагента), снижает сложность конструкции, себестоимость и позволяет проводить терапию в режиме "охлаждение-нагрев" [5]. Структурная схема одного канала многоканального прибора приведена на **рис. 1**.

В прибор для рефлексотерапии входит ряд термоэлектрических устройств-зондов. На **рис. 2** представлена конструкция такого зонда-стимулятора. Термоэлектрический зонд состоит из термоэлектрических дат-

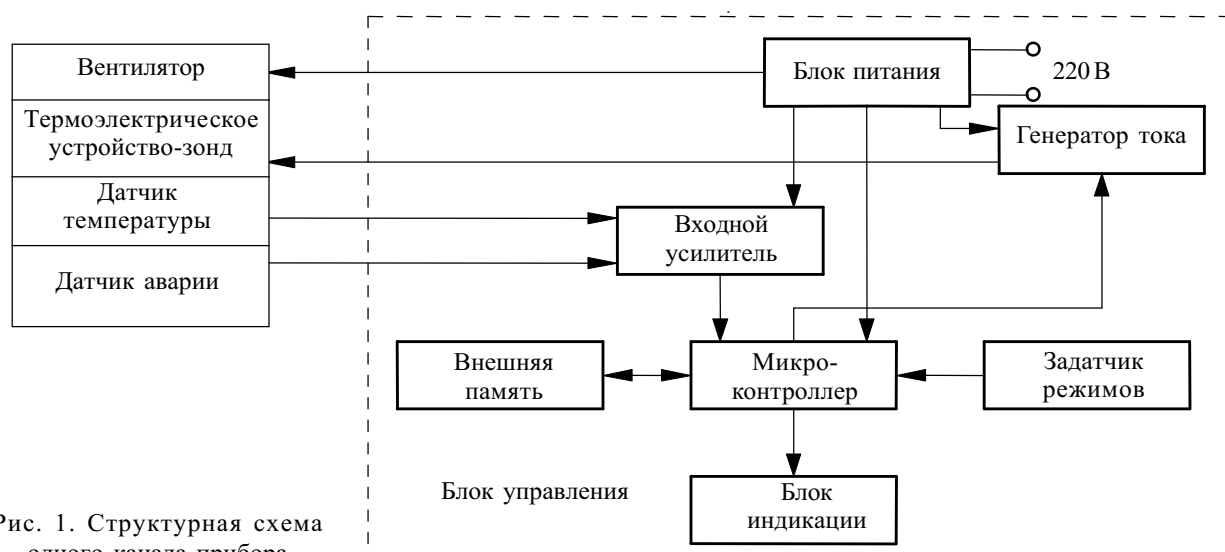


Рис. 1. Структурная схема одного канала прибора

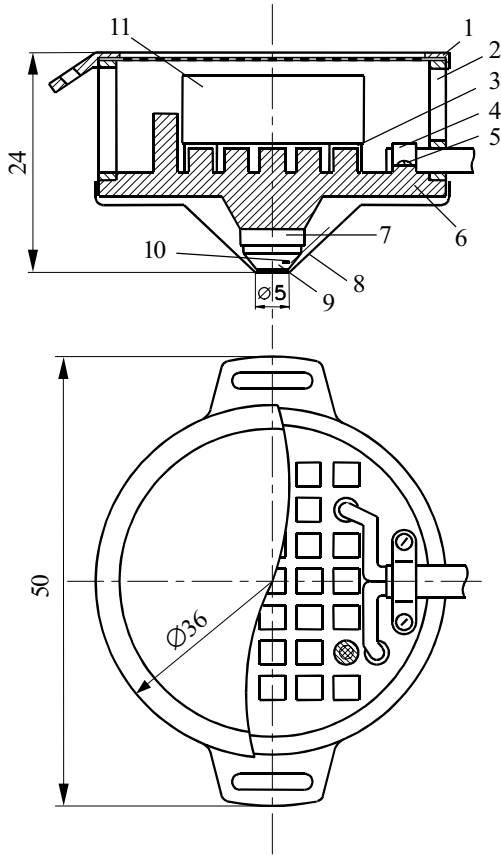


Рис. 2. Конструкция термоэлектрического зонда:  
1 — крышка; 2 — втулка; 3 — радиатор; 4 — хомут; 5 — винт;  
6 — цоколь; 7 — термоэлектрический модуль; 8 — кожух;  
9 — концентратор; 10 — термодатчик; 11 — вентилятор

чиков, в конструкцию которых входит микромодуль 7, радиатор 3, вентилятор 11, рабочая контактная пластина-концентратор 9 с датчиком температуры 10, а также блока питания и управления. Керамические пластины модуля покрыты никелем и золотом, что позволяет припаивать к горячей поверхности модуля воздушный радиатор 3, а к холодной — концентратор 9, изготовленный из материала с высокой теплопроводностью и предназначенный для воздействия на активную точку или участок человеческого тела. Конструкция и габаритные размеры термоэлектрического устройства (ТЭУ) приведены на рис. 3.

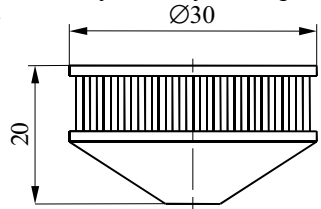


Рис. 3. Конструкция ТЭУ

В результате расчетов было получено, что холодопроизводительность ТЭУ в режимах, удовлетворяющих техническому заданию, должна составлять не менее 2 Вт. При этом примерно 0,5 Вт будут компенсировать пассивные теплопритоки. Исходя из этого из ряда термоэлектрических модулей Пельтье, разработанных в Институте термоэлектричества, был выбран модуль типа Алтек 98А, изготовленный из высокоэффективного термоэлектрического материала на основе теллурида висмута и состоящий из 62 ветвей размерами 0,58×0,58×0,93 мм. Геометрические размеры модуля 8×8×1,65 мм, максимальное рабочее напряжение и ток составляют  $U_{max}=3,9$  В,  $I_{max}=1,8$  А, соответственно. В модуле использованы эффективные многослойные антидиффузионные барьеры, ко-

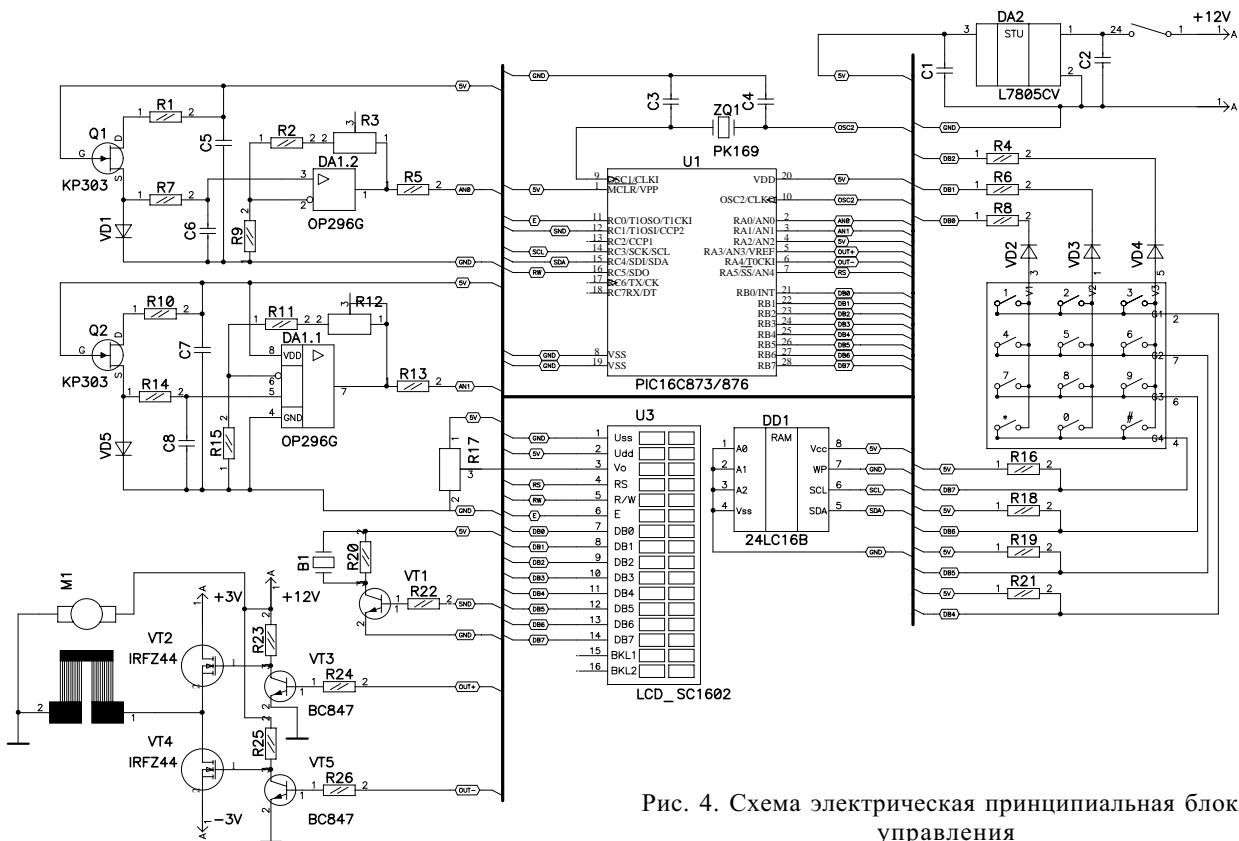


Рис. 4. Схема электрическая принципиальная блока управления

торами обеспечивается высокая надежность и большой ресурс работы (не менее  $2 \cdot 10^3$  ч).

На рис. 4 приведена схема электрическая принципиальная блока управления прибора для рефлексотерапии. Для наглядности приведен лишь один из каналов устройства.

Входные (измерительные) цепи блока управления представляют собой масштабирующие усилители постоянного тока, выполненные на прецизионной двухканальной микросхеме OP296G с малым напряжением смещения. В качестве температурных сенсоров использованы кремниевые импульсные диоды, падение напряжения на которых имеет практически линейную температурную зависимость в рабочем диапазоне температур. С целью уменьшения погрешности преобразования для питания сенсоров-диодов использованы источники стабилизированного тока на полевых транзисторах.

Использование микропроцессора типа PIC (Microchip) обусловлено большим объемом задач, выполняемых блоком управления. Микроконтроллер обеспечивает измерение температуры зонда прибора, поддержание необходимого температурного режима зонда в течение заданного промежутка времени, выполняет роль таймера — задатчика необходимых температурных и временных режимов работы, обеспечивает защиту термомодуля зонда в аварийных ситуациях (при перегреве). Микроконтроллер обеспечивает также индикацию на жидкокристаллическом дисплее температурных и временных режимов работы прибора, коммутацию направления тока через термомодуль зонда.

Следует отметить, что представленное решение суммирует известные схемотехнические узлы и является собой попытку унификации такого рода устройств. Отличительная особенность приведенного решения — отказ от достаточно сложных аналоговых решений задатчиков температурных и временных интервалов воздействия и компьютерных методик управления, которые требуют высокой квалификации персонала и создания необходимых программ управления.

Нужно отметить, что вопрос о коммутации тока через термомодуль следует считать нетривиальной задачей, поскольку последний в переходных процессах представляет собой не чисто активную нагрузку. В момент снятия напряжения или реверса модуль в течение некоторого времени работает в генераторном режиме (эффект Зеебека), вырабатывая встречный коммутируемому ток в выходной цепи. Поскольку внутреннее сопротивление модуля достаточно мало (единицы Ом), то существенной перегрузке подвергаются выходные коммутирующие каскады. С целью минимизации влияния этого фактора в выходном каскаде (рис. 4) использованы мощные полевые транзисторы с минимальным значением сопротивления открытого канала.

Типичный вид циклического процесса воздействия зонда на биоактивные точки человеческого организма приведен на рис. 5.

Заметим, что расчет холодопроизводительности учитывает лишь пассивные теплопритоки, т. е. по сути

«холостой ход» ТЭУ, и зависимость на переходных участках кривой цикла работы на «холостом ходу» можно считать практически линейной (рис. 5, а). Последнее подтверждено экспериментально путем измерения температуры рабочей площадки термозонда при работе на «холостом ходу».

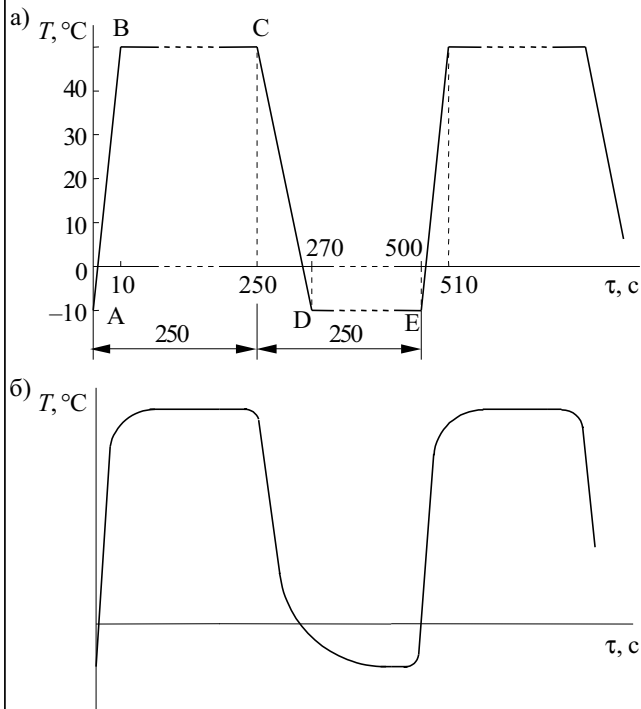


Рис. 5. График полного цикла работы прибора: а — «холостой ход»; б — реальная работа на участке кожи

Иначе обстоит дело при непосредственном контакте рабочей площадки термозонда с кожей человека. В этом случае преобладающими являются тепловые потоки, связанные с теплопроводностью и теплоемкостью тканей тела. Поскольку решение такой динамической тепловой задачи в общем виде представляется достаточно сложным, то исследование данного процесса было проведено экспериментальным путем. Как видно из рис. 5, б, при соблюдении тенденции кривой «холостого хода» появляется кривизна на начальных (максимально отличных от температуры кожного покрова) участках кривой, величина которой зависит также и от месторасположения активной точки на теле.

Использование программируемого микроконтроллера позволяет задавать практически любые температурные и временные режимы работы. При достаточно отработанной клинической методике воздействия зонда на организм в память прибора можно записать комплект типичных программ работы по ряду активных точек, что существенно ускоряет процесс подготовки к работе.

В настоящее время разработанный образец прошел стадию клинических испытаний. Было проведено 72 курса лечения пациентов с различными диагнозами. При использовании пониженной температуры (до  $+4^\circ\text{C}$ ) и длительности воздействия от 5 до 10 мин отмечается улучшение состояния пациентов при очаговой алопеции (как при использовании местных точек, так и отдаленных), носовых кровотечениях, бо-

лях посттравматического характера, головных болях, периферических порезах, нарушениях сна, общем недомогании. Ухудшение состояния или отсутствие улучшения наблюдалось у пациентов при радикулярных болях, после чего приходилось менять метод лечения.

При использовании методики с повышенной температурой (45...48°C) при длительности от 5 до 15 мин улучшение состояния здоровья наблюдалось при радикулитах, невралгиях, неврозах, неврастениях, кашле, нарушениях сна, болях в суставах, язвенной болезни. Основным недостатком здесь являются осложнения, приводящие к ожогам I — II степени из-за повышенной чувствительности кожи пациента.

При чередовании пониженной до +4°C температуры и повышенной до 48°C при длительности воздействия в течение 5 мин отмечалось улучшение состояния здоровья при невритах лицевого нерва, невритах локтевого сустава, невритах лучевого нерва, головных болях, при воздействии на отдаленные точки при облысении. Ухудшение состояния здоровья наблюдалось при радикулитах и невралгических болях.

\*\*\*

Следует отметить, что представленное техническое решение охватывает более широкую область, нежели только терморексотерапия. Практически аналогичные решения и узлы были использованы при разработке термоэлектрических приборов для применения в лечении проктологических, язвенных, ги-

некологических и др. заболеваний. Данный пример выбран из-за его наибольшей функциональной поливариантности.

**Выводы**

1. Применение термоэлектрических микромодулей для терморексотерапии позволяет упростить существующие методики криогенного воздействия на биоактивные точки и разрабатывать недорогие мобильные приборы, простые в эксплуатации.

2. Разработанное техническое решение многоканального прибора терморексотерапии является функционально поливариантным, поскольку дает возможность программированного задания температурно-временных зависимостей воздействия с достаточно точной выдержкой параметров процесса воздействия.

3. Клинические испытания прибора показали его пригодность для выполнения поставленных задач и положительный эффект применения в медицине.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Анатычук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник.— Киев: Наукова думка, 1979.
2. Кушнерик Л. Я., Цуканов В. Н. Термоэлектричный прибор для термопунктуры // Термоэлектрика.— 2001.— № 1.— С. 67—71.
3. Самосюк И. З., Лысенюк В. П., Лиманский Ю. П. Нетрадиционные методы диагностики и терапии // Киев: Здоров'я, 1994.
4. Лихтенштейн В. А. Температурный анализатор, терморегуляция и некоторые вопросы термотерапии // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной терапии.— 1989.— № 5.— С. 50—53.
5. Лукичев Н. Л. Электростимуляционная диагностика, гомеотерапия и феномен дальнего действия // М.: Здоровье, 1990.

**Новый журнал для прагматиков**



**ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ, КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ, ДИАГНОСТИКА**

информационно-технический журнал

**ИНДЕКС - 90741**

Журнал "ПИКАД" - ориентирован на специалистов по внедрению, системной интеграции и эксплуатации промышленных электронных систем



**РУБРИКИ ЖУРНАЛА:**

- передовые технологии
- внедрения и разработки
- программное обеспечение
- компоненты встраиваемых систем
- в помощь инженеру
- служба новостей
- бюро новинок

Учредитель и издатель  
**ООО "ХОЛИТ Дэйта Системс"**  
www.holit.com.ua, info@holit.com.ua



Подписавшись на наш журнал, Вы не только получите доступ к новой информации, но также будете этим содействовать развитию рынка систем автоматизации в нашей стране

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, к. ф.-м. н. И. П. ОСТРОВСКИЙ,  
С. М. МАТВИЕНКО, Ю. Р. КОГУТ

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»  
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию  
15.06 2004 г.

Оппоненты к. ф.-м. н. В. В. КОВАЛЬЧУК  
(ЮГПУ им. К. Д. Ушинского, г. Одесса),  
А. И. КОНДРИК (Харьковский физ.-техн. ин-т)

## ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ Si-Ge

*На основе сильнолегированных нитевидных кристаллов Si-Ge создан датчик для измерения криогенных температур, работоспособный в условиях магнитных полей.*

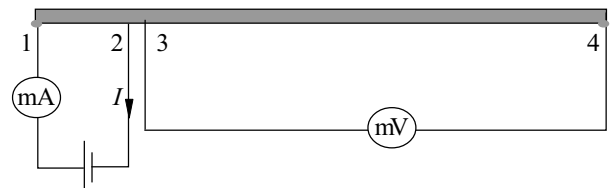
Исследование эффекта Зеебека в сильнолегированных кристаллах при низких температурах представляет интерес как с физической точки зрения (изучение таких явлений как прыжковая проводимость, фононное увлечение носителей заряда [1, 2]), так и с прикладной (например, для создания сенсоров температуры [3]). В [4] исследовалось поведение термоэдс в сильнолегированных нитевидных кристаллах (НК) Si-Ge в температурном интервале 4,2—300 К под воздействием одноосной деформации. Однако основное внимание в этой работе уделялось изучению природы деформационно-стимулированных эффектов в НК твердого раствора  $Si_{1-x}Ge_x$  ( $x=0,01...0,05$ ).

В настоящей работе проведены исследования терморезистивных и термоэлектрических характеристик нитевидных кристаллов твердых растворов  $Si_{1-x}Ge_x$  ( $x=0,01...0,05$ ) в температурном интервале 4,2—200 К с целью создания сенсоров криогенных температур на их основе, работоспособных в условиях действия магнитных полей.

Нитевидные кристаллы твердого раствора SiGe выращивали методом химических транспортных реакций в закрытой бромидной системе с использованием золота как инициатора роста. Температура зоны источника составляла 1250°C, зоны роста — 900°C. Состав твердого раствора  $Si_{1-x}Ge_x$  определялся методом микрозондового анализа. Кристаллы имели диаметр 40—50 мкм и длину 10—12 мм.

Полученные НК с платиновыми контактами приклеивали с помощью клея ВЛ-931 на подложки с отличным от Si-Ge температурным коэффициентом расширения (ТКР), после чего охлаждали до криогенных температур. За счет различия ТКР подложки и кристаллов возникала их деформация. Степень деформации ( $\epsilon$ ) зависела от материала подложек и изменялась от  $-4,3 \cdot 10^{-3}$  до  $1,4 \cdot 10^{-3}$  отн. ед.

Коэффициент Зеебека измерялся по четырехконтактной схеме (рис. 1) в температурном интервале 4,2—200 К. При этом контакты 1 и 2 использовали как ветвь разогрева (терморезистивную ветвь), создающую градиент температуры между контактами 3



и 4, на которых измерялась термоэдс (термоэлектрическая ветвь). Расстояние между контактами 2 и 3 не превышало 200 мкм, между 3 и 4 — около 10 мм. Температуру горячего конца определяли по сопротивлению терморезистивной ветви.

Проведена серия измерений на кристаллах твердого раствора SiGe с концентрацией примеси бора, обеспечивающей близость к переходу "металл—изолятор" с диэлектрической стороны перехода.

На рис. 2 представлены температурные зависимости сопротивления кристаллов с удельным сопротивлением  $\rho=0,016$  Ом·см на различных подложках. Из рисунка видно, что сопротивление НК, деформированного сжатием до уровня  $\epsilon = -3,8 \cdot 10^{-3}$  отн. ед., изменяется приблизительно на три порядка в интервале температур 4,5—50 К. Кроме того, в этой области температур наблюдается зависимость  $R(T)$ , близкая к линейной.

Для недеформированных НК с низким уровнем легирования ( $\rho=0,025$  Ом·см) наблюдалось такое же резкое изменение сопротивления, однако степень нелинейности зависимости  $R(T)$  была значительно больше.

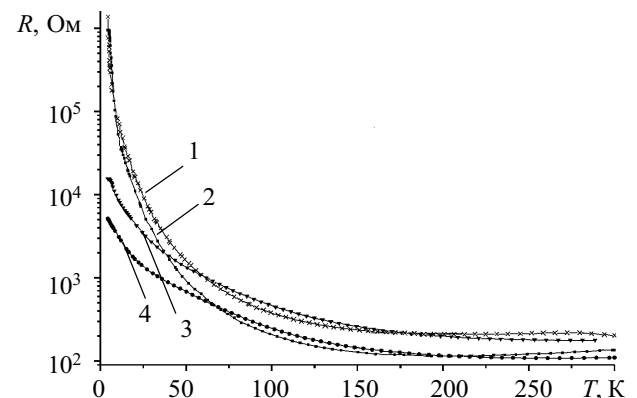


Рис. 2. Температурные зависимости сопротивления НК Si-Ge ( $\rho=0,016$  Ом·см) на различных подложках:  
1 — Al,  $\epsilon=-4,3 \cdot 10^{-3}$ ; 2 — Cu,  $\epsilon=-3,8 \cdot 10^{-3}$ ; 3 — кварц,  $\epsilon=+4,7 \cdot 10^{-4}$ ;  
4 — без подложки,  $\epsilon=0$

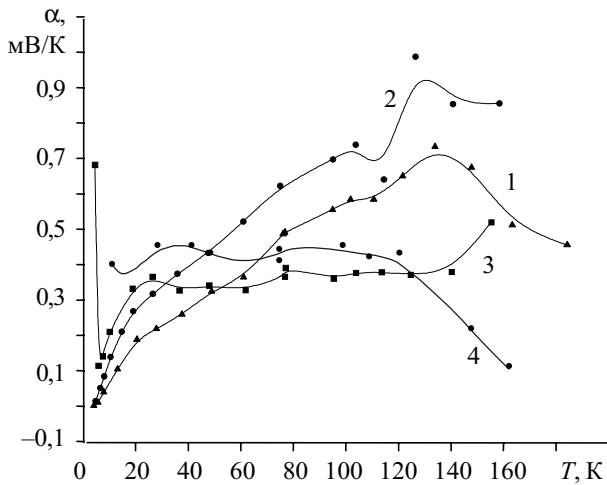


Рис. 3. Температурные зависимости коэффициента Зеебека НК Si-Ge на различных подложках:

1 — без подложки,  $\epsilon=0$ ; 2 — кварц,  $\epsilon=+4,7 \cdot 10^{-4}$ ; 3 — Cu,  $\epsilon=3,8 \cdot 10^{-3}$ ; 4 — Al,  $\epsilon=-4,3 \cdot 10^{-3}$  (1—3 —  $\rho=0,016$ ,  $x=0,03$ ; 4 —  $\rho=0,025$ ,  $x=0,05$ )

На рис. 3 представлены температурные зависимости коэффициента Зеебека  $\alpha$  для различных образцов НК. Как видно из рисунка, деформация растяжения (кривая 2) несущественно влияет на температурный ход коэффициента Зеебека. В то же время деформация сжатия (кривая 3) приводит к принципиальному изменению характера зависимости  $\alpha(T)$  — появляется температурный интервал (20—100 К), в котором значение  $\alpha$  достаточно стабильно.

С физической точки зрения наличие максимума  $\alpha$  на температурной зависимости в недеформированных образцах объясняется эффектом фононного увлечения носителей заряда. Деформация растяжения несколько увеличивает этот эффект, что приводит к возрастанию абсолютной величины максимума  $\alpha$ . Деформация сжатия, по-видимому, способствует подавлению эффекта фононного увлечения, что может быть следствием изменения фононного спектра деформированного кристалла.

Из представленных в таблице сравнительных термометрических характеристик НК Si-Ge видны преимущества использования деформированных кристаллов по сравнению с недеформированными: существенно расширяется диапазон рабочих температур и повышается температурная чувствительность терморезистора.

Образцы	Температурный интервал, К	Температурный коэффициент сопротивления, %/К	Температурная чувствительность при $T=7$ К, Ом/К
Недеформированный	4,2...10	13...16	300
Деформированный, $\epsilon = -3,8 \cdot 10^{-3}$ отн. ед.	4,2...50	6...16	12500

С целью оптимизации параметров датчика (повышения чувствительности, расширения области рабочих температур) были проведены измерения температурного хода коэффициента Зеебека для образцов различного состава ( $x=0,01...0,05$ ) и разной степени сжатия ( $\epsilon = -3,8 \cdot 10^{-3}...-4,3 \cdot 10^{-3}$ ). Установлено, что твердые растворы  $Si_{1-x}Ge_x$  имеющие состав  $x=0,03...0,05$ , наиболее чувствительны к деформации, т. к. их коэффициент тензочувствительности максимален.

Практически для всех исследованных образцов получена удовлетворительная стабильность коэффици-

ента Зеебека в температурном интервале 20—100 К. Однако максимальная величина  $\alpha = 0,47 \pm 0,02$  мВ/К получена для образцов, имеющих состав  $x=0,05$  ( $\rho=0,025$  Ом·см) при уровне деформации  $\epsilon=-4,3 \cdot 10^{-3}$  на подложке из Al (кривая 4 на рис. 3).

Таким образом, установлено, что деформация существенно влияет на термометрические характеристики кристаллов. Анализ полученных результатов позволяет говорить о том, что специально деформированные НК Si-Ge могут быть эффективно использованы в датчиках для измерения криогенных температур. Причем использование НК состава  $x=0,03$  ( $\rho=0,16$  Ом·см) обеспечивает наилучшие параметры терморезистивной ветви, а состава  $x=0,05$  ( $\rho=0,025$  Ом·см) — термоэлектрической. Поскольку, по мнению авторов, для предлагаемого датчика более важными являются термоэлектрические характеристики, в качестве термочувствительного элемента был применен кристалл с  $x=0,05$ .

Датчик представляет собой НК  $Si_{1-x}Ge_x$  диаметром 40 мкм с четырьмя платиновыми выводами диаметром 30 мкм (см. рис. 1), приклеенный с помощью клея ВЛ-931 на алюминиевую подложку. Между контактами 1 и 2 измеряется сопротивление терморезистивной ветви и по термометрическим характеристикам (рис. 2) определяется абсолютная температура горячего конца (в диапазоне 4,2—120 К). Между контактами 3 и 4 измеряется термо-эдс, которая позволяет определить разность температур между горячим и холодным концами кристалла. Диапазон рабочих температур термоэлемента (а соответственно, и самого датчика) 20—120 К. Точность измерения абсолютной температуры составляет 0,2 К, разности температур — 0,1 К. Инерционность датчика при измерении температуры составляла не более 60 мс.

Так как длина терморезистивной ветви составляет 200—300 мкм, а диаметр кристалла 40 мкм, то предложенный датчик может служить термозондом для исследования распределения температуры на поверхности материалов.

Исследования также показали, что магнитное поле (вплоть до полей с магнитной индукцией 14 Тл) практически не влияет на величину и характер температурной зависимости коэффициента Зеебека и сопротивления кристаллов.

Таким образом, полученные результаты показали, что деформированные сжатием нитевидные кристаллы твердых растворов  $Si_{1-x}Ge_x$  ( $x=0,05$ ) можно успешно использовать в датчиках для измерения криогенных температур, работоспособных в условиях действия сильных магнитных полей.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Андреев А. Г., Забродский А. Г., Звягин И. П., Егоров С. В. Термоэдс нейтронно-легированного Ge:Ga в области прыжковой проводимости // ФТП.— 1997.— Т. 31, № 10.— С. 1174—1179.
2. Лончаков А. Т., Цидилковский А. М., Матвеев Г. А. Термо-эдс n-Ge вблизи перехода металл-диэлектрик // ФТП.— 1988.— Т. 22, № 5.— С. 839—842.
3. Van Herwaarden A. W., Sarro P. M. Thermal sensors based on the Seebeck effect // Sensors and Actuators.— 1986.— Vol. 10.— P. 321.
4. Дружинін А. О., Островський І. П., Лях Н. С., Матвієнко С. М. Деформаційно-стимульовані ефекти у ниткоподібних кристалах твердого розчину Ge-Si // Вісник НУ "Львівська політехніка". Сер. "Електроніка".— 2003.— № 482.— С. 105—111.

К. т. н. М. Н. МУРШУДЛИ, А. М. АЛИЕВА, М. И. МУСАЕВ

Азербайджанское Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку  
E-mail: mnmur@yandex.ru

Дата поступления в редакцию  
12.10 2004 г.

Оппонент В. К. КУРИННЫЙ  
(АО "Укрналит", г. Киев)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ГАЗОАНАЛИЗАТОРА С ТРАНЗИСТОРНЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

*Приведена блок-схема и описан принцип работы цифрового газоанализатора с транзисторным чувствительным элементом, работающим в режиме автоколебаний.*

В качестве чувствительных элементов (ЧЭ) многих газоанализаторов используются резистивные элементы на основе органических и неорганических материалов. Для таких ЧЭ характерны большие значения времени адсорбции и десорбции, для уменьшения которого выбирают оптимальные температурные режимы, задают соответствующий алгоритм работы элемента. Уменьшить это время позволяет также использование частотного режима.

Существует множество различных схематических и конструктивных возможностей создания структур с частотным выходом. Мы в качестве ЧЭ использовали кремниевый биполярный транзистор, работающий в режиме автоколебаний. Транзистор формировался в эпитаксиальной пленке  $n$ -типа, расположенной на подложке  $p$ -типа проводимости. В отличие от обычных планарных транзисторов в нашем случае отсутствовал скрытый  $n^+$ -слой, который обычно вводится для уменьшения сопротивления коллектора (рис. 1).

При определенных конструктивно-технологических условиях получения транзисторной структуры на  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторе в инверсном режиме работы

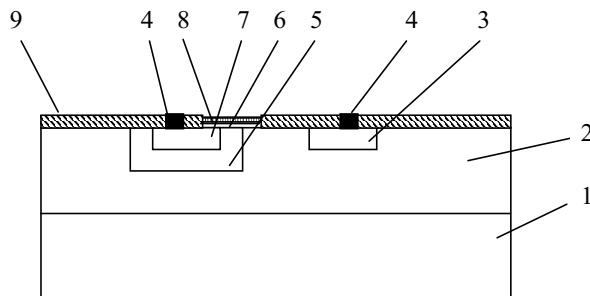


Рис. 1. Транзисторная кремниевая газочувствительная структура:

1 — подложка  $p$ -типа проводимости; 2 — эпитаксиальная пленка  $n$ -типа; 3 — коллектор ( $n^+$ -слой); 4 — контакты к эмиттеру и коллектору; 5 — база ( $p$ -слой); 6 — тонкий окисел (менее  $100\text{\AA}$ ); 7 — эмиттер ( $n$ -типа); 8 — селективная мембрана; 9 — толстый слой  $\text{SiO}_2$  ( $0,5$ — $0,7$  мкм)

при отключенной базе и превышении некоторого порогового напряжения возникают колебания тока и напряжения. При удалении окисла, защищающего выходящие на поверхность границы переходов, частота колебаний сильно зависит от состава окружающей среды, концентрации воздействующего газа.

Наибольший эффект наблюдался при воздействии окислов азота [1]. В этом случае частота колебаний линейно (при концентрациях меньше 500 ppm) зависела от концентрации газа. В случае же воздействия паров аммиака частота колебаний менялась неоднозначно (рис. 2). Таким образом, наблюдалось сложное взаимодействие поверхности транзистора с воздействующими газами, т. к. работало сразу несколько механизмов чувствительности поверхности к адсорбции: изменение условий на переходе "эмиттер—база", изменение поверхностной проводимости базы, изменение условий на границе "база—коллектор". В случае подбора соответствующего селективного покрытия можно достичь селективности отклика на окислы азота или аммиака. Кроме селективности отклика это может улучшить стабильность прибора, т. к. при отсутствии покрытия происходит медленное окисление поверхности и, вследствие этого, уменьшение чувствительности, "уход" других параметров.

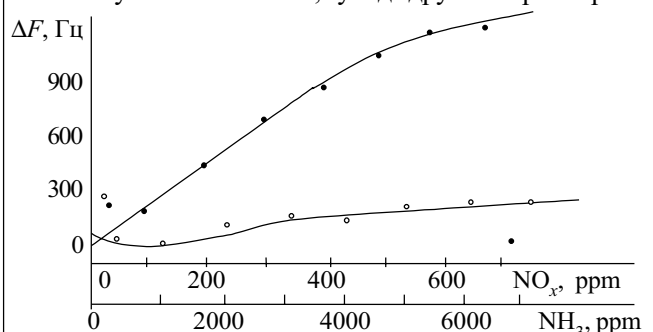


Рис. 2. Зависимость частоты колебаний  $F$  от концентрации детектируемого газа при температуре 25°C:  
○ —  $\text{NH}_3$ ; ● —  $\text{NO}_x$

Однако главным недостатком такого ЧЭ явилась нестабильность работы, которая сказывалась в произвольном изменении частоты при неизменной концентрации измеряемого газа. Дрейф зависел главным образом от колебаний температуры и составлял 300—500 Гц/°C, в то время как изменение концентрации газа на 1 ppm приводило к изменению частоты на 1,5—2 Гц (для  $\text{NO}_x$ ). Отсюда ясно, насколько важным являлся вопрос температурной компенсации.

Для осуществления такой компенсации на пластине кремния, рядом с ЧЭ, формировался опорный транзистор (эмиттер был общий). В отличие от ЧЭ, у опорного транзистора границы переходов, выходящие на поверхность, были защищены толстым термическим окислом, и поэтому реакций на изменение окружающего газового состава не наблюдалось. Величина разности частот ЧЭ и опорного транзистора должна была служить для определения температуры нагрева. Однако несмотря на то, что опорный транзистор, в отличие от ЧЭ, был защищен от газового воздействия толстым слоем двуоксида кремния, наблюдалась синхронизация их работы, т. е. шел захват большей из генерируемых частот тем элементом, собственная частота генерации которого была меньше. Причина влияния одного элемента на другой заключалась в недостаточной степени гальванической развязки ее активной и реактивной составляющих — элементы находились на одной подложке и не были изолированы друг от друга, а как показали измерения, RC-цепочкой, определяющей частоту колебаний, были емкость коллектор-подложка и сопротивление коллектора. Поэтому транзисторы разделялись диэлектрической изоляцией.

Для измерения температуры окружающей среды иным способом использовался расположенный на одной подложке с датчиком  $p-n$ -переход, напряжение  $V_{\text{вых}}$  которого после усиления обеспечивало температурную компенсацию ухода частоты ЧЭ. Опробована и температурная компенсация, достигаемая повышением теплоемкости датчика (ЧЭ размещался на относительно массивном радиаторе, который позволил осуществить эффективный отвод тепла). В результате температура датчика существенно менялась за время измерения, равное нескольким десяткам секунд.

Влияние паразитных емкостей на дрейф частоты трудно поддается количественному анализу из-за существенного технологического разброса параметров ЧЭ. Уменьшить дрейф можно путем жесткой стабилизации и оптимальным выбором рабочей точки ЧЭ.

Решение всех перечисленных задач позволило реализовать необходимую разрешающую способность и точность работы прибора.

Рассмотрено влияние светового излучения на параметры датчика и выявлена зависимость воздействия света на выходную частоту, в известной мере совпадающего с воздействием газа. Это обстоятельство, во-первых, приводит к возникновению существенной дополнительной погрешности измерения, во-вторых, делает возможным использование фоточувствительности датчика для контроля положения его рабочей точки на частотной характеристике нормированным по интенсивности световым потоком. Метод является дополнительным к ранее указанным способам температурной компенсации. Вместе с тем очевидно, что использование ЧЭ при регистрации газа должно происходить в условиях, исключающих световое воздействие на датчик.

ЧЭ, являясь прибором с отрицательным сопротивлением, позволяет осуществить прямую регистрацию уровня газовых компонентов методом измерения частоты собственных релаксационных колебаний, за-

висящих от концентрации детектируемого газа. Относительно малая инерционность ЧЭ, достаточно высокая линейность зависимости частоты колебаний от концентрации газа, высокая чувствительность и наличие частотного выхода позволяют сравнительно простыми методами осуществлять цифровую регистрацию измеренной концентрации газа.

Разработанный на базе кремниевого ЧЭ с отрицательным сопротивлением цифровой газоанализатор имеет функциональную схему, приведенную на рис. 3.

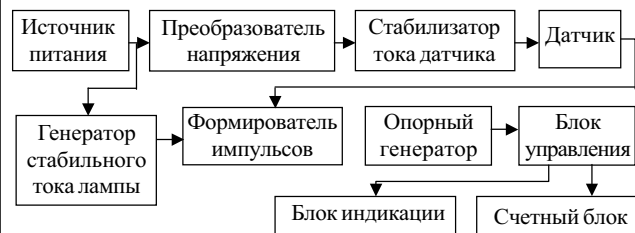


Рис. 3. Функциональная схема газоанализатора

*Источник питания* — аккумуляторная батарея с номинальным выходным напряжением 5 В, содержащая 4 последовательно соединенных аккумулятора типа Д-0,55 и обеспечивающая непрерывную работу прибора в течение четырех часов.

*Преобразователь напряжения* осуществляет преобразование напряжения в постоянное, регулируемое по величине стабилизированное напряжение 15—20 В, необходимое для питания ЧЭ. Номинальное значение выходного стабилизированного напряжения определяется оптимальным режимом генерации ЧЭ.

*Стабилизатор тока датчика* стабилизирует ток в цепи ЧЭ. Регулировкой его величины в пределах 0,5—5 мА устанавливается точка на ВАХ ЧЭ, соответствующая минимальному дрейфу частоты.

*Датчик* содержит собственно адсорбционно-чувствительный элемент, радиатор, обеспечивающий необходимую тепловую инерцию ЧЭ, световой лабиринт, исключающий световую засветку ЧЭ, и миниатюрную лампу накаливания для калибровки прибора в целом.

*Формирователь импульсов* осуществляет нормирование выходных импульсов ЧЭ по амплитуде и длительности. Осуществляет их согласование со входом КМОП-микросхем.

*Блок управления* предназначен для ввода внешних команд управления, задания работ узлов и блоков прибора, выдачи результатов измерения на индикатор.

*Опорный генератор* формирует импульсы с частотой, равной исходной частоте ЧЭ, таким образом, что их разность равна нулю. Последнее необходимо для начальной установки счетчиков в нулевое положение.

*Генератор стабильного тока лампы* задает строго постоянный ток лампы накаливания, расположенной в датчике. Его величина регулируется в процессе тарировки прибора по известной концентрации детектируемого газа.

*Счетный блок* осуществляет подсчет разности частот ЧЭ и опорного генератора.

Блок индикации включает в себя запоминающие дешифраторы двоично-десятичного кода в семисегментный код и три светодиодных индикатора.

Газоанализатор работает следующим образом.

При установленных значениях напряжения и тока ЧЭ генерирует импульсы, следующие с начальной частотой  $F_0$ . Пройдя через формирователь, они поступают в блок управления на первый селектор импульсов. Одновременно на данный селектор поступают формируемые импульсы управления с длительностью  $t_0$ . Селектор отпирается, и импульсы поступают в первом цикле на счетный блок импульсов ЧЭ, где они суммируются и запоминаются (здесь число импульсов  $N=F_0 t_0$ ).

Во втором цикле импульсы от опорного генератора, следующие с частотой, равной  $F_0$ , через второй селектор также поступают на счетный блок в количестве  $N=F_0 t_0$ . В счетном блоке производится операция вычитания, и в случае равенства частот ЧЭ и опорного генератора в блок индикаторов записываются нули. Одновременно в блоке управления формируется импульс сброса, обнуляющий счетный блок и переводящий селекторы в исходное состояние.

В случае неравенства частот ЧЭ и опорного генератора предусмотрена внешняя регулировка частоты опорного генератора (установка "0").

При воздействии на ЧЭ активного газа происходит изменение частот импульсов, т. е. имеет место разность частот ЧЭ и опорного генератора, фиксируемая счетным блоком и индикатором. Численное значение этой разности можно регулировать изменением величины  $t_0$ , т. е. времени селекции, и таким образом осуществлять калибровку верхней точки шка-

лы прибора. Регулировка значения  $t_0$  производится внешней регулировкой потенциометра и устанавливается на заведомо известное калиброванное значение измеряемой концентрации газа в соответствии с показаниями индикаторов.

Для оперативной рабочей калибровки прибора включается внешняя засветка ЧЭ. Яркость свечения лампочки, расположенной в датчике, регулируется таким образом, чтобы изменение частоты ЧЭ, вызванное световым потоком, было эквивалентно изменению частоты, обусловленному воздействием калиброванной концентрации активного газа.

Характеристики прибора при детектировании  $\text{NO}_x$  (с чувствительным элементом без селективной мембраны) следующие:

- обнаружительная способность на уровне 3—5 ppm или менее  $10 \text{ мг/см}^3$ ;
- линейная зависимость частоты от концентрации в диапазоне 5—500 ppm;
- диапазон рабочих температур от  $-20$  до  $+50^\circ\text{C}$ ;
- погрешность измерения порядка 10%.

Прибор позволяет в течение нескольких секунд измерить концентрацию окислов азота, отображаемую на цифровом табло тремя десятичными разрядами.

Конструктивно газоанализатор выполнен в виде малогабаритного прибора с внешними размерами  $150 \times 85 \times 25 \text{ мм}$ .

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Abdullayev A. G., Evdokimov A. V., Murshudly M. N., Scheglov M. I. Gas sensor based on a transistor structure // Sensors and Actuators.— 1987.— Vol. 11.— P. 339—347.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



**МОСКВА, 8—10 сентября 2005 г.**

**Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана при участии ОАО ЦНИТИ "Техномаш"**

**XI Международная научно-техническая конференция**

**ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ**

(Материалы и устройства функциональной электроники и нанофотоники)

**XVII Международный симпозиум**

**ТОНКИЕ ПЛЕНКИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ**

Посвящается 175-летию МВТУ

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ**

*Электронные технологии в машиностроении.*

*Вакуумное технологическое оборудование и системы автоматического управления.*

*Материалы, оборудование и технологии нанoeлектроники и нанофотоники.*

*Нанотехнологии и фотонные кристаллы.*

*Новые технологии производства, обработки и исследования наноматериалов.*

*Технологии и оборудование для производства приборов электронной техники и радиоэлектронных устройств.*

*Наноструктурированные материалы и фотонные кристаллы в оптоэлектронике, медицине и оптическом приборостроении.*

*Микроэлектромеханические системы в медицине и промышленности.*

*Получение, свойства и применение тонких пленок в электронике. Системы и устройства радиотехники и средств связи.*

*Методы контроля функциональных свойств материалов электронной техники, измерительная аппаратура и аналитические методы.*

*Моделирование и информационное обеспечение исследований.*

☎ (095)267-0983, факс (095)267-1739; E-mail: bulygina@mx.bmstu.ru

Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2005, № 1

Д. т. н. А. Ф. БЕЛЯНИН, д. ф.-м. н. М. И. САМОЙЛОВИЧ,  
к. т. н. В. Д. ЖИТКОВСКИЙ

Россия, г. Москва, ЦНИТИ "Техномаш"  
E-mail: samoylovich@technomash.ru

Дата поступления в редакцию  
22.10 2004 г.

Оппонент д. т. н. В. К. КОМАРЬ  
(Институт монокристаллов, г. Харьков)

## 3D СЛОИСТЫЕ СТРУКТУРЫ В КАЧЕСТВЕ ОСНОВЫ НЕКАЛИВАЕМЫХ КАТОДОВ И АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ФОТОДИОДОВ

*Представлены характеристики некаливаемых катодов и фотодиодов, сформированных на основе слоистых структур со слоем правильных кубических упаковок наносфер  $\text{SiO}_2$  и алмазоподобных материалов.*

Фотонные кристаллы (например, трехмерные (3D) упорядоченные упаковки наносфер  $\text{SiO}_2$  — опаловые матрицы) являются новым классом материалов электронной техники, чьи свойства определяются периодичностью изменения диэлектрической константы ( $\epsilon$ ), что при определенных условиях приводит к появлению запрещенных и разрешенных частотных полос («фотонных зон»). Физический смысл данного явления обусловлен не только периодичностью  $\epsilon$ , но и зависимостью фазовой скорости распространения света (фотонов) от  $\epsilon$ . В отличие от обычных кристаллов дифракция для фотонных кристаллов имеет место не в рентгеновском диапазоне, а в оптической области, при этом края зон играют роль брегговских плоскостей.

Создание трехмерных высокоупорядоченных (на уровне кристаллических структур) наносистем оказалось довольно трудным. Лишь в последние пять лет эта проблема начала находить свои решения, в том числе за счет использования материалов со структурой опала. Опаловые матрицы представляют собой плотноупакованные (в основном по кубическому закону) близкие по диаметру наносферы  $\text{SiO}_2$ , размеры которых в зависимости от условий их формирования могут варьироваться от 200 до 400 нм. Регулярная упаковка наносфер  $\text{SiO}_2$  образует трехмерную решетку с указанной периодичностью, которая может быть охарактеризована как 3D-сверхрешетка, а вся система в целом — как фотонный кристалл или материал с запрещенной фотонной зоной [1].

Целью настоящей работы являлось изучение строения 3D правильных упаковок наносфер  $\text{SiO}_2$ , формирование многослойных структур, включающих эти упаковки, и создание на их основе устройств электронной техники с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

### Получение кубических упаковок наносфер $\text{SiO}_2$ (опаловых матриц)

Процесс формирования наноструктуры на основе кубических упаковок наносфер  $\text{SiO}_2$  с размерами

сфер от 200 до 400 нм проводился с использованием специального технологического оборудования. Применялся способ получения сферических частиц кремнезема (аморфный  $\text{SiO}_2$ ), основанный на реакции гидролиза тетраэфира ортокремниевой кислоты (тетраэтаксилан  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ) в этаноле ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) в присутствии гидроксида аммония ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) [1]. На первой стадии реакции гидролиза образуются мелкие разветвленные полимерные частицы кремнезема, которые за счет внутренней поликонденсации превращаются в аморфные частицы сферической формы. После отстаивания суспензии и удаления гидролизата упорядоченный осадок представляет собой гидрогель с содержанием жидкости до 50—60 мас. %, мелкоподобный, легко ломающийся и иризирующий в отраженном свете. Сферические частицы  $\text{SiO}_2$  в такой структуре имеют соприкосновение, близкое к точечному, поэтому последовательно проводились операции по упрочнению образцов, включая удаление интермицеллярной жидкости. Слои опаловых матриц на подложках различных материалов (Si, поликор, ситалл, плавленный кварц и др.) формировали по специально разработанным методикам, включающим процессы сушки и седиментации.

После формирования правильной упаковки наносфер  $\text{SiO}_2$  на их основе различными методами (магнетронное распыление, CVD-методы, осаждение из раствора и другие) изготавливаются слоистые структуры. Для введения различных материалов в межсферические пустоты опаловой матрицы и формирования слоистых структур применялось серийное и специально разработанное и изготовленное оборудование [2].

Строение опаловых матриц, сформированных из наносфер  $\text{SiO}_2$  диаметром примерно 200 нм, анализировали методами электронной растровой (рис. 1, а), просвечивающей (рис. 1, б) и атомно-силовой микроскопии (рис. 1, в).

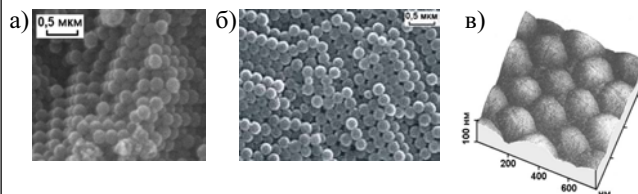


Рис. 1. Электронно-микроскопические снимки опаловой матрицы:

а — объемный фрагмент; б — поверхность; в — атомно-силовая микроскопия поверхности опаловой матрицы

На рис. 2 показаны результаты изучения реального строения трехмерных упаковок наносфер  $\text{SiO}_2$ . При формировании свободных (не на подложке) опаловых матриц большую роль в инициировании дефектов играет форма и размер образующих матрицу частиц  $\text{SiO}_2$ . Наличие разницы в диаметрах наносфер  $\Delta D > 10\%$  (рис. 2, а, б) приводит к формированию зернистого строения (рис. 2, в). Дислокации в такой структуре невозможны, т. к. опаловая матрица сформирована слабдеформируемыми сферами.

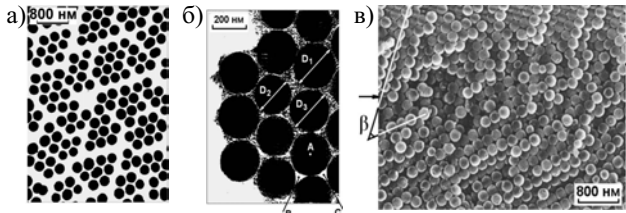


Рис. 2. Формирование в растворе твердых частиц наносфер  $\text{SiO}_2$  (а) и их объединение в объемную структуру (б); в — зернистое строение объемного фотонного кристалла на основе плотнейшей упаковки наносфер (граница зерен показана стрелками,  $\beta$  — угол разориентации зерен)

Фрагмент поверхности правильно упакованных наносфер  $\text{SiO}_2$  представлен на рис. 3, а. Каждая сфера  $\text{SiO}_2$  (шар А на рис. 3, б) в плоском плотнейшем слое окружена 6 треугольными зазорами — по 3 пары зазоров с противоположной ориентацией вершин. Общее число треугольных зазоров между сферами в два раза больше числа сфер. Поэтому верхний слой сфер  $\text{SiO}_2$  относительно нижнего может быть ориентирован либо по положениям В, либо по положениям С (рис. 3, б). При условии правильности упаковки (заполнение зазоров только В, или только С) число различных плотнейших упаковок при укладке каждого слоя бесконечно велико. В соответствии с обозначениями, введенными Н. В. Беловым, при использованных в работе условиях из наносфер  $\text{SiO}_2$  формировались трехслойные (кубические) структуры .../АСВ/АСВ/...=.../ккк/ккк/... (рис. 3) [3, с. 8—29].

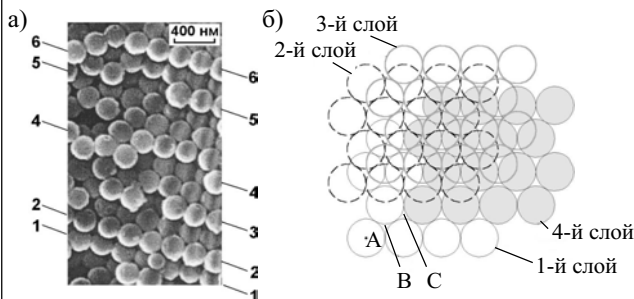


Рис. 3. а — электронно-микроскопический снимок фрагмента ступенчатой поверхности опаловой матрицы (1—6 — ступени по краям плоскостей  $\{111\}$ ); б — модель четырех (1—4 на рис. 3, а) последовательно плотноупакованных слоев наносфер  $\text{SiO}_2$

Правильность кубической упаковки наносфер  $\text{SiO}_2$  сохраняется и при введении в процессе формирования опаловых матриц в межсферические нанопоры различных веществ.

### Ненакаливаемые катоды на основе кубических упаковок наносфер $\text{SiO}_2$

Перспективы применения плоских дисплеев, обладающих улучшенными характеристиками, связаны с разработкой ненакаливаемых (автоэмиссионных) катодов на основе широкозонных полупроводниковых (алмаз, алмазоподобный углерод,  $\text{AlN}$  и других) материалов, обладающих при определенных условиях отрицательным электронным сродством [4, 5]. Стабильные эмиссионные характеристики наблюдаются у острых катодов [6, 7], но поскольку при их создании применяются литографические методы, то возможности получения центров эмиссии (острий) высокой плотности на поверхности большой площади достаточно ограничены. В настоящей работе высокая плотность (до  $2,5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ ) центров эмиссии на площади более  $200 \times 200 \text{ мм}$  достигалась использованием опаловых матриц (до 10 слоев), сформированных на подложках из  $\text{Si}$ , ситалла и плавленого кварца [8].

Поверхность опаловых матриц представляет систему острых катодов. Изменение конфигурации (заострение) сфер  $\text{SiO}_2$ , лежащих на поверхности, проводят нанесением на них слоев эмитирующего материала (алмазоподобный углерод (АПУ),  $\text{AlN}$ ), при этом могут быть использованы пассивные слои из металла или диэлектрика, на которые наносят эмитирующий слой. При использовании методов распыления эффект заострения связан с изменением скоростей формирования участков пленки, расположенных под различными углами относительно источника распыления [9] (рис. 4, а, б). В зависимости от толщины осажденного слоя меняется форма поверхности, получаемой при заострении сферы  $\text{SiO}_2$  (рис. 4, в—д).

В качестве плоского ненакаливаемого катода устройств отображения информации использовались слоистые структуры, включающие слои на основе опаловой матрицы (ОМ):  $\text{OM}/\text{Ni}/\text{АПУ}$ ,  $\text{OM}/\text{Ni}/\text{АПУ}/\text{AlN}$ ,  $\text{OM}/\text{АПУ}/\text{ZnO}$ ,  $\text{OM}/\text{Ti}/\text{АПУ}$  и др.

Для осаждения  $\text{Ni}$ ,  $\text{Ti}$ , АПУ,  $\text{AlN}$  и  $\text{ZnO}$  применялся метод магнетронного распыления. Пленки  $\text{Ni}$  и  $\text{Ti}$  получали магнетронным на постоянном токе распылением мишеней из  $\text{Ni}$  или  $\text{Ti}$  в  $\text{Ar}$ -плазме. Пленки  $\text{AlN}$ ,  $\text{ZnO}$  и АПУ формировали ВЧ магнетронным распылением  $\text{Al}$ ,  $\text{Zn}$  или графита в газовой смеси  $\text{Ar} + \text{N}_2$ ,  $\text{Ar} + \text{O}_2$  или  $\text{Ar} + \text{H}_2$ . Оптимальные условия осаждения пленок при формировании слоистых структур  $\text{OM}/\text{AlN}$ ,  $\text{OM}/\text{Ni}/\text{АПУ}$  и других приведены в таблице. Пленки алмазоподобного углерода на поверхность опаловых матриц осаждали также из газовой смеси  $\text{CH}_4 + \text{H}_2$  методами тлеющего и СВЧ-разрядов (рис. 5).

Эмитирующим материалом ненакаливаемых катодов служили пленки алмазоподобного углерода, содержащие фазу кристаллического алмаза (степень кристалличности  $< 2 \text{ об.}\%$ ). При осаждении углеродных материалов создавались условия, позволяющие формировать пленки с минимальным размером областей когерентного рассеяния, т. к. именно им соответствуют максимумы тока эмиссии.

Эмиссионные свойства углеродных пленок значительно улучшаются с увеличением их дефектности вплоть до формирования рентгеноаморфного материала. Для таких эмиттеров пороговое значение на-

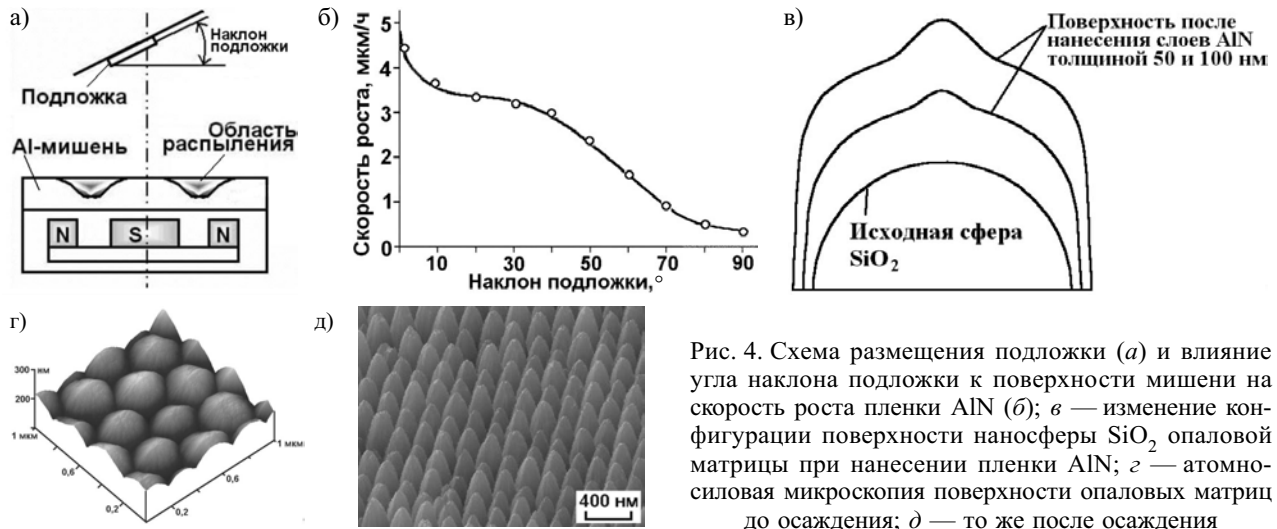


Рис. 4. Схема размещения подложки (а) и влияние угла наклона подложки к поверхности мишени на скорость роста пленки AlN (б); в — изменение конфигурации поверхности наносферы SiO<sub>2</sub> опаловой матрицы при нанесении пленки AlN; з — атомно-силовая микроскопия поверхности опаловых матриц до осаждения; д — то же после осаждения

Оптимальные условия осаждения пленок методом магнетронного распыления при формировании слоистой структуры OM/ZnO(AlN, Ni, Ni + АПУ)

Параметр	ZnO	AlN	Алмазоподобный углерод	Ni	Ti
Состав газовой смеси	Ar + +(90... 100) об.% O <sub>2</sub>	Ar + +(40... 60) об.% O <sub>2</sub>	Ar + +(10... 20) об.% H <sub>2</sub>	Ar	Ar
Давление в вакуумной камере, Па	0,5—2	0,5—2	0,5—2	0,5—2	1—2
Напряжение ВЧ-разряда, В	130—250	300—550	300—600	—	—
Мощность ВЧ-разряда, Вт	80—150	120—200	150—200	—	—
Температура подложки, К	373—573	373—573	373—573	373—573	373—573
Напряжение разряда постоянного тока, В	—	—	—	300—400	250—300
Ток разряда постоянного тока, А	—	—	—	1	2

пряженности электрического поля, при котором наблюдается полевая эмиссия электронов, находится в пределах от 2 до 20 В/мкм. Разработанная установка [2] позволила формировать при низких температурах (<550 К) рентгеноаморфные пленки АПУ (концентрация алмазной фазы <2 об.%), что обеспечивает сохранность строения опаловой матрицы и эмиссионных свойств углеродной пленки. Применение для формирования пленок АПУ метода тлеющего разряда осложнено размягчением и плавлением опаловой матрицы при температурах >900 К, необходимых для получения углеродных пленок с хорошими функциональными характеристиками.

Кристаллические и аморфные пленки AlN, ZnO и других материалов наносили на ростовую поверхность пленок алмазоподобного углерода для снижения порога эмиссии. Сплошная пленка АПУ осаждается

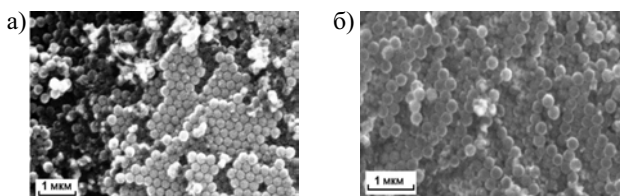


Рис. 5. Строение поверхности опаловой матрицы после осаждения методами магнетронного распыления и СВЧ-разряда двухслойной структуры: слой никеля толщиной 0,1 мкм и слой алмазоподобного углерода толщиной 0,3 мкм: а — снимок сделан перпендикулярно плоскости {111} опаловой матрицы; б — под углом 10° к плоскости {111}

толщиной до 1,5 мкм. При осаждении АПУ на опаловую матрицу методом тлеющего разряда (1200 К) эмитирующая поверхность искривлялась, поэтому зазор между катодом и анодом в процессе исследования эмиссионных свойств был различным по поверхности эмиттера (при этом отдельные наносферы сохраняют свою индивидуальность — см. рис. 6).

Измерение эмиссионных характеристик планарных катодов на основе опаловых матриц проводилось в импульсном режиме при давлении  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па [10]. Использовали специально разработанную вакуумную установку. Зазор между катодом и анодом в процессе исследования эмиссионных свойств составлял  $\Delta = 160 \dots 500$  мкм (рис. 7). Величина напряженности электрического поля в зазоре между анодом и катодом (подложкой с нанесенной слоистой структурой)

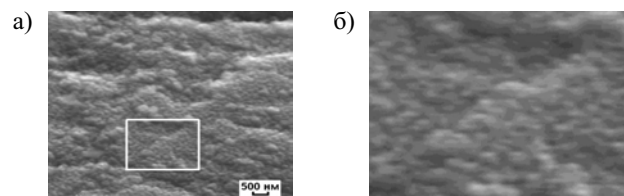


Рис. 6. Строение поверхности опаловой матрицы (а) после осаждения двухслойной структуры — методом магнетронного распыления слоя титана толщиной 0,5 мкм и методом тлеющего разряда — слоя алмазоподобного углерода толщиной 1,5 мкм; б — увеличенный фрагмент, выделенный на а прямоугольником

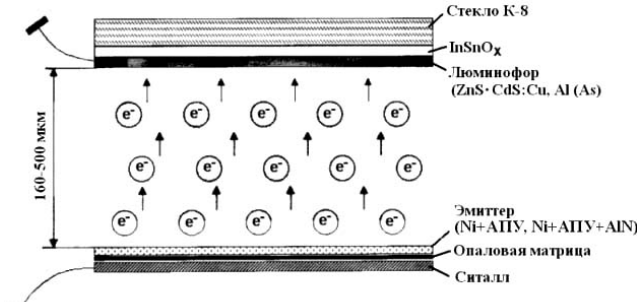


Рис. 7. Схема устройства для измерения вольт-амперных характеристик и оценки числа эмиссионных центров не накаливаемых катодов на основе слоистой структуры "подложка/SiO<sub>2</sub>/эмитирующий слой"

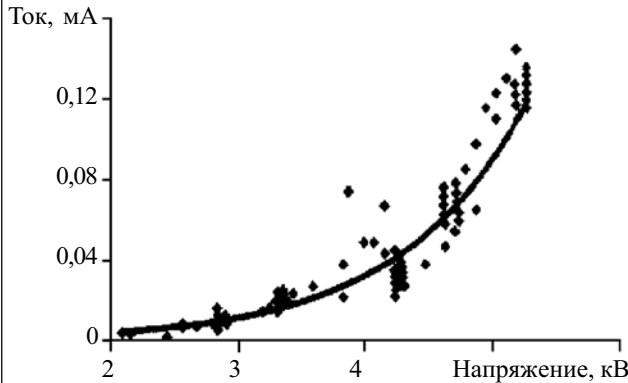


Рис. 8. Вольт-амперная характеристика слоистой структуры "опаловая матрица/алмазоподобный углерод"

равна  $E = U/\Delta$ , где  $U$  — разность потенциалов между электродами.

На рис. 8 представлена вольт-амперная характеристика структуры ОМ/АПУ, в которой слой алмазоподобного углерода получен методом тлеющего разряда. При этом расстояние между соседними остриями (центрами эмиссии) их правильных рядов равнялось диаметру наносфер SiO<sub>2</sub> и составляло примерно 200 нм. Измерение вольт-амперной характеристики проводили при следующих условиях: зазор между анодом и катодом 500 мкм, частота 50 Гц, длительность импульса 30 мкс.

**Фотодиоды на основе 3D слоистых структур**

Получена возможность изготовления фотодиодов на основе 3D слоистых структур. Повышенная эффективность таких фотодиодов связана с большей на порядок активной площадью фотовольтаической структуры. Наиболее перспективный путь увеличения эффективной площади поверхности фотовольтаических структур при минимальном объеме — использование в качестве подложки опаловых матриц.

При формировании фотодиодов использовали слоистую структуру AlN:Zn/алмаз:В, содержащую AlN, легированный цинком, и алмаз, легированный бором [11]. Структуру Si/AlN:Zn/алмаз:В получали последовательным формированием AlN и алмаза на слое наносфер SiO<sub>2</sub>, осажденных на Si{100}-подложке. Легирование пленок AlN цинком в процессе их формирования проводилось методом ВЧ магнетронного распыления составной мишени, изготовленной за-

креплением на Al-мишени пластины из Zn [9]. Для синтеза содержащих алмазную фазу углеродных слоев методом нагретой нити применялась специально разработанная установка. Осаждение алмаза производилось в H<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub> газовой смеси при давлении 3 кПа, расходе газа 5 л/ч, температурах W-активатора 2273 К и подложки — 800—1000 К. Для придания алмазу полупроводниковых свойств его в процессе выращивания легировали бором, который вводился в алмазную пленку испарением из графитового контейнера (температура кристаллизации алмаза 1273 К, температура контейнера с бором 610—890 К).

С увеличением концентрации легирующей примеси в пленках AlN содержание кристаллической фазы уменьшается и при концентрации примерно 2 ат.% не превышает 50 об.%. Легирующая примесь размещается в виде отдельных атомов как в кристаллической, так и в аморфной фазах AlN, а также осаждается в виде включений металла и соответствующего нитрида по границам волокон (рис. 9), которые, по данным оже-электронной спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии, вплоть до концентрации примеси 10 ат.% — рентгеноаморфные.

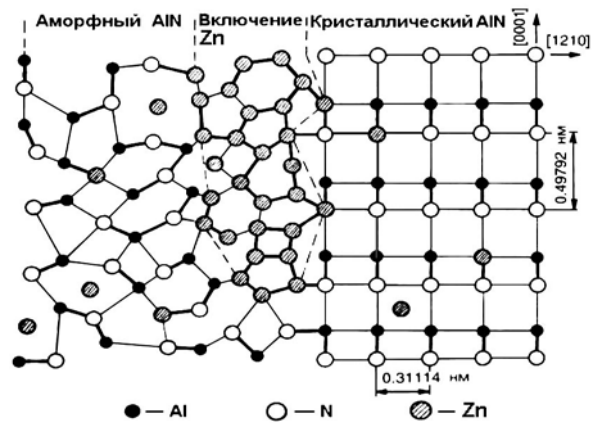


Рис. 9. Схема атомного строения сильно легированных цинком пленок AlN

Концентрация примеси ( $C_{Zn}$ ) в пленках AlN, полученных распылением составных мишеней, зависела от соотношения площадей Al и пластины Zn — источника примеси на поверхности мишени в области распыления ( $S_{Al}$  и  $S_{Zn}$ ), их коэффициентов распыления ( $K_{Al}$  и  $K_{Zn}$ ) и условий процесса роста (расположение подложки относительно мишени и др.). Содержание примеси Zn в пленке AlN, полученной распылением составной мишени, рассчитывается по соотношению  $C_{Zn} = S_{Zn} S'_{Zn} K_{Zn} / (S_{Al} S'_{Al} K_{Al})$ , где  $S'_{Al}$  и  $S'_{Zn}$  — площади профиля областей распыления Al и пластины Zn, измеренные по профилограммам.

При легировании примесь Zn содержится в виде отдельных атомов как в кристаллической, так и в аморфной фазах нитрида алюминия. Суммарную концентрацию примеси контролировали методом электронно-зондового спектрального анализа, при этом содержание примеси в аморфной и кристаллической фазах AlN определяли методом инверсионной вольт-амперометрии (применялась методика контролируемого селективного растворения фаз пленки). При

размещении подложки вне зоны воздействия паров металла распылением составной мишени с площадью Zn-пластины на поверхности области распыления Al-мишени примерно 0,3% получены пленки AlN:Zn, содержащие суммарную концентрацию Zn примерно 0,156 ат.%. При поступлении паров Zn его концентрация в пленке превышала 15 мас.% и наблюдалось выделение рентгеноаморфных и кристаллических фаз Zn и  $ZnN_x$  ( $Zn_3N_2$ ).

При воздействии УФ-облучения на контактных площадках (слой полупрозрачного Ti), нанесенных на AlN и АПУ, возникло напряжение до 0,8 В (рис. 10). В исследованной гетероструктуре AlN содержал Zn с суммарной концентрацией 0,156 ат.%. (отношение концентраций Zn в аморфной и кристаллической фазах пленки AlN составляет 2,3 при степени кристалличности пленки 40 об.%), а концентрация бора в алмазе составляла примерно  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

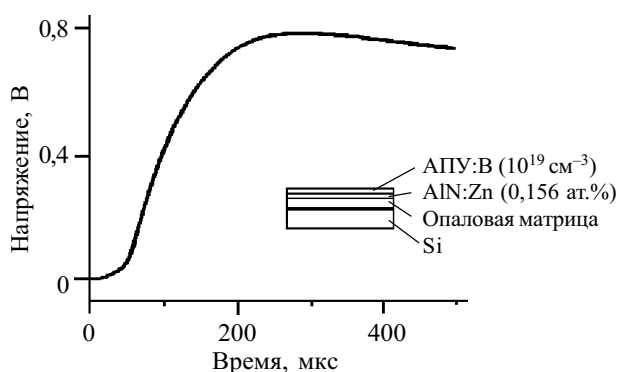


Рис. 10. Напряжение, возникающее на контактных площадках слоистой структуры АПУ:В/AlN:Zn при УФ-облучении

Применение опаловых матриц в качестве подложек позволяет увеличить облучаемую поверхность активной полупроводниковой структуры при том же объеме устройства. Следует отметить, что в  $1 \text{ см}^3$  опаловой матрицы с диаметром наносфер  $\text{SiO}_2$  200 нм суммарная поверхность наносфер составляет  $10 \text{ м}^2$ .

В процессе работы были исследованы структуры, содержащие слои GaSb, AlN:Sm (Eu, Tb и др.), ZnO, BN и др.

#### Заключение

Таким образом, разработаны технологии получения опаловых матриц (правильных кубических упаковок наносфер  $\text{SiO}_2$ ) в виде объемных материалов и слоев на различных подложках.

Одновременно показана возможность использования материалов на основе правильных упаковок наносфер  $\text{SiO}_2$  в составе слоистых структур "опаловая матрица/полупроводник(диэлектрик)" в качестве острийных ненакаливаемых катодов с плотностью центров эмиссии до  $2,5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ .

Применение упорядоченных наноструктур на основе опаловых матриц позволяет более чем на порядок увеличить эффективную площадь активной структуры фотодиодов.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Самойлович М. И., Клещева С. М., Белянин А. Ф. и др. Исследование свойств и перспективы применения трехмерных наноконструктов на основе упорядоченных упаковок наносфер кремнезема / В кн.: Материалы, оборудование и технологии наноэлектроники и микрофотоники.— Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2003.— С. 223—268.
2. Белянин А. Ф., Гурьянов А. В., Дзбановский Н. Н. и др. Установка для формирования многослойных структур и введения веществ в межсферические поры наносфер опаловых матриц // Мат-лы 1 Межрегионального семинара "Нанотехнологии и фотонные кристаллы".— Йошкар-Ола.— 2003.— С. 60—75.
3. Белов Н. В. Структура ионных кристаллов и металлических фаз.— М.: Изд-во АН СССР, 1947.
4. Himpel F. J., Knapp J. A., Van Vechten J. A. et al. Quantum photoyield of diamond (111) — a stable negative-affinity emitter // Phys. Rev.— 1979.— Vol. B 20.— P. 624—627.
5. Benjamin M. C., Wang V., Davis R. F. et al. Observation of a negative electron affinity for heteroepitaxial AlN on a-(6H)—SiC(0001) // Appl. Phys. Lett.— 1994.— Vol. 64 (24).— P. 3288—3290.
6. Spitsyn B. V., Zhirmov V. V., Blaut-Blachev A. N. et al. Field emitters based on Si tips with AlN coating // Diamond and Related Materials.— 1998.— N 7.— P. 692—694.
7. Елинсон М. И., Кудинцева Г. А., Кулопин Ю. А. и др. Ненакаливаемые катоды.— М.: Сов. радио, 1974.
8. Белянин А. Ф., Самойлович М. И., Житковский В. Д. и др. Ненакаливаемые катоды на основе 3D материалов с запрещенной фотонной зоной (опаловые матрицы) // Мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. "Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения".— Москва.— 2003.— С. 20—22.
9. Белянин А. Ф. Получение пленок AlN (обзор) // Мат-лы 7 Междунар. симпоз. "Тонкие пленки в электронике".— Йошкар-Ола.— 1996.— С. 167—212.
10. Белянин А. Ф., Семенов А. П., Семенова И. А. и др. Эмиссионные свойства слоистых структур Si/алмаз и Si/алмаз/AlN // Мат-лы 8 Междунар. науч.-техн. конф. "Высокие технологии в промышленности России".— Москва.— 2002.— С. 112—121.
11. Teremetskaya I. G., Vamin V. P., Polyakov V. I. et al. Characterisation of diamond films grown on AlN/silicon substrates and of heterostructures with such films / In book: Applications of Diamond Films and Related Materials.— USA, Gaithersburg, 1995.— P. 469—472.



### К сведению авторов и читателей журнала

Редакция журнала "Технология и конструирование в электронной аппаратуре" работает в режиме книжно-журнального издательства и принимает заказы на изготовление книг и брошюр.

Сотрудничество с нами — это экономическая поддержка журнала.

Приглашаем!

☎ Справки по тел. +38-(048) 728-18-50



Редакция журнала "ТКЭА"

И. В. ДОКТОРОВИЧ, д. ф.-м. н. И. М. ФОДЧУК,  
В. К. БУТЕНКО, д. т. н. В. Н. ГОДОВАНЮК, В. Г. ЮРЬЕВ

Украина, г. Черновцы, ЦКБ "Ритм", Черновицкий нац. ун-т  
им. Юрия Фельковича  
E-mail: rhythm@chv.ukrpack.net

Дата поступления в редакцию  
02.11 2004 г.

Оппонент д. т. н. В. И. ОСИНСКИЙ  
(Центр оптоэлектронных технологий, г. Киев)

## ОПТИЧЕСКИЙ АТТЕНЮАТОР

*Описан прецизионный оптический аттенюатор, предназначенный для использования в установках измерения параметров передающих и приемных модулей волоконно-оптических линий связи.*

На сегодня промышленностью выпускается ряд генераторов оптических сигналов (ОГ4-162, ОГ5-87), предназначенных для настройки, регулировки и испытаний устройств и элементов световодных систем связи и передачи информации, и ваттметров поглощаемой оптической мощности (ОМЗ-65, ОМЗ-77), предназначенных для измерения среднего значения мощности непрерывного оптического излучения в световодных системах связи [1].

Вместе с тем при проверке параметров изготавливаемых передающих и приемных модулей волоконно-оптических линий связи возникает потребность создания перепада потока излучения оптическими средствами, не меняя режимов работы модулей. В Украине нет разработок таких средств измерений.

В рамках решения задачи метрологического обеспечения выпуска модулей волоконно-оптических линий связи авторами рассматривались различные схемы, с помощью которых можно создать перепад потока излучения оптическими средствами.

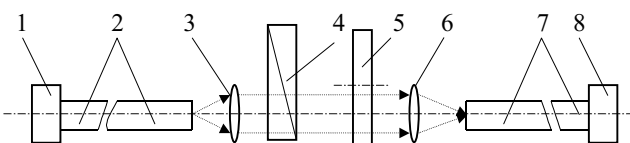
Один из способов — ослабление мощности оптического излучения, основанное на изменении расстояния между передающим и приемным модулями. Для этого достаточно изменять расстояние между световодами, подсоединенными к источнику и приемнику излучения. Однако передача оптического излучения от одного световода к другому с диаметром сердцевины 50 мкм связана с определенными трудностями: поперечное смещение световодов друг относительно друга; угловая несогласованность главных оптических осей; неадекватная установка ослабления светового потока при одинаковых перемещениях световодов и т. д.

Описанный способ является достаточно распространенным и используется для ослабления светового потока, однако он дает низкую повторяемость результатов измерения, а следовательно, и большую погрешность. Улучшить точность этого метода можно используя точную механику и тщательно юстируя выходной и входной торцы световолокон, но это приведет к удорожанию оснастки и усложнит его при ис-

пользовании. По нашему мнению, способ может быть использован лишь для качественной оценки волоконно-оптических модулей.

Опробован и другой метод — метод ослабления мощности оптического излучения при помощи светофильтров, которые вводятся между жестко зафиксированными передающим и приемным модулями. Для этого метода достаточно подобрать марку стекла [2] и рассчитать коэффициенты ослабления потока излучения с заданным шагом ослабления. Однако этот метод также имеет высокую погрешность измерения параметров испытываемых модулей. Причина в том, что при прохождении излучения с малыми размерами пучка (50...60 мкм) происходит рассеивание на микронеровностях поверхности светофильтра и в самом стекле, а улучшение качества обработки поверхности светофильтра не улучшает существенно точности измерения.

С учетом упомянутых методов ослабления потока излучения была разработана установка, оптическая схема которой приведена на рисунке. В установке при измерениях параметров передающих модулей используется калиброванный приемный модуль, и наоборот, при измерениях приемного модуля используется передающий.



Оптическая схема установки для измерения параметров передающих и приемных модулей волоконно-оптических линий связи:

1 — передающий модуль; 2, 7 — волоконно-оптический световод; 3, 6 — объектив; 4 — клиновидный ослабитель; 5 — турель с дискретными ослабляющими элементами; 8 — приемный модуль

Оптические элементы 2—7 составляют оптический ослабитель (аттенюатор). Конструктивно он выполнен в виде моноблока, в котором жестко закреплены световоды, объективы и механизмы установки уровня ослабления светового потока. Механизм с клиновидным ослабителем обеспечивает плавное изменение потока излучения, механизм с элементами дискретного ослабления обеспечивает ступенчатое ослабление.

Световоды, оптические разъемы которых являются входом и выходом аттенюатора, введены в аттенюатор для того, чтобы исключить влияние на результаты измерения поперечного смещения и углового несогласования главных оптических осей испытуемых модулей и объективов. Известно [3], что современные оптические разъемы обеспечивают высокую надежность оптического контакта элементов и повторяемость результатов измерения. Поэтому отъюстировав один раз систему "выход световода 2 — объектив 3 и объектив 6 — вход световода 7", мы снимаем необходимость доюстирования передающего или приемного модуля относительно оптической системы при каждой смене модуля.

Как видим, в данной схеме в пучок потока излучения также вводятся ослабляющие элементы из стекла (4 и 5). Однако они вводятся в квазипараллельный поток, диаметр которого определяется максимальным углом ввода-вывода потока в волоконно-оптический световод. Если числовая апертура волокна будет равна 0,25, то максимальный угол ввода-вывода потока будет приблизительно равен  $15^\circ$  [4]. При фокусном расстоянии объектива  $f_{об} = 10$  мм световой диаметр будет приблизительно равен 5 мм. При таком световом диаметре искажения потока излучения микронеровностями поверхности и дефектами в объеме светофильтра, а соответственно и увеличение погрешности изменений параметров модулей, незначительны.

В качестве светофильтров использованы фильтры из нейтрального стекла типа НС. После определения коэффициентов пропускания  $\tau_\lambda$  и расчета коэффициентов поглощения  $K_\lambda$  [2, 5] были пересчитаны толщины и изготовлены фильтры с ослаблением потока излучения от 0 до 30 дБ (с шагом 2 дБ). Отличие реальных значений коэффициентов ослабления фильтров от номинальных (рассчитанных) не превышает  $\pm 0,7\%$ .

Клиновидный ослабитель, изготовленный в виде диска, плотность которого меняется вдоль диаметра, обеспечивает плавное ослабление потока излучения в пределах 2 дБ (коэффициент ослабления изменяется от 0 до 1,58) при повороте ослабителя на угол  $180^\circ$ .

Для устранения изменения хода лучей ослабитель изготовлен в классическом варианте — из двух склеенных клиньев, один из которых изготовлен из нейтрального стекла типа НС, другой — из прозрачного. В таком виде ослабитель представляет собой плоскопараллельную пластину, где, как известно [6], при прохождении лучей по нормали к плоскости изменения хода лучей не происходит.

В предложенной конструкции аттенюатора погрешность установки (задания) угла поворотного механизма клиновидного ослабителя определяет погрешность

задания коэффициента ослабления. Погрешность установки угла не превышает  $\pm 1^\circ$ . Если учесть, что ослабление пучка излучения происходит на диаметре 100 мм, то погрешность задания коэффициента плавного ослабления не выходит за пределы  $\pm 0,9\%$ . Это достаточно малая величина, т. е. после нанесения шкалы на поворотный механизм и юстирования в оптическом аттенюаторе получена возможность достаточно точно устанавливать коэффициент плавного ослабления потока излучения.

Нами проведены исследования параметров изготовленного оптического аттенюатора и определена основная относительная погрешность установки коэффициентов ослабления. Результаты измерений приведены ниже.

Рабочий спектральный диапазон, $\lambda_{раб}$	$850 \pm 50$ нм
Пределы дискретного изменения коэффициента ослабления (с шагом 2 дБ), $D_{диск}$	0—30 дБ
Пределы плавного изменения коэффициента ослабления, $D_{пл}$	0—2 дБ
Коэффициент ослабления аттенюатора (при $D_{диск} = 0$ дБ и $D_{пл} = 0$ дБ), $D_{ат}$	3,5 дБ
Неповторяемость установки $D_{диск}$ и $D_{пл}$ , $\delta_D$	$\pm 0,5\%$
Основная относительная погрешность установки коэффициента ослабления, $\delta_D$	$\pm 2,5\%$

### Выводы

Разработанный оптический аттенюатор представляет собой прецизионный оптический узел установки для проверки параметров передающих и приемных модулей волоконно-оптических линий связи, обеспечивающий высокую точность и повторяемость результатов измерений.

Оригинальная конструкция клиновидного ослабителя имеет малые размеры и может быть использована при конструировании малогабаритных оптических узлов, где требуется плавное изменение коэффициента ослабления.

При необходимости пределы изменения коэффициентов ослабления аттенюатора можно установить другими, выбрав соответствующие марки стекла.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Мат-лы III Междунар. выставки "Связь-86".— Москва, "Красная Пресня".— 1986.
2. Каталог цветного стекла.— М.: Машиностроение, 1967.
3. Гауэр Дж. Оптические линии связи.— М.: Энергоиздат, 1988.
4. Справочник по волоконно-оптическим линиям связи / Под ред. С. В. Свечникова, Л. М. Андрущенко.— К.: Техника, 1988.
5. ГОСТ 9411—78. Стекло цветное оптическое.— М.: Изд-во стандартов, 1978.
6. Ландсберг Г. С. Оптика.— М.: Наука, 1976.

Д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК, к. ф.-м. н. В. Н. КАТЕРИНЧУК,  
О. Н. СИДОР

Украина, Черновицкое отд. Института проблем материаловедения  
им. И. Н. Францевича  
E-mail: chimsp@unicom.cv.ua

Дата поступления в редакцию  
30.09 2004 г.

Оппонент д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ  
(Институт термоэлектричества,  
г. Черновцы)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИММЕТРИЧНОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ "ОКИСЕЛ–InSe–ОКИСЕЛ"

*Показана возможность изготовления качественного фототранзистора  $n-p-n$ -типа на основе формирования двойной гетероструктуры "окисел–InSe–окисел".*

По некоторым физическим свойствам кристаллы InSe и Si очень похожи. В первую очередь это касается ширины запрещенной зоны  $E_g$ , которая при комнатной температуре составляет соответственно 1,2 и 1,1 эВ. В то же время имеются между ними и существенные различия.

Низкая температура плавления InSe ( $\approx 650^\circ\text{C}$ ) не позволяет использовать диффузионные методы, присущие Si-технологии, для создания различных электронных приборов.

Кремниевые структуры не всегда могут отвечать требованиям радиационной стойкости. Отличительными свойствами InSe являются ярко выраженное слоистое строение кристаллов, их радиационная стойкость [1].

Подложки из кристаллов InSe не требуют никаких дополнительных обработок поверхности и могут быть доведены до пленочной толщины в несколько микрометров.

Обнаруженная нами металлическая проводимость и высокая прозрачность собственных окислов InSe позволяет создавать при определенных температурно-временных условиях гетероструктуры с удовлетворительными и воспроизводимыми фотоэлектрическими параметрами [2, 3].

Целью данной работы является изготовление на основе  $p$ -InSe двойной гетероструктуры "окисел–InSe–окисел" и исследование ее фотоэлектрических свойств на предмет обнаружения фототранзисторного эффекта.

Особенностями гетероструктуры "собственный окисел—полупроводник" является то, что величина потенциального барьера может достигать максимального значения — половины ширины запрещенной зоны InSe, т. е. 0,6 эВ [3]. Это обстоятельство способствует низким значениям темнового тока насыщения гетероструктуры. Проводящий окисел при этом играет роль широкозонного окна с низким поверхностным сопротивлением.

Таким методом нами создавались фототранзисторы  $n-p-n$ -типа. Расстояние между гетероструктурами в фототранзисторе может быть уменьшено до необходимой величины путем соответствующего

выбора начальной толщины образца. Для получения тонкой базы учитывались как коэффициент поглощения света ( $10^3 \text{ см}^{-1}$  [4]), так и диффузионная длина носителей поперек слоев в полупроводнике ( $10-20 \text{ мкм}$  [5]).

В наших экспериментах использовались образцы кристаллов с толщиной от 10 до 200 мкм. Качество поверхности таких тонких пластин кристаллов контролировалось на предмет обнаружения обрывов слоев или других дефектов с помощью микроскопа.

Затем подготовленные образцы помещались в электропечь с контролируемой и стабилизированной температурой. Окисление образцов проводилось на воздухе при температуре  $450^\circ\text{C}$  и четырехсуточной их выдержке. После окисления образцы обрезались с торцов для предупреждения эффекта короткого замыкания. Омические контакты на эмиттерном и коллекторном переходах получали сплавлением чистого индия. Контакт с базой отсутствовал.

Статические темновые и световые вольт-амперные характеристики (ВАХ) двойной гетероструктуры "окисел–InSe–окисел" определялись на установке Schlumberger SI с компьютерной обработкой данных. Исследовались образцы различной исходной толщины.

Полученные  $n-p-n$ -структуры являются симметричными по отношению к полярности приложенного смещения. Фототранзисторный эффект наблюдался в случае прямого смещения освещаемого  $p-n$ -перехода (эмиттер). Второй  $p-n$ -переход был обратно смещен и служил коллектором. Контакт с базой отсутствовал. Таковым является включение биполярного фототранзистора по схеме с общим эмиттером. В этом случае фототранзистор обладает наибольшей фоточувствительностью [6, с. 383]. В случае изменения полярности смещения двойная гетероструктура представляла собой последовательное включение обратносмещенного диода с прямосмещенным. Обе ситуации включения двойной гетероструктуры иллюстрирует **рис. 1**.

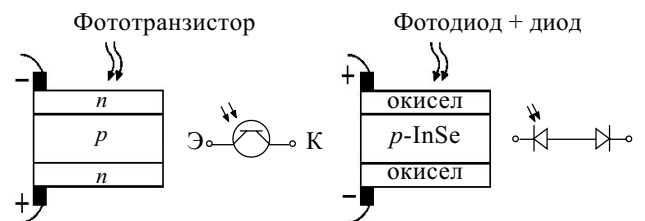


Рис. 1. Схематическое изображение структуры и ее эквивалентная схема (Э — эмиттер, К — коллектор)

На рис. 2 приведены ВАХ, которые отвечают рассмотренным двум случаям подключения структуры "окисел—InSe—окисел" при различной освещенности. Хорошо видно, что в режиме фототранзистора семейство ВАХ расположено от начала координат, а при изменении полярности приложенного напряжения, т. е. в режиме фотодиода, — сдвинуто по оси ординат на величину токов короткого замыкания  $J_{кз}$ .

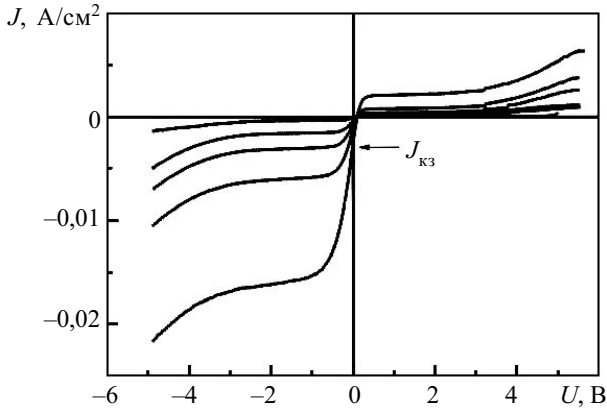


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики двойной гетероструктуры "окисел—InSe—окисел" для толщины образца 60 мкм и разных уровней освещения

Как видно из рис. 2, фототоки насыщения превышают коллекторный ток фототранзистора. Слабое усиление фототранзистора обусловлено малой диффузной длиной неосновных носителей  $L_n$  в сравнении с толщиной базы  $d$ , которую практически можно считать толщиной исходных подложек InSe. Вместе с тем ВАХ свидетельствуют, что инжектированные эмиттером неосновные носители тока частично захватываются коллекторным переходом.

Поскольку толщина базы влияет на коэффициент усиления фототранзистора, то исследовались образцы разной исходной толщины. На рис. 3 показаны такие ВАХ для одного и того же уровня освещения и разных направлений приложенного смещения.

Фототок насыщения фотодиодов разной толщины иллюстрирует рис. 3, а. Совпадение кривых 2—4 показывает, что сформированные на разных подложках гетероструктуры "окисел—InSe" обладают близкими характеристиками. Резкий рост фототока для более тонкого образца (кривая 1) связан с частичным освещением тыльной гетероструктуры "окисел—InSe", которая играет в предложенной схеме роль последовательного сопротивления.

В режиме фототранзистора (рис. 3, б) мы также наблюдаем практически совпадение коллекторного тока для разных образцов фототранзистора (кривые 2—4). Это объясняется рекомбинацией инжектированных эмиттером носителей в толстой базе. Значительное усиление фототока наблюдается лишь для образца толщиной 14 мкм. Особенность такого усиления заключается в том, что при определенных напряжениях, которые зависят от уровня освещения, плотность тока резко возрастает и может достигать значительных величин — 60—100 мА/см<sup>2</sup>.

На рис. 4 приведены ВАХ фототранзистора для образца толщиной 14 мкм. Хорошо видно, что при малых уровнях освещения фототранзисторный эффект

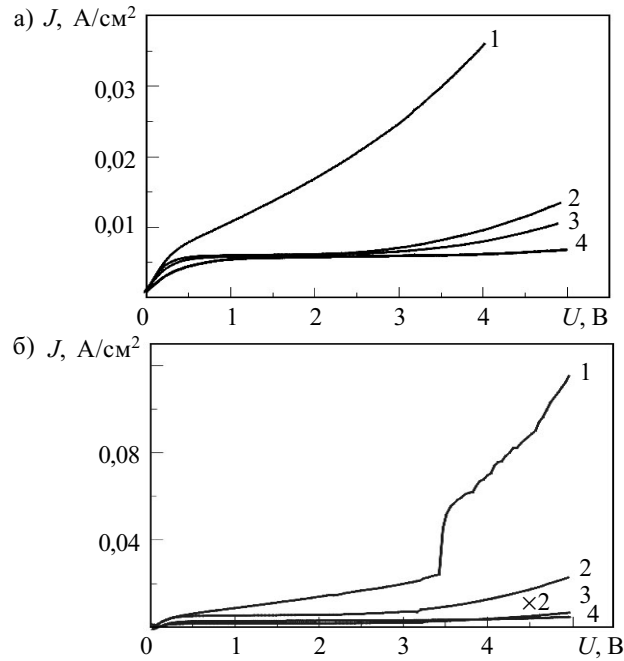


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики двойной гетероструктуры "окисел—InSe—окисел" в режиме фотодиода (а) и фототранзистора (б) при одинаковом уровне освещения для образцов разной исходной толщины: 1 — 14 мкм; 2 — 220; 3 — 60; 4 — 93 мкм. Кривые 2—4 на б изображены в масштабе 2:1

выражен слабо. С увеличением освещения фототранзистор переключается при определенных напряжениях из высокоомного в низкоомное состояние. При напряжениях смещения  $U_1, U_2, U_3$  существенный рост тока коллектора происходит за счет изменения потенциала базы. Оно вызвано освещением эмиттера и, частично, коллектора, которое приводит к дополнительной инжекции неосновных носителей заряда из эмиттера и перехода дырок в базу из коллекторного перехода. Происходит снижение потенциального барьера коллекторного перехода и наступает обратимый пробой фототранзистора.

При напряжениях пробоя статический коэффициент передачи тока эмиттера равен 1. Как видно из рис. 4, с увеличением уровня освещения напряжение пробоя фототранзистора уменьшается ( $U_1 > U_2 > U_3$ ), а ВАХ

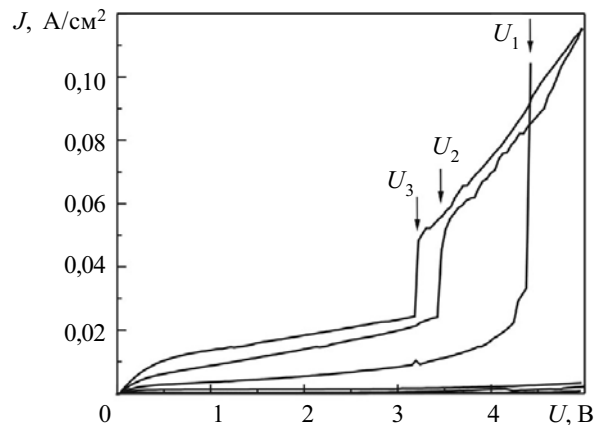


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики двойной гетероструктуры "окисел—InSe—окисел" при исходной толщине образца 14 мкм и разных уровнях освещения

переходит из нарастающей вертикальной в наклонную зависимость.

\*\*\*

Таким образом, показана возможность изготовления качественного фототранзистора *n-p-n*-типа на основе формирования двойной гетероструктуры "окисел-InSe-окисел".

Значительное усиление фототока в фототранзисторе имеет место лишь для толщин исходных образцов, которые сравнимы с диффузионной длиной основных носителей заряда.

Особенностью усиления фототока является переход фототранзистора из высокоомного в низкоомное состояние лишь при определенных приложенных напряжениях и уровне освещения. Чем выше уровень освещения, тем меньше напряжение такого перехода. Плотность токов через фототранзистор при таком переходе может достигать 60—100 мА/см<sup>2</sup>.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Kovalyuk Z. D., Katerynychuk V. M., Mintyanski I. V. et al. Gamma radiation influence on the photoelectrical properties of oxide-p-InSe heterostructure / E-MRS Spring Meeting Conference. Symposium D: Functional oxides for advanced semiconductor technologies.— Strasbourg (France).— 2004.
2. Катеринчук В. Н., Ковалюк М. З. Гетеропереходы из InSe, сформированные термическим окислением кристаллической подложки // Письма в ЖТФ.— 1992.— Т. 18, № 12.— С. 70—72.
3. Kovalyuk Z. D., Katerynychuk V. M., Savchuk A. I., Sydor O. M. Intrinsic conductive oxide — p-InSe solar cells // Materials Science and Engineering B.— 2004.— Vol. 109.— P. 252—255.
4. Landolt-Börnstein. Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. New Ser. Group III: Crystal and Solid State Physics. Vol. 17, subvol. f / Ed. by O. Madelung.— Berlin e. a.: Springer, 1983.
5. Martinez-Pastor J., Segura A., Valdes J. L., Chevy A. Electrical and photovoltaic properties of indium-tin-oxide/p-InSe/Au solar cells // J. Appl. Phys.— 1987.— Vol. 62, N 4.— P. 1477—1483.
6. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 2.— М.: Мир, 1984.

К. т. н. Н. Г. ДЖАВАДОВ

Азербайджан, г. Баку, ПО «Промавтоматика»  
E-mail: cavadov\_natig@mail.az

Дата поступления в редакцию  
09.11 2004 г.

Оппонент д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ  
(ДонНУ, г. Донецк)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНОК ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ФИЛЬТРОВЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРИБОРАХ

*Использование пленок поликристаллического кремния вместо монохроматических фильтров на основе стекла позволяет упростить конструкцию фильтровых спектральных приборов.*

Возможность дальнейшего совершенствования показателей узкополосных интерференционных световых фильтров позволяет рассматривать фильтровые спектральные приборы в качестве перспективных инструментов для дистанционных исследований малых газовых составляющих атмосферы. Например до настоящего времени для исследования озонового слоя широко применяется фильтровый озонометр типа М-83 и его модификации [1]. Обладая существенной простотой конструкции и дешевизной, эти озонометры по точности уступают спектрометрам Добсона [2]. Однако потенциальные возможности проведения озонометрических измерений с высокой степенью достоверности с помощью фильтровых озонометров еще не до конца раскрыты.

В настоящей работе исследованы фотоэлектрические свойства пленок поликристаллического кремния с целью использования их в фильтровых спектральных приборах.

На рис. 1 показан один из вариантов модели оптико-электронного тракта спектрального прибора, где

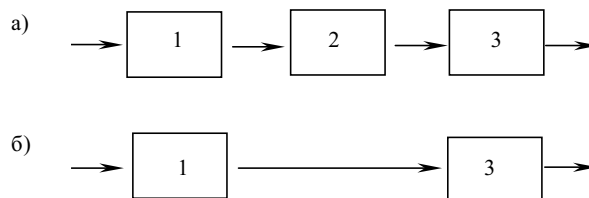


Рис. 1. Варианты модели оптико-электронного тракта фильтрового спектрального прибора:

1 — интерференционный фильтр; 2 — светофильтр; 3 — фоторезистор

через интерференционный фильтр проходят световые сигналы как основной длины волны  $\phi_0(\lambda_1)$ , так и удвоенной —  $\phi_0(2\lambda_1)$ .

Для подавления сигнала удвоенной длины волны в варианте рис. 1, а используется цветное стекло УФ-диапазона, являющееся монохроматическим фильтром. Относительная простота варианта рис. 1, б диктует необходимость выбора именно этой схемы. Но поскольку в этом случае отсутствует светофильтр, отсекающий ненужную часть спектра, то эти функции должен выполнять сам фотоприемник, который в связи с этим должен обладать высокой избирательностью.

Нами исследовались мелкозернистые пленки поликристаллического кремния (ППК), обладающие, как было показано в [3], высокой чувствительностью в коротковолновой области спектра ( $\lambda \approx 0,5$  мкм), пригодные для применения в озонометрических приборах.

Известно, что чувствительность в этой области спектра достигается за счет использования мелких  $p-n$ -переходов. Изготовление последних представляет на сегодня технологические трудности. В этой связи применялись слаболегированные ППК, на границах зерен которых имеются глубокие ловушки, обуславливающие формирование областей пространственного заряда (ОПЗ). Слаболегированные ОПЗ у поверхности пленки могут выступать в роли неглубоких  $p-n$ -переходов, что позволяет использовать их в качестве фотодетекторов, исключая при этом из технологического процесса изготовления этапы диффузии или ионного легирования.

ППК толщиной 6 мкм со средним размером зерна 0,3, 1 и 5 мкм формировались в процессе эпитаксиального наращивания пленок монокристаллического кремния  $n$ -типа проводимости с концентрацией легирующей примеси (фосфор)  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  на локально маскированные кремниевые подложки по технологии, описанной в [4]. Размер зерен ППК контролировался с помощью растрового электронного микроскопа МРЭМ. Омические контакты к ППК получали в процессе вакуумного напыления Al на предварительно сформированные  $n^+$ -области.

Для того чтобы проверить зависимость вентиляльной фото-э.д.с.  $U_{\phi}$  и тока короткого замыкания  $I_{\text{кз}}$  от длины и ширины элементов были изготовлены две группы образцов. В одной из них с увеличением длины элемента также увеличивалась и ширина:  $200 \times 20, 400 \times 40, 600 \times 60, 800 \times 80$  мкм. В другой группе образцов ширина всех элементов оставалась фиксированной —  $400 \times 40, 800 \times 40, 1200 \times 40$  мкм. Измерения  $U_{\phi}$  и  $I_{\text{кз}}$  проводились в стационарном режиме и при различной освещенности в диапазоне  $2 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^4$  лк. Освещенность измерялась с помощью люксметра Ю-116.

Измерения показали, что в ППК вентиляльная фото-э.д.с. возрастает с увеличением как длины пленки  $l$ , так и размера зерна в ней (рис. 2 и 3). Причем при

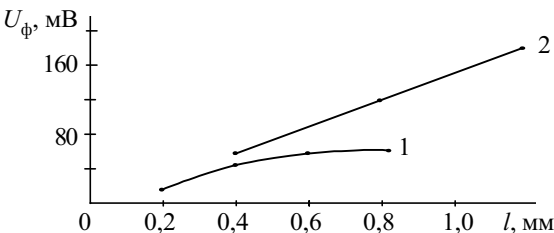


Рис. 2. Зависимости фото-э.д.с. от конструктивных параметров ППК:  
1 — ширина пленки меняется от 20 до 80 мкм; 2 — ширина пленки постоянная, 40 мкм

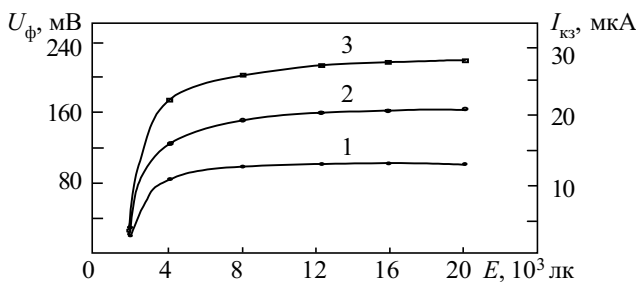


Рис. 3. Фотовольтаические  $U_{\phi}(E)$  и люкс-амперные  $I_{\text{кз}}(E)$  зависимости ППК с различным размером зерна ( $l$  — 0,3 мкм; 2 — 1 мкм; 3 — 5 мкм)

одинаковой ширине пленок  $U_{\phi}$  растет прямо пропорционально ее длине, а в образцах с разной шириной пленки наблюдалась тенденция к насыщению  $U_{\phi}$  (рис. 2), что, по-видимому, может быть объяснено шунтирующим действием фото-э.д.с., возникающей между параллельными рядами зерен в перпендикулярном к протеканию тока направлении.

С увеличением освещенности во всех образцах  $U_{\phi}$  вначале возрастает по логарифмическому закону, а затем переходит в насыщение (рис. 3), обусловленное достижением фото-э.д.с. максимального значения, равного суммарной высоте потенциальных барьеров на границах зерен вдоль направления протекания тока. Величина тока короткого замыкания  $I_{\text{кз}}$  растет с увеличением как ширины ППК, так и ее длины (см. рис. 3), т. е. возникающий под действием света ток пропорционален площади образца.

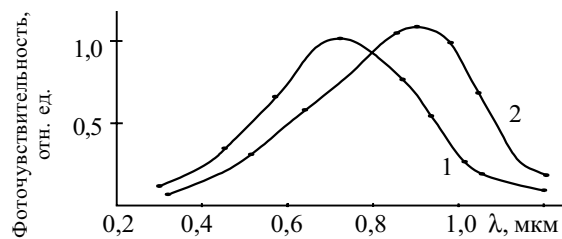


Рис. 4. Спектральные зависимости ППК:

1 — мелкозернистые (0,3 мкм); 2 — крупнозернистые (5 мкм)

Исследование спектрального распределения фоточувствительности при комнатной температуре, проведенное с помощью монохроматора УМ-2, показало, что максимальная чувствительность мелкозернистых пленок наблюдается на длине волны 0,65 мкм и составляет 1600 В/Вт (рис. 4, кривая 1). С увеличением размера зерна, благодаря большей глубине залегания ОПЗ, максимум фоточувствительности сдвигается в длинноволновую область (рис. 4, кривая 2) и растет до значения 2000 В/Вт. В коротковолновой области спектра при длине волны 0,45 мкм чувствительность мелкозернистых ППК имеет значение порядка 600 В/Вт.

\*\*\*

Проведенные исследования фотозлектрических свойств пленок поликристаллического кремния показали, что их можно использовать в качестве фоторезисторов для спектральных приборов в узком диапазоне спектра, определяемом подбором среднего размера зерен ППК, что можно регулировать технологическими методами изготовления.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шаломьянский А. М., Ромашкина К. И. Распределение и измерение общего содержания озона в различных воздушных массах // Физика атмосферы и океана.— 1980.— № 12.— С. 1258—1265.
2. Dobson G. M. The development of instruments for measuring atmospheric ozone during last fifty years // J. Phys. Sci. Instr.— 1973.— Vol. 6.— P. 938—939.
3. Джавадов Н. Г., Касимова Ф. Ф. Коротковолновые фотоприемники на основе пленок поликристаллического кремния // Физика (НАН Азербайджана).— 1998.— Т. 4, № 2.— С. 18—19.
4. Abdullayev A. G., Kasimov F. D. The simultaneous growth of mono- and polycrystalline silicon films with controlled parameters // Thin Solid Films.— 1984.— Vol. 115, N 3.— P. 237—243.

К. т. н. В. Ю. КРАВЕЦ, к. т. н. В. И. КОНЬШИН,  
Г. А. ПАРХОМЕНКО

Украина, г. Киев, НТУУ «Киевский политехнический институт»  
E-mail: kravetz\_kpi@ukr.net

Дата поступления в редакцию  
14.09 2004 г.

Оппонент д. т. н. В. Т. ДЕЙНЕГА  
(НИИ "Шторм", г. Одесса)

## СИСТЕМА ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МОЩНОГО ПРОЦЕССОРА ПЭВМ

*Исследованы теплопередающие характеристики первичных теплообменников различных конструкций и определено влияние внутреннего оребрения на температурный режим процессора.*

Повышение производительности современных персональных компьютеров и связанное с этим увеличение выделяемой мощности центральных процессоров приводит к значительным перегревам микросхем, что делает актуальной задачу поддержания их температурного уровня в заданном диапазоне. Поскольку увеличение температуры приводит к появлению ошибок в работе процессора, а также к выходу его из строя [1, с. 10], необходимость создания эффективных систем охлаждения не вызывает сомнения.

Большинство существующих систем охлаждения (СО) состоят из радиаторов с развитой поверхностью теплообмена, оснащенных мощными вентиляторами. Так, например, радиатор Zalman 6500B-CU [2] имеет площадь поверхности теплообмена  $0,34 \text{ м}^2$  (высота ребер 80 мм) при массе 898 г. Очевидно, что такой радиатор может механически повредить материнскую плату, не говоря уже о шуме, создаваемом скоростным вентилятором (скорость вращения до  $9000 \text{ мин}^{-1}$ ). При увеличении удельных тепловых нагрузок на поверхности процессора до  $200 \text{ Вт/см}^2$  такие способы охлаждения перестают быть эффективными.

Поиск путей интенсификации теплосъема от мощных процессоров привел к созданию таких СО, в которых контактирующая с процессором поверхность омывается движущимся потоком воды [3]. Это способствует значительному повышению коэффициентов теплоотдачи в месте контакта и, соответственно, снижению температуры ядра процессора. В настоящее время имеются различные конструкции систем водяного охлаждения (СВО) [4—8], однако принцип их функционирования практически одинаков. В то же время сведений о теплопередающих характеристиках таких СО недостаточно, чтобы оценить влияние различных факторов на температурный режим работы процессора.

Данная работа посвящена изучению теплопередающих характеристик СВО [9] при различных тепловых нагрузках. Исследовалось влияние конструкции внутренней поверхности первичного теплообменника (основного элемента СВО) на температурный ре-

жим работы мощного процессора персонального компьютера.

Были изготовлены теплообменники из меди марки М1 и алюминия марки Д16Т с тремя вариантами внутренней поверхности: с шипами (см. **рис. 1**), с оребрением в виде продольных каналов и гладкой.

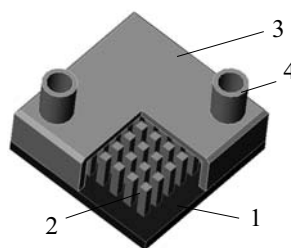


Рис. 1. Конструкция первичного теплообменника:

1 — нижняя часть теплообменника; 2 — шипы; 3 — крышка; 4 — штуцеры для подвода воды

Для проведения исследований первичный теплообменник устанавливался на имитатор мощного процессора. Имитатором процессора служил медный блок 1 (**рис. 2**), в нижней части которого размещался нихромовый нагреватель 2 мощностью до 200 Вт. В отверстия верхней части цилиндрического блока на определенном расстоянии друг от друга были установлены две хромель-алюмелевые термопары 3, по показаниям которых измерялся тепловой поток, подводимый к верхней площадке. Температура в месте контакта имитатора с теплопринимающей поверхностью первичного теплообменника определялась по показаниям верхней термопары с учетом падения температуры по высоте медного блока.

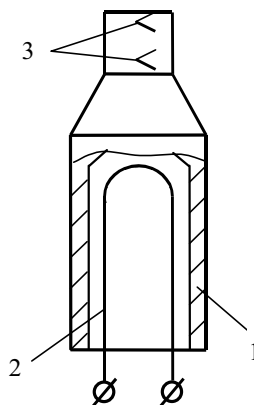


Рис. 2. Имитатор процессора:

1 — корпус; 2 — нихромовый нагреватель; 3 — термопары

Площадь контактной площадки имитатора ( $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ) соответствовала площади кристалла центрального процессора компании AMD (минимальной по сравнению с другими производителями [10, 11]).

На контактную площадку имитатора наносили тонкий слой термопасты КПТ-8 и устанавливали первичный теплообменник. Далее имитатор тщательно теплоизолировался.

На **рис. 3** представлена схема экспериментальной установки СВО. Циркуляция воды в системе обеспе-

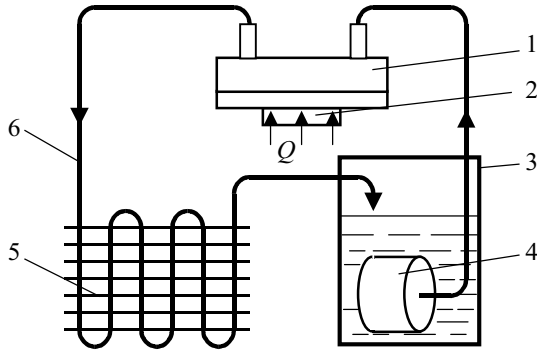


Рис. 3. Схема экспериментальной установки СВО: 1 — первичный теплообменник; 2 — имитатор процессора; 3 — емкость с водой; 4 — помпа; 5 — вторичный теплообменник (радиатор); 6 — соединительные шланги

чивалась помпой погружного типа AquaEl Pat Midi. Радиатор вторичного теплообменника позволял отводить при естественной конвекции до 2 кВт тепловой энергии. Расход воды через систему ( $G$ ) измерялся с помощью мерной емкости и поддерживался в течение эксперимента постоянным.

В результате проведенных экспериментов были получены зависимости температуры поверхности в зоне контакта имитатора процессора с первичным теплообменником ( $t_{пр}$ ) от величины отводимой мощности ( $Q$ ). На рис. 4 приведены такие зависимости для теплообменников различных конструкций, выполненных из сплава Д16Т.

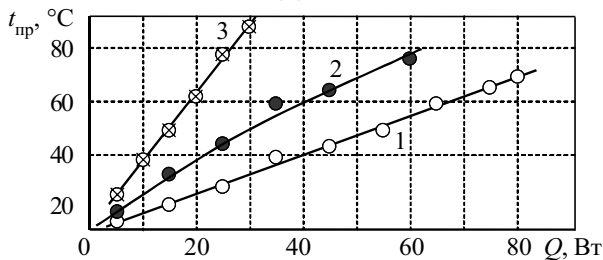


Рис. 4. Зависимость  $t_{пр}$  от  $Q$  для теплообменников различных конструкций ( $G=55$  мл/с): 1 — с шипами; 2 — с продольными каналами; 3 — гладкая поверхность

Как видно из рисунка, наилучший теплосъем обеспечивает теплообменник с внутренним оребрением в виде шипов: при температуре  $60^\circ\text{C}$ , максимально допустимой для корпуса процессора, его эффективность в 2 раза выше, чем теплообменника с каналами, и почти в 4 раза выше, чем с гладкой внутренней поверхностью.

Рассчитаем средние коэффициенты теплоотдачи внутри теплообменников, используя зависимость

$$\alpha = \frac{Q}{F_{ст}(\bar{t}_{ст} - \bar{t}_{ж})},$$

где  $Q$  — отводимый тепловой поток;  
 $F_{ст}$  — площадь внутренней поверхности теплообменника;  
 $\bar{t}_{ст}$ ,  $\bar{t}_{ж}$  — средние температуры стенки и жидкости внутри теплообменника.

Площадь внутренней поверхности теплообменника без оребрения составляет  $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ , а с каналами и с шипами примерно одинакова и равна  $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ .

Средняя температура жидкости  $\bar{t}_{ж}$  находилась по показаниям термопар на входе в теплообменник и выходе из него.

По данным термопар на наружной стенке теплообменника со стороны подвода теплоты определялась ее средняя температура  $\bar{t}_{нар}$ . Затем рассчитывалась средняя температура внутренней стенки.

Для теплообменника без оребрения

$$\bar{t}_{ст} = \bar{t}_{нар} - \frac{Q\delta}{\lambda F_{ст}},$$

где  $\delta$  — толщина стенки;  
 $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала теплообменника.

Расчеты показали, что перепад температуры по толщине стенки теплообменника из сплава Д16Т при максимальном тепловом потоке 80 Вт не превышает  $0,6^\circ\text{C}$ . Для медного теплообменника этот перепад еще меньше. Поэтому с достаточной для практики степенью точности можно для теплообменника без оребрения принимать показания термопар на внешней стороне за температуру внутренней поверхности.

Среднюю температуру стенки внутри оребренного теплообменника можно определить следующим образом.

Тепловой поток, передаваемый жидкости через шипы высотой  $l$  квадратного поперечного сечения со стороны  $b$ , можно рассчитать по формуле [12, с. 52]

$$Q_{ш} = (\bar{t}_{ст} - \bar{t}_{ж}) \lambda b \sqrt{\frac{4\alpha}{\lambda b}} \text{th} \left( l \sqrt{\frac{4\alpha}{\lambda b}} \right).$$

То же самое для ребер площадью  $F_p$ , толщиной  $b$  и высотой  $l$  определится как [12, с. 53]

$$Q_p = \alpha (\bar{t}_{ст} - \bar{t}_{ж}) F_p \frac{\text{th} \left( \frac{l}{b} \sqrt{2 \frac{\alpha b}{\lambda}} \right)}{\frac{l}{b} \sqrt{2 \frac{\alpha b}{\lambda}}}.$$

Общий тепловой поток  $Q$  включает в себя также поток через межреберное пространство, который можно рассчитать, решая сопряженную задачу с учетом теплообмена на ребрах или шипах. Поскольку коэффициенты теплоотдачи на разных участках поверхности (шипы, ребра, межреберное пространство) имеют разные значения, то в нашем случае при известной величине  $Q$  можно путем последовательных приближений, задавая значения коэффициентов теплоотдачи, найти  $\bar{t}_{ст}$  и затем рассчитать средний коэффициент теплоотдачи.

Расчеты показали, что наибольшая интенсивность теплообмена наблюдается у поверхности с шипами (рис. 5). У поверхности с продольными каналами коэффициенты теплоотдачи примерно в два раза ниже. Это можно объяснить тем, что в теплообменнике с шипами жидкость подвергается большей турбулизации, нежели при течении ее в продольных каналах.

На рис. 6, а показано изменение скорости потока ( $W$ ) по всей длине теплообменника — от входного патрубка до выходного (рис. 6, б). Внутри теплообменников с гладкой поверхностью и с шипами скорость потока меняется по одному и тому же закону.

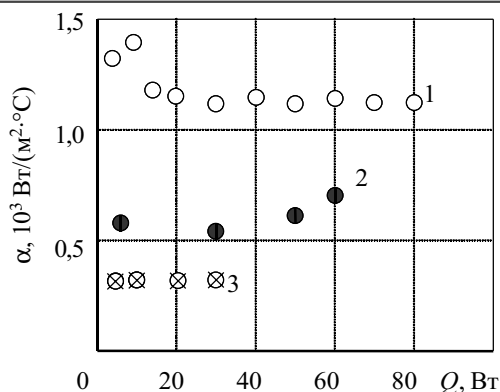


Рис. 5. Зависимость  $\alpha$  от  $Q$  внутри теплообменников различных конструкций ( $G = 55$  мл/с): 1 — с шипами; 2 — с продольными каналами; 3 — гладкая поверхность

Однако в теплообменнике с шипами скорость в центральной его части (т. е. там, где необходима наибольшая интенсивность теплосъема) значительно выше, чем у гладкого, т. к. из-за шипов сужается поперечное сечение. У теплообменника с каналами наблюдается другая картина изменения скорости, т. к. каналы выполнены расширяющимися от входа к выходу. Средняя скорость потока здесь несколько выше, чем в двух других конструкциях. Однако, как было показано ранее, более эффективной является все же поверхность с шипами. Видимо, в процессе отвода тепла более весомым фактором является не скорость, а турбулизация потока, которая значительно интенсифицирует процесс теплообмена.

Проанализируем, как влияет на теплообмен материал, из которого изготовлен теплообменник.

Тепловой поток от процессора передается через стенку первичного теплообменника к движущейся жидкости. Термическое сопротивление стенки рассчитывается по формуле

$$R_{ct} = \delta / (\lambda F),$$

где  $F$  — площадь теплоотвода.

При одинаковых геометрических размерах значение  $R_{ct}$  медного теплообменника примерно в два раза ниже, чем теплообменника из сплава Д16Т.

С другой стороны, термическое сопротивление между стенкой и потоком жидкости

$$R_{\alpha} = 1 / (\alpha F).$$

Для рассмотренных конструкций теплообменников получено: для поверхности с шипами  $R_{\alpha} = 0,64^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ; с каналами —  $R_{\alpha} = 1,28^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ; с гладкой поверхностью —  $R_{\alpha} = 2,56^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ; для медной поверхности  $R_{ct} = 0,004^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ; для сплава Д16Т —  $R_{ct} = 0,009^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ . Очевидно, что вклад  $R_{ct}$  в общее термическое сопротивление очень мал, а следовательно, и несущественно влияние материала стенки на теплопередающие ха-

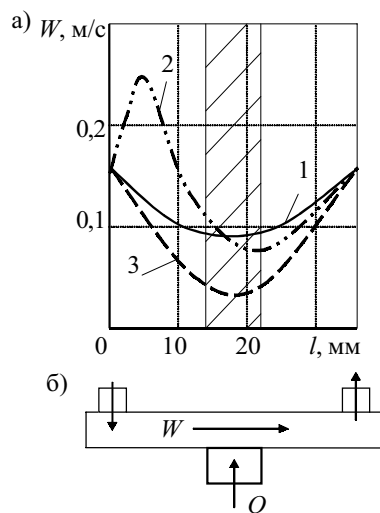


Рис. 6. Изменение скорости движения воды (а) внутри теплообменников (б) различных конструкций ( $G = 20$  мл/с): 1 — с шипами; 2 — с продольными каналами; 3 — гладкая поверхность

рактеристики. Этот вывод подтвердился и в экспериментах: теплопередающие характеристики теплообменников одинаковой конструкции из сплава Д16Т и меди практически не отличались друг от друга.

\*\*\*

Таким образом, проведенное исследование показало, что системы водяного охлаждения способны отводить значительные тепловые нагрузки и обеспечивать необходимый температурный режим работы мощного процессора. Одним из эффективных конструктивных решений первичного теплообменника является внутреннее оребрение в виде шипов. Дальнейшие работы по оптимизации ребристой поверхности позволят значительно снизить температурный режим процессора при увеличении выделяемой мощности.

Исследованная система водяного охлаждения успешно прошла апробирование на реальных персональных компьютерах с процессорами мощностью до 60 Вт.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Федасюк Д. В. Методи та засоби теплового проектування мікроелектронних пристроїв.— Львів: Вид-во ДУ “Львівська політехніка”, 1999.
2. [www.3dnews.ru/cooling/zalman-6500B-CU/](http://www.3dnews.ru/cooling/zalman-6500B-CU/)
3. Асмаков С. Системы охлаждения: переходим к водным процедурам // Компьютер пресс.— 2002.— № 1.— С. 123—125.
4. [www.thermaltake.com/products/AquariusII/aquariusII.htm](http://www.thermaltake.com/products/AquariusII/aquariusII.htm)
5. [www.ixbt.com/cpu/3rsystem-poseidon-nov2k2.shtml](http://www.ixbt.com/cpu/3rsystem-poseidon-nov2k2.shtml)
6. [www.ixbt.com/cpu/infinipro-aquacool.shtml](http://www.ixbt.com/cpu/infinipro-aquacool.shtml)
7. [www.3dnews.ru/reviews/mainsystem/watercool/](http://www.3dnews.ru/reviews/mainsystem/watercool/)
8. [www6.tomshardware.com/cpu/02q1/020102/watercooling-05.html](http://www6.tomshardware.com/cpu/02q1/020102/watercooling-05.html)
9. Пат. 59101 А України. Охолоджувач процесорів електронних пристроїв / Тютюнник Д. М., Пархоменко Г. О.— 2003.— Бюл. № 8.
10. [www.amd.com/us-en/assets/content\\_type/white\\_papers\\_and\\_tech\\_docs/24310.pdf](http://www.amd.com/us-en/assets/content_type/white_papers_and_tech_docs/24310.pdf)
11. [ftp://download.intel.com/design/Pentium4/datashts/29864310.pdf](http://download.intel.com/design/Pentium4/datashts/29864310.pdf)
12. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача.— М.: Энергия, 1975.

Д. т. н. Г. К. ЛАВРЕНЧЕНКО, д. т. н. М. Г. ХМЕЛЬНИК,  
к. т. н. В. П. САВИЧЕВ

Украина, Одесская государственная академия холода  
E-mail: hmel\_m@ukr.net

Дата поступления в редакцию  
04.11 2004 г.

Оппонент к. т. н. Н. Н. СУРЬЯНИНОВА  
(ООО "Айсблик", г. Одесса)

## ЭФФЕКТИВНАЯ СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ КВАНТОСКОПОВ

*Разработана каскадная компрессорная система охлаждения, реализующая цикл Линде с многокомпонентными рабочими телами, ресурс работы которой составляет 30 тыс. часов.*

Отображение в реальном масштабе времени знаковой и графической информации, выводимой из ЭВМ, на экранах коллективного пользования в нескольких цветах с высокой разрешающей способностью является сложной научно-технической задачей.

Проблему создания большого телевизионного экрана высокой четкости позволяет решить применение квантоскопов — электронно-лучевых приборов на основе сканирующих полупроводниковых лазеров с накачкой электронным пучком [1—3]. Благодаря высокой эффективности преобразования энергии электронного пучка в излучение, небольшим размерам активных элементов, монохроматичности и направленности излучения таких лазеров общий КПД телепроекторов на основе квантоскопов превышает КПД других проекционных устройств. Они обладают относительно небольшой потребляемой мощностью — 1...1,5 Вт/лм с учетом энергопотребления на охлаждение активных элементов.

В качестве лазерных материалов для активных элементов квантоскопов используются полупроводниковые монокристаллы  $\text{CdS}$  и  $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$ , а также эпитаксиальные пленки  $\text{GaP}$ ,  $\text{As}_{1-x}\text{Sb}_x$ , легированные  $\text{Te}$ . Это позволяет создавать активные элементы (АЭ), генерирующие излучение практически во всех участках видимого диапазона.

Температурный режим АЭ полупроводниковых лазеров с электронным возбуждением оказывает большое влияние на эффективность и долговечность работы приборов. Система охлаждения должна обеспечивать поддержание заданной температуры криостатирования  $T_x = 130...150$  К и возможность ее регулирования. Также должен соблюдаться определенный темп охлаждения для предотвращения температурных деформаций для предотвращения температурных деформаций активного элемента квантоскопа, наклеенного на сапфировый хладопровод.

Существуют различные методы и устройства охлаждения АЭ квантоскопов. Одним из наиболее распространенных является охлаждение свободно кипящим жидким азотом. Основной недостаток этого метода — необходимость постоянного пополнения запасов жидкого азота [3].

Известны устройства охлаждения потоком хладагента R30, пропускаемого через капиллярный зазор между хладопроводом и прозрачным входным окном криостата. Главная проблема при этом заключается в том, что необходимо обеспечить в зазоре прозрачную пленку, т. е. полностью исключить пузырьковое кипение, мешающее выводу излучения [3].

Для охлаждения квантоскопов можно использовать газовые криогенные машины (ГКМ) и компрессионные системы охлаждения (КСО). Недостаток ГКМ, реализующих различные термодинамические циклы, это сложность стыковки с квантоскопом и необходимость проведения профилактических работ через каждые 300—500 ч [4].

КСО на базе экспериментальных двухступенчатых герметичных компрессоров имеют недостаточный ресурс работы и трудоемки в изготовлении [3].

Анализ существующих КСО для диапазона температур криостатирования  $T_x = 120...150$  К показал, что каскадная компрессионная система охлаждения (ККСО) на многокомпонентных рабочих телах (МРТ) является наиболее эффективной.

На рис. 1 представлена схема охлаждения квантоскопа при помощи ККСО (рис. 2).

Каскадная система охлаждения действует следующим образом. Рабочее тело верхнего каскада (МРТ-1) после сжатия в компрессоре 1 охлаждается в концевом холодильнике 11 до температуры окружающей среды, поступает в теплообменник 10, дросселируется и охлаждает в охладителе-испарителе 5 прямой поток нижнего каскада (МРТ-2), после чего подается на всасывание в компрессор.

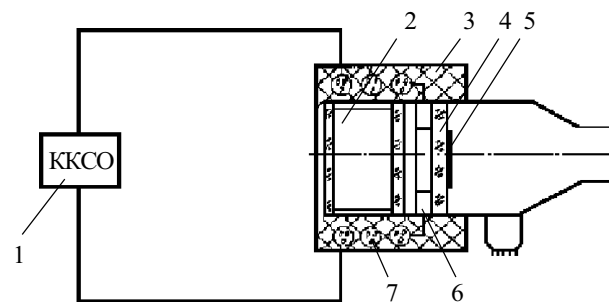


Рис. 1. Схема охлаждения квантоскопа с помощью ККСО: 1 — каскадная система охлаждения; 2 — вакуумный стакан; 3 — теплоизоляция; 4 — сапфировое окно; 5 — активный элемент; 6 — испаритель; 7 — рекуперативный теплообменник

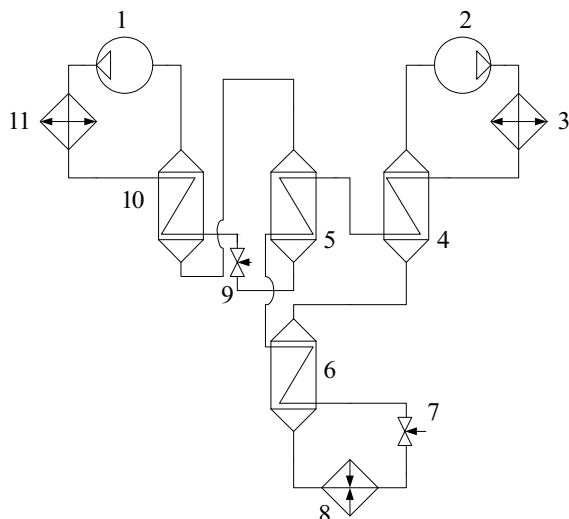


Рис. 2. Схема ККСО:

1, 2 — компрессоры верхнего и нижнего каскадов; 3, 11 — конечные холодильники; 4, 6, 10 — рекуперативные теплообменники; 5 — охладитель-испаритель; 7, 9 — дроссельные вентили; 8 — испаритель

В нижнем каскаде МРТ-2 после сжатия в компрессоре 2, охлаждения в конечном холодильнике 3 и теплообменнике 4 подводится в охладитель-испаритель 5. Затем охлажденный поток поступает в теплообменник 6, дросселируется на выходе из него и направляется в испаритель 7. После этого МРТ-2 проходит последовательно все теплообменники и поступает на всасывание в компрессор 2.

Для повышения ресурса работы системы охлаждения выбирались компрессора из серии герметичных смазываемых компрессоров ХКВ. Необходимая холодопроизводительность  $Q_x=30$  Вт при  $T_x=140$  К может быть обеспечена при использовании ХКВ-6, -8, -10.

Чтобы система охлаждения была эффективной, необходимо решить задачу рационального подбора компрессоров для верхнего и нижнего каскадов. При этом нужно учитывать, что холодопроизводительность верхнего каскада  $Q_{x1}$  должна быть достаточной для отвода от прямого потока нижнего каскада необходимого количества тепла  $\Delta Q_{max}$  в охладителе-испарителе 5 при оптимальной температуре  $T_{пр}$ .

В таблице представлены результаты расчета холодопроизводительности ККСО при различных комбинациях компрессоров в каскадах системы.

Компрессор		$Q_{x1}$ , Вт	$\Delta Q_{max}$ , Вт
Верхний каскад	Нижний каскад		
ХКВ-8	ХКВ-8	34	34
ХКВ-10	ХКВ-6	48	29
ХКВ-6	ХКВ-10	30	48

Очевидно, что оптимальным является вариант с использованием в двух каскадах компрессоров ХКВ-8. В этом случае обеспечивается с небольшим запасом заданная холодопроизводительность и соблюдаются условия энергобаланса теплообменника 5.

Применение одинаковых компрессоров ХКВ-6 или ХКВ-10 неприемлемо: в первом случае ККСО не обеспечивает заданную холодопроизводительность, во втором — значительно ее превышает, что нецелесообразно.

Для повышения энергетической эффективности ККСО необходимо оптимально сформировать рабочее тело для двух каскадов. При этом предпочтение следует отдавать расслаивающимся смесям, т. к. они позволяют в пределах зоны расслоения жидких фаз значительно увеличить концентрацию высококипящих компонентов при неизменной температуре начала кипения [5, 6]. Это приводит не только к существенному увеличению изотермического дроссель-эффекта, но и к снижению оптимального давления нагнетания, что позволяет использовать компрессоры с меньшими габаритами и массой.

При выборе высококипящих компонентов следует учитывать их растворимость с маслами, применяемыми для смазки шатунно-поршневой группы компрессоров. Правильный выбор позволит обеспечить нормальную циркуляцию масла в системе без забивки ее магистралей в низкотемпературной зоне.

Исследования показали, что используемое в герметичных компрессорах масло (ХФ12-16 или ХФ22с-16) растворяется в R50 и в R600, благодаря чему оно не кристаллизуется во всем диапазоне рабочих температур цикла.

Проведенный авторами анализ показал высокую эффективность ККСО при использовании смеси R14—R23—R600 в верхнем каскаде и R170—R50 в нижнем.

Предлагаемая схема ККСО предусматривает возможность одновременного или раздельного включения каскадов. Исследования этих режимов показали, что температура криостатирования в обоих случаях достигала 150 К приблизительно через 30 мин после включения.

Также исследовалась работа ККСО при постоянно работающем верхнем каскаде. В этом случае температура промежуточного охлаждения стабилизируется на уровне 195 К. После пуска нижнего каскада температура на испарителе снижается до 140 К через 15 мин. Это дает возможность рассматривать вариант работы верхнего каскада в «дежурном» режиме без отключения с форсированным запуском нижнего каскада при возникающей необходимости использования квантоскопа.

В качестве дроссельных устройств применялись сильфонные регуляторы давления, позволяющие поддерживать необходимые параметры цикла. В процессе эксплуатации ККСО было установлено, что в рабочем режиме отклонение температуры криостатирования  $T_x$  составляет  $\pm 0,5$  К. Это позволяет использовать систему охлаждения без блока автоматического поддержания температуры.

Полученные результаты позволили спроектировать и изготовить холодную часть ККСО из теплообменников типа Линде, что значительно упростило конструкцию, уменьшило габариты и повысило эксплуатационные качества всей системы. Для уменьшения вибраций и электромагнитных полей в зоне охлажде-

ния компрессорно-конденсаторный агрегат соединен с холодной частью сильфонным шлангом. Это также позволяет изменять ориентацию объекта охлаждения при эксплуатации установки.

Исследование ККСО в составе проекционной установки показало, что при холодопроизводительности  $Q_x = 30$  Вт температура активного элемента квантоскопа достигает 140 К через 70 мин, при этом эксергетический КПД системы охлаждения составляет 14,6%. Такие показатели вполне удовлетворили разработчиков проектных комплексов с квантоскопами.

Сравнительный анализ показывает, что каскадная система энергетически более эффективна, чем двухступенчатая, и позволяет при  $T_x = 130$  К увеличить эксергетический КПД в 3,8, а при  $T_x = 150$  К — в 1,15 раз.

Переход к каскадной системе охлаждения несколько усложняет схему установки, но реализация цикла на базе смазываемых герметичных компрессоров одноступенчатого сжатия ХКВ-8 с применением эффек-

тивных многокомпонентных рабочих тел позволяет уменьшить массу со 100 до 30 кг, а габариты блока охлаждения с  $700 \times 700 \times 420$  до  $430 \times 430 \times 240$  мм.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ильяшенко Г. А., Кацап В. И., Корницкий Е. У. и др. Квантоскоп — лазерный ЭЛП для проекции на большой экран // Электронная промышленность.— 1977.— Вып. 1.— С. 44—45.
2. Насибов А. С., Шемчук Е. С. Применение лазерных электронно-лучевых трубок в проекционном телевидении // Квантовая электроника.— 1978.— Т. 5, № 9.— С. 1911—1917.
3. Уласюк В. Н. Квантоскопы.— М.: Радио и связь, 1988.
4. Суслов А. Д. Криогенные газовые холодильные машины.— М.: Машиностроение, 1982.
5. Архаров А. М., Марфенина И. В., Микулин Е. И. Криогенные системы: основы теории и расчета.— М.: Машиностроение, 1988.
6. Лавренченко Г. К. О формировании оптимальных многокомпонентных рабочих тел для дроссельных рефрижераторов // Холодильн. техника и технология: Респ. межвед. науч.-техн. сб.— 1982.— Вып. 37.— С. 44—47.

# ПРОБЛЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИИ

(ENGINEERING & AUTOMATION PROBLEMS)

ISSN 0234-620

Международный научно-технический журнал.

Периодичность 4 номера в год. Начало издания — 1982 г.

Журнал включен в перечень изданий, публикации в которых

рекомендуется ВАК РФ. Главный редактор академик РАН К. В. Фролов

*Журнал публикует результаты научных исследований и практических разработок в России и за рубежом по актуальным проблемам машиностроения, а также материалы (обзоры, статьи, сообщения) о передовом опыте, новых материалах и прогрессивных технологиях, включая проблемы управления и автоматизации.*

*Язык публикаций русский или английский.*

*Для научных, инженерно-технических работников, аспирантов и студентов.*

**Заказы на журнал принимают:**

**ЗАО "МК-ПЕРИОДИКА"**

Россия, 129110, Москва,  
ул. Гиляровского, 39  
Тел.: (095) 284 50 08  
Факс: (095) 281 37 98  
E-mail: info@periodicals.ru

**НПО "ИНФОРМ-СИСТЕМА"**

117447, Россия, Москва,  
Севастопольский пр-т, 11а  
Тел.: (095) 127 91 47, 129 78 22  
Факс: (095) 124 99 38  
E-mail: info@informsystema.ru,  
dov@informsystema.ru

**Адрес редакции журнала:**

Россия, 101990, Москва,  
Лубянский проезд, 5, стр. 1, к. 502,  
Московский городской центр  
научно-технической информации

**Тел.:** (095) 921 24 40, 928 66 05

**Факс:** (095) 928 60 39

**E-mail:** moscenti@rosinf.ru

**Http:** //www.rosinf.ru/editions/pmea/issues/

К. т. н. В. Г. СПИРИН

Россия, г. Арзамас, НПП "Темп-Авиа"  
E-mail: temp@arzamas.nnov.ru

Дата поступления в редакцию  
16.06 2004 г.

Оппонент С. Н. БАТИЩЕВ  
("Оризон-Навигация", г. Смела)

## КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВАРИАНТЫ КОММУТАЦИОННЫХ ПЛАТ С ПОДЛОЖКОЙ ИЗ КРЕМНИЯ

*Рассматриваются три конструктивно-технологических варианта коммутационных плат с подложкой из кремния. Излагается краткая технология изготовления платы с переходными отверстиями.*

Постоянно возрастающие требования по быстродействию и плотности упаковки заставляют разработчиков микроэлектронной аппаратуры искать новые конструктивно-технологические решения проектирования и изготовления коммутационных плат. Максимальная плотность упаковки может быть достигнута только в случае применения тонкопленочной технологии [1, 2].

В качестве материалов подложки наиболее часто используют такие керамические материалы как окись алюминия, нитрид алюминия или кремний. При изготовлении многоуровневых коммутационных плат на кремнии обычно используются технологии интегральных схем. Например, кремниевые платы размерами 25×25 мм фирмы Mosaic представляют собой «море контактных площадок» из алюминия [2]. В качестве диэлектрика, разделяющего сигнальные проводники X и Y, используется двуокись кремния. В структуру платы входят также алюминиевые шины питания и "земли". В каждой точке пересечения сигнальных линий выполняется замыкаемая переключательная из аморфного кремния. Такую переключательную можно перевести в постоянно проводящее состояние, подав на нее напряжение программирования. В результате в данной точке пересечения образуется электрическое соединение. Фирма Advanced Packaging System предоставляет блоки с тонкопленочными межсоединениями на керамических или кремниевых подложках с применением изолирующих слоев из полимерных и других органических материалов [2].

Рассмотренные конструктивно-технологические варианты коммутационных плат на кремнии характеризуются высокой себестоимостью изготовления, требуют применения дорогостоящего специального технологического оборудования и отличаются низкой надежностью межуровневых соединений. Кроме того, применение алюминиевых контактных площадок делает невозможным пайку выводов компонентов.

Вместе с тем кремний представляет собой материал с превосходными конструктивными свойствами.

Он имеет высокую усталостную прочность, широкий диапазон рабочих температур, высокую коррозионную стойкость, предел упругости больший, чем у нержавеющей стали, низкий температурный коэффициент линейного расширения. К тому же это очень легкий материал, плотность кремния (2,3 г/см<sup>3</sup>) несколько меньше плотности алюминия (2,7 г/см<sup>3</sup>). Кремний является монокристаллом с кубической кристаллической решеткой и, как и любой кристалл, является анизотропным материалом.

Успехи, достигнутые в микромеханике, например при производстве интегральных датчиков [3, 4], позволяют методом глубокого анизотропного травления (ГАТ) формировать в пластине кремния практически идеальные отверстия. ГАТ обеспечивает возможность получения точного заданного макро- и микрорельефа, а в некоторых случаях и заданной глубины травления. В качестве защитной маски при травлении кремния используют двуокись кремния, а в качестве травителя — 33—35%-ный водный раствор КОН, который позволяет получить поверхность с высотой микронеровностей менее 1 мкм. При данной концентрации травителя и его температуре 105—110°C скорость травления кремния в плоскости (100)  $v_{100}=3,2$  мкм/мин, а в плоскости (110)  $v_{110}=4$  мкм/мин. При этом скорость травления SiO<sub>2</sub> ( $v_0$ ) составляет всего 0,01 мкм/мин [5, с. 15]. В работе [4, с. 474] приводятся следующие данные по скоростям травления кремния в водном растворе КОН (350 г/л) при температуре 100°C:  $v_{100}=192$  мкм/ч;  $v_{111}=6,6$  мкм/ч;  $v_0=0,48$  мкм/ч.

Рассмотрение работ [3; 5, с. 13] показывает, что для получения отверстий в виде усеченной четырехугольной пирамиды наилучшим образом подходит кремний с кристаллографической плоскостью (100). При локальном ГАТ для кремния ориентации (100) боковое подтравливание под маску практически отсутствует. Плоскость (100) является единственной из главных плоскостей, в пересечении которой с плоскостями (110), (111), (100), (211) в процессе травления образуются фигуры с прямоугольной симметрией.

Главное общее правило для травления отверстий можно сформулировать следующим образом. При достаточно длительном травлении анизотропным травителем через окно произвольной формы в пластине кремния будет вытравлено пирамидальное углубление с боковыми гранями в семействе плоскостей (111), наклоненными к исходной плоскости (100) под

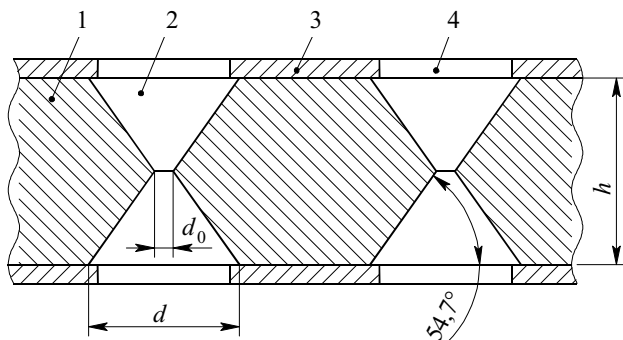


Рис. 1. Анизотропное травление отверстий в кремниевой подложке:

1 — подложка; 2 — переходное отверстие; 3 — двуокись кремния; 4 — окно в окисле

углом 54,7°. На рис. 1 показано отверстие в кремниевой подложке при двухстороннем анизотропном травлении.

Минимальный ( $d_a$ ) и максимальный ( $d$ ) размеры отверстия, полученные таким методом, рассчитываются по формулам

$$d_a = v_{111} h_{\max} / (v_{100} \sin 54,7^\circ) = 0,042 h_{\max};$$

$$d = [\text{ctg} 54,7^\circ + v_{111} / (v_{100} \sin 54,7^\circ)] h_{\max} = 0,75 h_{\max},$$

где  $h_{\max}$  — максимальная толщина кремниевой пластины.

В процессе травления удаление атомных слоев с поверхности кристалла происходит последовательно — слой за слоем. При этом на протравленной поверхности стенок отверстия образуются микроскопические ступеньки. Эти ступеньки, а также углы пересечения плоскостей (111) между собой и с плоскостями (100), могут выступать в качестве концентраторов напряжений, на которых в дальнейшем возможны проколы защитной изоляции из двуоксида кремния.

Для сглаживания углов и микронеровностей проводится изотропное дотравливание отверстий в течение 10 с. Полирующий раствор изотропного травителя состоит из смеси плавиковой, уксусной и азотной кислот, взятых в пропорции 1:1,2:6,2. Следует отметить, что травление углов в изотропном травителе происходит быстрее, чем травление ровных поверхностей (рис. 2). В результате изотропного травления минимальный размер ( $d_n$ ) отверстия увеличивается на 10—20 мкм по сравнению с размером, получен-

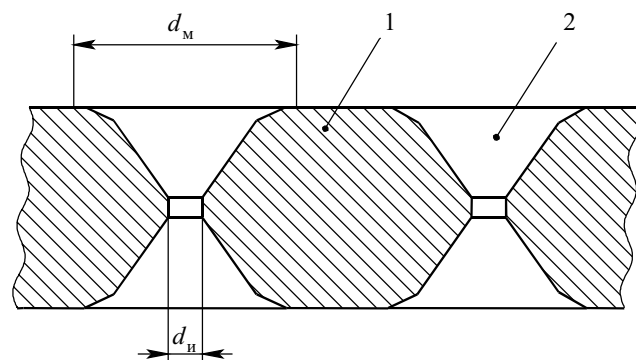


Рис. 2. Изотропное травление отверстий в кремниевой подложке:

1 — подложка; 2 — переходное отверстие

ным при анизотропном травлении. Металлизация отверстия (размер  $d_m$ ) увеличивает размер  $d$  всего на 30—50 мкм.

В кремниевых платах расстояние между переходными отверстиями, как правило, не влияет на плотность проводников, как это происходит в конструкциях печатных плат. Этот параметр определяется минимальной величиной зазора между контактными площадками. В табл. 1 приведены результаты расчета размеров отверстий для кремниевых пластин различных диаметров.

Таблица 1

Диаметр, мм	Толщина, мкм	$d_a$ , мкм	$d_n$ , мкм	$d$ , мкм	$d_m$ , мкм	Удельная цена, руб./см <sup>2</sup>
76	360—400	16,8	27—37	300	350	3,19
100	440—480	20,1	30—40	360	400	2,4
150	610—650	27,3	37—47	487,5	550	4,45

В настоящее время в РФ наилучшими технико-экономическими характеристиками обладает кремниевая пластина 100 мм. Минимальная удельная цена связана с тем, что пластины 76 мм пользуются ограниченным спросом и, вероятно, скоро будут сняты с производства, а пластины 150 мм еще недостаточно освоены в производстве и имеют высокий спрос. Плата на основе пластины 100 мм имеет несколько больший диаметр переходного отверстия, чем плата на основе пластины 76 мм, зато она обладает более высокой механической прочностью, т. к. имеет большую толщину. Краткое описание технологии изготовления кремниевых плат с двумя уровнями коммутации и переходными отверстиями приведено в табл. 2.

Изготовление кремниевых коммутационных плат основано на следующих технологических процессах:

— изготовление интегральных датчиков (технологии микромеханики) (операции 1—4);

Таблица 2

Операция	Толщина слоя, мкм
1. Первое окисление кремния.	1,3...1,7
2. Первая двухсторонняя фотолитография. Травление окисла кремния в отверстиях. Удаление фоторезиста.	
3. Формирование сквозных отверстий в пластине кремния путем анизотропного и изотропного травления кремния. Удаление окисла кремния.	
4. Второе окисление кремния.	1,3...1,7
5. Двухстороннее напыление проводящей структуры Cr—Cu—Cr.	2...3
6. Защита фоторезистом промежутков между проводниками и контактными площадками. Травление хрома.	
7. Гальваническое наращивание меди.	5...10
8. Гальваническое наращивание сплава “олово—свинец”.	2...3
9. Удаление фоторезиста и травление проводящей структуры Cr—Cu—Cr.	
10. Формирование защитной паяльной маски методом фотолитографии.	20...30
11. Разделение пластин на платы.	

— изготовление коммутационной платы на основе полиимидной пленки (операции 5—9);

— изготовление защитной паяльной маски для печатных плат (операция 10).

Технология микромеханики в части выполнения отверстий в кремниевой подложке описана выше. Следует отметить, что при выполнении операции 4 по окислению кремния толщина окисла одинакова для любого направления [6, с. 190]. Технология изготовления коммутационной платы на основе полиимидной пленки описана в [7, с. 150—180] и не требует каких-либо пояснений. Для формирования защитной паяльной маски на технологических полях подложки во время основного технологического цикла делают два сквозных отверстия, которые предназначены для фиксации подложки во время нанесения паяльной защитной маски. Разделение подложки на платы выполняют известными методами, например алмазным диском.

Технологический процесс формирования защитной маски включает в себя следующие основные операции.

1. Установка кремниевой пластины на приспособление и фиксация ее с помощью двух технологических отверстий штифтами.

2. Нанесение защитной маски, например CARAPACE EMP 110, через сетку на подложку.

3. Сушка защитной маски.

4. Повторение операций 1—3 для второй стороны подложки.

5. Одностороннее по каждой стороне подложки или двухстороннее экспонирование.

6. Проявление и дублирование защитной маски.

Учитывая высокую прочность кремния, плату на его основе можно использовать как несущую конструкцию. В этом случае на каждой стороне подложки можно сформировать хотя бы по одному уровню коммутации. Причем не всегда целесообразно формировать сквозные переходные отверстия. В данных конструкциях на разных поверхностях платы располагают функционально законченные узлы с минимальными связями между противоположными поверхностями, которые при необходимости соединяются между собой с помощью проволочных перемычек или гибких шлейфов. Если на такие платы устанавливаются компоненты, монтаж выводов которых осуществляется только сваркой, то на них, кроме проводящего слоя, можно изготавливать тонкопленочные резисторы из хрома.

В случае применения низкоомного кремния с удельным сопротивлением менее 0,01 Ом·см общую шину можно выполнить на самом кремнии, получая при этом три уровня коммутации. Для этого перед напылением проводящей структуры в двуокиси кремния вскрывают окна и, в результате, обеспечивают контакт металлизации (проводников общей шины, расположенных на двуокиси кремния) с кремнием.

При конструировании топологии платы необходимо учитывать, что между проводниками и общей ши-

ной, ввиду малой толщины двуокиси кремния, образуется значительная емкость. При толщине двуокиси кремния 1,5 мкм удельная емкость составляет 20—25 пФ/мм<sup>2</sup>. Поэтому сигнальные проводники в высокочастотных цепях, с целью уменьшения времени задержки, должны иметь минимальную площадь. Для шин питания увеличение удельной емкости, наоборот, является благоприятным фактором, и они могут быть выполнены с большой площадью.

Если на противоположных сторонах платы расположить разные функциональные узлы, причем один из них для другого является генератором помех, то общая шина на кремнии будет выполнять функцию экрана. Особенно эффективно использование таких конструкций плат в датчиках первичной информации, например акселерометрах. В современных акселерометрах конструкция электронного преобразователя представляет собой металлическую пластину, на противоположных поверхностях которой установлены ситалловые платы. Одна из плат функционально является генератором, а другая усилителем. Для того чтобы исключить воздействие помех со стороны генератора на усилитель, общие шины каждой платы соединяют с металлической пластиной проволочной перемычкой. В случае применения платы с общей шиной на кремнии конструкция электронного преобразователя уменьшается в 2—3 раза за счет исключения одной ситалловой платы и металлического основания.

### Выводы

Рассмотренные конструктивно-технологические варианты коммутационных плат с подложкой из кремния с двумя и тремя уровнями коммутации основываются на известных, хорошо освоенных в промышленности технологиях. Применение этих плат обеспечивает максимально возможную плотность упаковки микросборок при сравнительно невысокой их себестоимости.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лаймен Д. Многокристалльные модули — высокоэффективное средство сборки новых поколений СБИС // Электроника.— 1989.— № 6.— С. 10—13.
2. Уэбер С. Многокристалльные модули — перспективное направление в области СБИС // Электроника.— 1989.— № 7.— С. 63—71.
3. Вавилов В. Д., Кругликов П. Ф., Толочков Ю. А. Интегральные датчики давления. Конструкция и технология.— М.: МАИ, 2001.
4. Вавилов В. Д. Интегральные датчики.— Н.-Новгород: НГТУ, 2003.
5. Бачурин В. В., Полехов В. В., Пыхтунова А. И. Применение анизотропного травления кремния в технологии изготовления полупроводниковых приборов // Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы.— 1982.— Вып. 3(859).— М.: ЦНИИ «Электроника».
6. Пирс К., Адамс А., Кац Л. и др. Технология СБИС. Кн. 1.— М.: Мир, 1986.
7. Микроэлектронная аппаратура на бескорпусных интегральных микросхемах / И. Н. Воженин, Г. А. Блинов, Л. А. Коледов и др.— М.: Радио и связь, 1985.

Е. М. КУДРЯВЦЕВ

Россия, г. Смоленск, СКБ ВНИИОФИ

Дата поступления в редакцию  
02.11 2004 г.

## ФРЕЗЕРОВАЛЬНО-ГРАВИРОВАЛЬНЫЕ ПЛОТТЕРЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

В современном производстве печатные платы традиционно изготавливаются методом травления, который со временем отойдет в прошлое, уступив место новым методам с использованием лазеров и плазмы. Наряду с этим в практике уже давно используются настольные фрезерные станки с ЧПУ, предназначенные для изготовления печатных плат методом фрезерования и гравирования. В последние годы появились новые импортные и отечественные образцы.

Прогресс в технологии фрезерной обработки, рост производительности персональных компьютеров и мощности технологического программного обеспечения привели к появлению нового вида станков с ЧПУ — гравировальных плоттеров, наиболее доступные модели которых легко размещаются на столе.

Гравировальные плоттеры для изготовления печатных плат — это специализированные периферийные устройства для ПК, но более сложные, чем графопроекторы или принтеры.

Обращает на себя внимание целый ряд особенностей фрезеровально-гравировального метода производства печатных плат.

Плоттеры дают возможность изготавливать двухсторонние печатные платы (ПП) по схеме, мало чем отличающейся от базового позитивного способа производства, но из технологического процесса полностью исключены фоторезисты, фотошаблоны и, следовательно, оборудование.

Плоттеры позволяют выполнять:

- сверление отверстий по программе, зачистку заусенцев;

- фрезерование рисунка ПП. Здесь нужно отметить, что проводники не подтравливаются и управляющий компьютер точно выдерживает соотношение зазор/проводник.

Переходные отверстия металлизуются с использованием обычных гальванических методов (при партиях 1—100 штук можно использовать лабораторные методы). Лужение всего полотна ПП и переходных отверстий производится перед фрезерованием.

Метод гарантирует одну из важнейших характеристик ПП — высокое сопротивление изоляции, т. к. травление исключено из технологического процесса, а переходные отверстия металлизуются и лудятся, когда стеклотекстолит закрыт с двух сторон фольгой.

Потребляемая мощность плоттеров не более 100 Вт при разгоне двигателя и 90 Вт в рабочем режиме,

управляющего компьютера — 100 Вт. Такие характеристики ставят плоттер вне конкуренции с другими видами техники для производства печатных плат. При обычном изготовлении двухсторонней ПП используются 32 операции с применением тепла (электроэнергии), а также мощной вентиляции. В случае плоттера достаточно обычной бытовой вентиляции. Значительно упрощается обеспечение производства ПП материалами и инструментом. Обычно нанесение фоторезистов, травление и эксплуатация связанных с ними установок составляет 50% стоимости ПП, и к этому нужно добавить работу очистных сооружений и значительные производственные площади. В то же время рабочая зона одного плоттера 2 м<sup>2</sup>, и при использовании двух и более плоттеров достаточно помещения в 20 м<sup>2</sup>, а это под силу и малому предприятию, и НИИ, и частному предпринимателю. Методом гравирования можно изготавливать полосковые платы.

Таковы возможности настольных плоттеров, которые должны привлечь особое внимание изготовителей печатных плат.

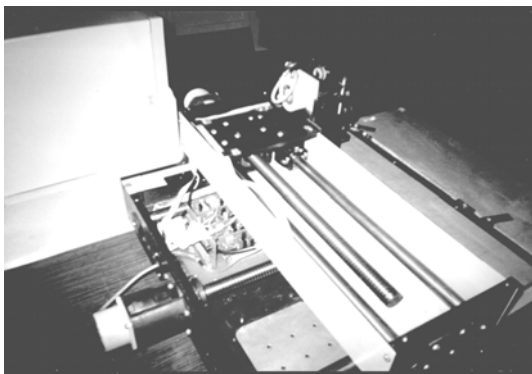
Оперативное изготовление мелких партий печатных плат (1—100 шт.) — вопрос достаточно сложный. Потребность в мелкой партии возникает при разработке новых изделий на проектных стадиях и стадиях разработки рабочей документации опытного образца, причем в этом случае часто необходимо вносить изменения в конструкцию печатной платы — например, в силу выявленных недоработок либо из-за изменения части элементной базы. Наилучшим решением здесь, несомненно, станет фрезеровально-гравировальный метод.

Плоттер изготавливается в виде настольного блока габаритами 749×680×340 мм и массой 60 кг. Гравировка «рисунка» платы и сверление производятся на фольгированном стеклотекстолите толщиной 0,5—3,0 мм. При толщине фольги до 55 мкм минимальное соотношение ширины зазор/проводник равно 0,25 мм, диаметры отверстий — 0,5—1,8 мм. Максимальная скорость головки 2,5 см/с, типовой размер рабочего поля 250×350 мм. Такие характеристики достаточноны для большинства разрабатываемых ПП. Настольные станки этого типа работают в России и на Украине.

Плоттер окупается в течение шести—двенадцати месяцев в зависимости от сложности плат и его загрузки, которая может быть круглосуточной. На предприятиях неэлектронного направления плоттеры могут быть использованы для ремонта станков с ЧПУ и роботов, средств механизации и автоматизации. Такой

участок изготовления плат есть на Смоленском автоагрегатном заводе и Брянском машиностроительном.

Используемый для привода шпинделя асинхронный двигатель — бесколлекторный, что намного увеличивает его ресурс. Скорость вращения шпинделя до 20 тыс. мин<sup>-1</sup>. В комплект поставки входит программное обеспечение и интерфейсный блок сопряжения с компьютером. Программное обеспечение позволяет подготавливать данные для фрезерования и гравирования из таких распространенных систем проектирования как PCAD, OrCAD, SmarWoRK, AutoCAD. Управление плоттером осуществляется от ПЭВМ типа IBM PC/AT. Типовая отечественная элементная база и стандартные конструктивные элементы (например, шарико-винтовые пары) обеспечивают высокую ремонтпригодность. Не критичен отечественный плоттер к применяемым материалам и инструменту. Существенно также, что электроника привода предельно упрощена за счет использования ресурса вычислительной мощности управляющего компьютера.



Смоленское ТОО «Анико» производит фрезероальные плоттеры, цена которых не превышает 6 тыс. дол. США. (Ближайшие функциональные аналоги данного плоттера — изделия германской фирмы LPKF, их стоимость — 20—26 тыс. немецких марок.) В настоящий момент ведется проработка моделей плоттеров следующего поколения с предельной ценой 3 тыс. дол. США (в зависимости от исполнения) с такими примерными характеристиками:

1. Рабочее поле — 600×500 мм.
  2. Скорость вращения шпинделя 20—60—110 тыс. мин<sup>-1</sup>.
  3. Вертикальное расположение печатной платы при всех видах обработки. Это облегчает удаление стружки и пыли, а также снижает на 30% массогабаритные характеристики станка.
  4. Мощность шпинделя 100—150 Вт или 200 Вт в зависимости от исполнения.
  5. Автоматическая смена инструмента.
  6. Возможная замена шарико-винтовых передач на несоосные передачи или высокоточные ленточные.
  7. Замена корпусных элементов на недорогие композитные материалы, и прежде всего, «синтегран» (полимербетон), не уступающий по своим механическим характеристикам граниту (демпфирование, гашение колебаний).
  8. Точность позиционирования от 0,02 до 0,005 мм в зависимости от исполнения.
  9. Специализированные головки, работающие в «вихревом» режиме и выполняющие полный цикл лужения платы и изготовления металлизированных сквозных отверстий с одной установки.
  10. Фрезерование изолирующей дорожки (минимальная ширина 0,15 мм) обеспечивается инструментом и настройкой его вылета, что позволит изготавливать печатные платы с минимальной шириной проводника 0,15 мм и таким же зазором между проводниками в узких местах. В широких местах зазор между проводниками может быть расширен до 3 мм за счет применения многопроходного фрезерования.
  11. Сверление отверстий диаметром 0,1—1,8 мм, автоматическая смена инструмента с помощью револьверной головки.
  12. Максимальная скорость перемещения головки плоттера 50—150 м/мин (в зависимости от мощности двигателя, исполнения и при перемещении под углом, кратным 45°).
- Такие характеристики позволяют изготавливать печатные платы в 1 дм<sup>2</sup> за 10—20 мин.

#### НОВЫЕ КНИГИ

**Пул Ч. П. мл., Оуэнс Ф. Дж. Нанотехнологии.— М.: Техносфера, 2004.— 448 с.**

Первое руководство на русском языке, описывающее структуру и свойства наноматериалов от твердотельных до биологических объектов. Исчерпывающе изложены технологии изготовления и методы исследования наноструктур, разнообразные применения — от оптоэлектроники до катализа и биотехнологий. Монография адресована широкому кругу научных работников, инженеров-электронщиков и технологов-химиков и биологов.

**Грушевский А. М. Сборка и монтаж многокристальных микромодулей.— М.: МИЭТ, 2003.— 196 с.**

Рассмотрены конструктивно-технологические решения основополагающих проблем технологии монтажа высокоинтегрированных многокристальных микромодулей, представляющих наиболее перспективное направление высокоплотного монтажа изделий микроэлектроники. Исследованы особенности технологий: сборки СБИС; сборки многоуровневых плат; автоматизированного монтажа СБИС на платы с обеспечением эффективного теплостока от кристаллов; контроля качества сборочных процессов.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям 551100 и 654300 "Проектирование и технология электронных средств", а также для слушателей курсов повышения квалификации и специалистов, занимающихся созданием высокоинтегрированных изделий современной микроэлектроники.



Л. А. СВЕТЛИЧНАЯ, Н. Н. МОСКОВЧЕНКО,  
д. ф.-м. н. П. В. СЕРБА

Россия, Таганрогский радиотехнический университет  
E-mail: firefly2@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
24.09 2004 г.

Оппонент д. ф.-м. н. Н. Е. КОРСУНСКАЯ  
(Ин-т физики полупроводников  
им. В. Е. Лашкарева, г. Киев)

## ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА ПОРИСТОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

*Рассмотрены методы получения пористого карбида кремния, а также влияние режимов травления на морфологию пористого слоя.*

Интерес к исследованию пористых наноразмерных полупроводниковых структур материалов связан с квантово-размерными эффектами в нанокристаллах, одним из проявлений которых является широкополосная фотолуминесценция. Из полупроводниковых пористых материалов наиболее хорошо изученным является кремний. Для него получены зависимости параметров пористого слоя от технологических режимов [1, 2].

Изучение пористого карбида кремния началось несколько позже [3]. По сравнению с кремнием SiC содержит гораздо больше структурных дефектов, наличие которых оказывает существенное влияние на размер пор. Так, при использовании подложек, полученных модифицированным методом Лели [4], диаметр пор составлял 20 нм, а на более дефектных подложках (при тех же режимах травления) — 110 нм [5].

Работы по исследованию пористого карбида кремния сконцентрированы в следующих направлениях: разработка методов получения пористого карбида кремния, исследование фотолуминесцентных свойств, исследование структурных свойств. Целью статьи является обзор методов получения пористого карбида кремния, исследование его морфологии и влияния легирования подложки на параметры пористого слоя.

Основным методом формирования пористой структуры в SiC является метод электрохимического анодирования [6, 7]. В работе [6] использовались части коммерческой пластины 6H-SiC ( $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , фирма CREE), разориентированной на  $3,5^\circ$  по отношению к оси  $c$ . Противоположные грани пластины имели разную степень обработки: рабочая грань (0001)Si полировалась, противоположная грань — шлифовалась. Анодирование осуществлялось в электролите  $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 1:1:2$  при освещении поверхности образца источником ультрафиолетового света при трех значениях плотности тока — 20, 60 и 100  $\text{mA}/\text{cm}^2$ . Время травления подбиралось из условия прохождения одинакового заряда через подложки и составляло 15, 5 и 3 мин, соответственно. Толщина пористого карбида кремния (ПКК) и его морфология определялись на сканирующем электронном микроскопе (SEM) по сколу подложки.

В результате исследования было установлено, что приповерхностная часть слоя ( $\approx 20 \text{ нм}$ ) имеет структуру каналов, направленных под небольшими углами к поверхности пленки. На глубине от 0 до 1  $\mu\text{м}$  поры формируют густую разориентированную сеть каналов. По мере возрастания глубины структура пор выравнивается, становится перпендикулярной к поверхности и приобретает вид «елочек» (рис. 1). При этом существует четкая граница между подложкой и пористым слоем, что позволяет довольно точно определить толщину пористого слоя.

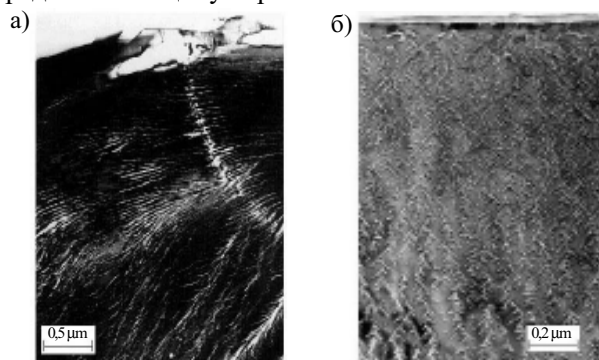


Рис. 1. Приповерхностные участки слоя пористого карбида кремния:

*a* — нестандартный вид с каналами, направленными под малыми углами к поверхности пленки; *b* — стандартное изображение слоя пористого карбида кремния

Исходные толщины ПКК при плотности тока 20, 60 и 100  $\text{mA}/\text{cm}^2$  при анодном травлении составляли 26, 18 и 16  $\mu\text{м}$ , соответственно, т. е. скорость роста слоя ПКК нелинейно увеличивалась с ростом плотности тока и составляла 1,73, 3,6 и 5,33  $\mu\text{м}/\text{мин}$ .

Травление в электролите не приводит к заметным изменениям поверхностной шероховатости. Среднеквадратическая шероховатость для исходных пластин 4H-SiC была 1,3 нм, а для проанодированной части этой же подложки составила 1,25 нм. Похожие результаты наблюдались и для 6H-SiC-подложек [8].

Нагрев пористого карбида кремния 6H-SiC в вакууме до  $2000^\circ\text{C}$  привел к изменению его структуры, особенно вблизи границ «ПКК—подложка». Поры не только укрупнились, но и изменилось их сечение. Наибольшие изменения вблизи нижней границы претерпел ПКК, приготовленный при плотности тока 100  $\text{mA}/\text{cm}^2$ . Необходимо отметить, что предложенная технология предусматривает эпитаксиальное полирующее травление по-

ристого SiC непосредственно перед ростом на нем эпитаксиального слоя. (Использование пористого SiC для выращивания эпитаксиального слоя является одним из применений пористого SiC. Его цель — уменьшение содержания дефектов в эпитаксиальном слое SiC.)

Сравнение толщин пористых слоев до и после высокотемпературного процесса роста позволяет предположить, что в течение сублимационного травления было удалено около 4 мкм пористого слоя. Следовательно, эпитаксиальный рост осуществлялся на ту часть ПКК, где поры выстроены в перпендикулярном направлении к поверхности образца. Однако исследования, проведенные авторами [8], говорят о том, что нагрев пористого SiC до температур свыше 1500°C приводит к отслаиванию эпитаксиального слоя от поверхности. Возможно, это было связано с тем, что нагрев проводился не в вакууме.

В работе [9] показано, что структура эпитаксиальных слоев карбида кремния зависит от структуры подложки. В случае несовершенной подложки SiC формирование пористого слоя не приводит к значительному улучшению структуры эпитаксиального слоя по сравнению с эпитаксиальными слоями, сформированными на непористом SiC. Однако использование пористых буферных слоев, сформированных на качественных подложках SiC, позволяет получать эпитаксиальные слои SiC со сниженной плотностью дислокаций и дефектов [10, 11].

В работе [12] изучалось влияние состава электролита, времени травления и плотности тока  $j$  на морфологию пористого слоя. Было установлено, что при увеличении времени травления с 2 до 20 мин концентрация пор увеличивается и начинается их слияние (рис. 2). Рост плотности тока при постоянном времени травления приводит к укрупнению пор, а также к увеличению их концентрации (рис. 3). Изменение состава электролита с  $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}=1:1:1$  на  $\text{HF}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}=1:1$  практически не повлияло на морфологию пористого слоя.

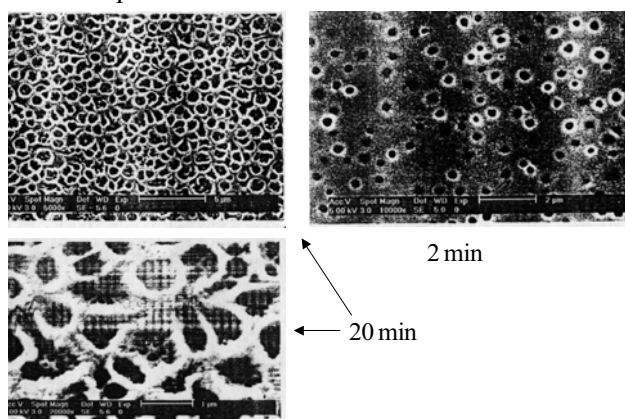


Рис. 2. SEM-изображения пористого слоя при различном времени травления (2 и 20 мин)

При получении слоя ПКК на подложке карбида кремния происходит инверсия знака изгиба подложки (исходно вогнутый образец становится выпуклым). Однако радиусы кривизны образцов с возрастанием плотности тока при анодном травлении практически не изменяются [3].

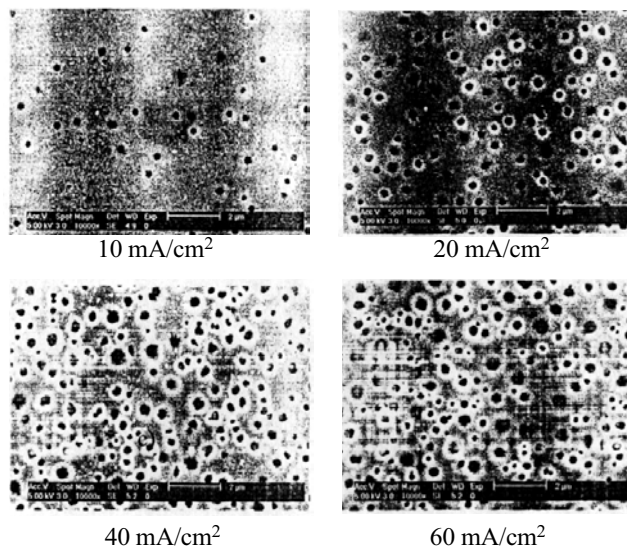


Рис. 3. SEM-изображения морфологии пористого слоя при плотностях тока 10, 20, 40 и 60 mA/cm²

Значения радиусов кривизны  $R$  и рассчитанных из них биаксиальных напряжений  $\sigma_a$ , значения макродеформаций  $\epsilon_z$  вдоль нормали к поверхности образца, а также полуширины кривых отражения, полученные на двухкристальном (ДКД) и трехкристальном дифрактометре (ТКД), представлены в табл. 1. Структурное совершенство слоев контролировалось по поведению угловой ширины дифракционной кривой на половине максимума (FWHM). При измерениях на ТКД использовались  $\theta$ - и  $(\theta - 2\theta)$ -моды сканирования. Ширина диффузионного пика  $\omega_{ds}$  дает значение эффективного диаметра пор  $d$ . Радиусы кривизны рассчитаны из экспериментально измеренных радиусов с учетом изгиба исходной подложки до процесса роста вследствие разного качества обработки рабочей кремниевой (полированной) и тыльной углеродной (шлифованной) поверхностей подложки.

Таблица 1  
Результаты рентгеновских измерений слоев пористого карбида кремния до и после высокотемпературного роста эпитаксиальных слоев

Образец	$R$ , м	$\sigma_a$ , ГПа	$\epsilon_z$ , $10^{-3}$	ДКД		ТКД	
				$\omega/\omega_s$	$\omega_0$	$\omega_{\theta-2\theta}$	$\omega_{\theta-2\theta}$
				arcsec			
Исходная подложка	-3,40	—	—	22/-	20	6,8	
Подложка+эпитаксиальный SiC	+4,07	-1,34	+2,70	22/-	18	5,5	
ПКК (20 mA/cm²)	+2,03	-0,21	+0,41	35/2144	34	7,9	
ПКК+эпитаксиальный слой SiC	+2,28	-0,20	+0,40	28/1010	25	7,6	
ПКК (60 mA/cm²)	+1,82	-0,33	+0,66	37/2059	34	7,5	
ПКК+эпитаксиальный слой SiC	+2,14	-0,30	+0,60	30/811	24	6,5	
ПКК (100 mA/cm²)	+1,90	-0,36	+0,72	38/1856	37	7,4	
ПКК+эпитаксиальный слой SiC	+2,28	-0,42	+0,84	46/683	40	5,9	

Рассчитанные по формуле Стоуни [13] биаксиальные тангенциальные напряжения в пористом карбиде кремния являются сжимающими, а рассчитанная по ним деформация вдоль нормали к поверхности образца  $\epsilon_z = \delta d/d$  имеет положительный знак.

При росте на исходной подложке эпитаксиально-го слоя SiC также изменяется знак изгиба образца, а

биаксиальные сжимающие напряжения в таком слое достигают значения  $\sigma_a = -1,34$  ГПа.

Формирование эпитаксиальных слоев SiC толщиной 0,5—3 мкм на пористом карбиде кремния не изменяет знака изгиба образца, но происходит некоторое увеличение его абсолютной величины в сравнении с пористым карбидом кремния на подложке до роста слоя. Расчет показывает некоторое снижение биаксиальных напряжений в эпитаксиальных слоях на пористом SiC в сравнении с пористым карбидом кремния на подложке для плотностей токов 20 и 60 мА/см<sup>2</sup>. В то же время для плотности тока 100 мА/см<sup>2</sup> напряжения в эпитаксиальном слое возросли в сравнении с пористым карбидом кремния.

Такое поведение макроизгиба образцов при формировании на пористом карбиде кремния тонких эпитаксиальных слоев SiC может быть связано с трансформацией структуры исходно-выращенного пористого карбида кремния. С этим, вероятно, и связано даже некоторое возрастание биаксиальных напряжений в эпитаксиальном слое, выращенном на пористом карбиде кремния (100 мА/см<sup>2</sup>) с максимальной пористостью. Как упоминалось выше, на этом образце, по данным SEM, произошли максимальные изменения структуры пористого слоя после отжига в вакууме. Необходимо также отметить и значительно меньшую толщину эпитаксиального слоя в этом случае (0,5 мкм).

В целом биаксиальные сжимающие напряжения в эпитаксиальных слоях на пористом карбиде кремния в 4,6 раза ниже, чем в слое, выращенном на исходной подложке карбида кремния.

Рентгеновские измерения дают значения пористости, близкие к значениям, полученным гравиметрическим способом, и величины эффективного диаметра пор  $d$ , полученные в тех же предположениях, что и в работе [14]: форма пор цилиндрическая, выходы пор на поверхность расположены в виде квадратичной решетки. Зная эти величины, можно определить объем и поверхность одной поры, а также количество пор  $N$ , приходящееся на 1 см<sup>2</sup> поверхности (табл. 2). При расчете было учтено, что объем удаленного SiC остается постоянным для всех исследуемых образцов, т. к. при анодном травлении заряд, проходящий через подложки, поддерживался постоянным. Это подтверждается тем фактом, что  $Ph \approx \text{const}$ . Очевидно, что  $Ph = NV$ .

Таблица 2

Характеристики слоев пористого карбида кремния до и после высокотемпературного роста эпитаксиальных слоев [4]

Параметр	$j=20$ мА/см <sup>2</sup>		$j=100$ мА/см <sup>2</sup>	
	До отжига	После отжига	До отжига	После отжига
$h$ , мкм	26	22	16	12
$P$ , %	11,3	—	20	—
$Ph$ , % · мкм	294	—	330	—
$d$ , мкм	$22 \cdot 10^{-3}$	$52 \cdot 10^{-3}$	$28 \cdot 10^{-3}$	$77 \cdot 10^{-3}$
$V$ , мкм <sup>3</sup>	$0,986 \cdot 10^{-2}$	$4,67 \cdot 10^{-2}$	$0,986 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-2}$
$N$ , см <sup>-2</sup>	$3 \cdot 10^{10}$	$0,53 \cdot 10^{10}$	$3,25 \cdot 10^{10}$	$0,43 \cdot 10^{10}$
$S$ , мкм <sup>2</sup>	1,8	3,59	1,41	2,9

$h$  — толщина пористого карбида кремния;  $P$  — гравиметрическая пористость;  $d$  — диаметр поры;  $V$  — объем поры;  $N$  — количество пор;  $S$  — поверхность поры.

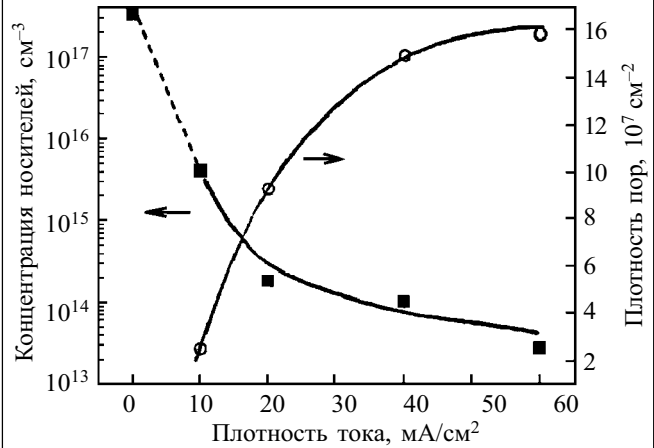


Рис. 4. Зависимость эффективной концентрации носителей и плотности пор от плотности тока травления

Из таблицы видно, что объем поры увеличивается с ростом плотности тока при анодном травлении, следовательно, и количество пор в данном диапазоне плотностей тока остается постоянным и приблизительно равным  $N \approx 3 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>. Отсюда следует, что рост пористости с ростом плотности анодного тока происходит не за счет возрастания количества пор в слое, а за счет увеличения эффективного диаметра пор. Поверхность же поры уменьшается с ростом плотности тока за счет уменьшения толщины пористого слоя с одновременным увеличением диаметра пор. Рост пористости с увеличением плотности анодного тока наблюдался также в работе [12] (рис. 4). На этом же рисунке показано, что с увеличением плотности тока эффективная концентрация носителей уменьшается.

По рентгеновским данным установлено, что в пределах точности измерений пористость не изменяется при отжиге пористого образца перед ростом на нем эпитаксиального слоя карбида кремния. В то же время (табл. 2) количество пор снижается, поверхность и объем одной поры вырастают. Этот факт можно объяснить перестройкой структуры пористого карбида кремния при высокотемпературном отжиге образцов, в результате которой произошло слияние отдельных пор с увеличением их диаметра, что видно на рис. 4. Можно предположить, что структурная перестройка вызвана сублимацией вещества внутри пор, а также существующими в пористом карбиде кремния механическими напряжениями.

**В**лияние уровня легирования на оптические характеристики пористого SiC было изучено в работе [15]. На сильно легированных азотом подложках пористые слои были зеленые и прозрачные, на слаболегированных — коричневые и непрозрачные. Причина этого явления в том, что поры, имея коэффициент отражения, отличный от коэффициента отражения основного материала, рассеивают свет.

В работе [16] для 6H-SiC  $n$ -типа проводимости, изготовленного методом Лели, было изучено влияние степени легирования подложки в интервале  $4 \cdot 10^{17} - 4,2 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> на характеристики пористого слоя — диаметр пор, пористость, концентрацию пор. Было установлено, что в сильнолегированных подложках по сравнению со слаболегированными фор-

мируется пористый слой с порами меньшего диаметра и объема, но с большей (в несколько раз) концентрацией пор.

В работе были использованы 15 полированных подложек *n*-типа, легированных азотом в широком диапазоне концентраций. Концентрация нескомпенсированной примеси Nd–Na определялась по максимуму поглощения света в области  $\lambda=630$  нм. Сечение поглощения фотона на указанной длине волны можно оценить как  $\sigma=(5,32 \pm 0,5) \cdot 10^{-18}$  см<sup>2</sup>. Концентрация примеси, определенная таким образом, находилась в интервале  $4 \cdot 10^{17}$ — $4,2 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>.

После нанесения омического контакта на С-грань подложки на Si-границе формировался пористый карбид кремния путем электрохимического травления в растворе HF:H<sub>2</sub>O:C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH=1:1:2. Травление проводилось с подсветкой ультрафиолетовым светом в течение 15 мин при плотности тока 20 мА/см<sup>2</sup>. Толщина пористого слоя на большей части образцов определялась с помощью сканирующего электронного микроскопа, пористость — гравиметрическим методом. Диаметр пор определялся рентгеновским методом [4]. (В отличие от метода анализа изотерм адсорбции газов при низких температурах, использованного в [2], рентгеновский метод не позволяет найти распределение пор по диаметрам на каждой подложке, а дает усредненный результат, зато его можно считать экспресс-методом, не загрязняющим образцы.) Рентгеновские измерения проводились на двухкристальном дифрактометре (ДКД) и CuK<sub>α1</sub>-излучении. Структурное совершенство слоев пористого карбида кремния контролировалось по поведению угловой ширины дифракционной кривой на половине максимума (FWHM) для симметричного брэгговского отражения (0006).

ДКД-кривые качания для всех образцов пористого карбида кремния на подложке SiC одинаковы по форме и состоят из узкого пика на широком диффузном фоне. Согласно [14], именно эта широкая низкоинтенсивная часть ДКД-кривой качания связана с диффузным рассеянием на пористой структуре, и ширина диффузного пика  $\omega_{ds}$  дает возможность вычислить значение эффективного диаметра пор. Известно, что поры в карбиде кремния растут елочкой, либо имеют вид цепочки тетраэдров [3, 4]. Тем не менее для анализа результатов рентгеновских измерений полезно ввести понятие эффективного диаметра пор  $d_{ef}$ , считая их цилиндрическими, а также считать, что выходы пор на поверхность расположены в виде квадратной сетки. Правомерность такого подхода подтверждается данными [4], где вычисленные из значений  $\omega_{ds}$  величины  $d_{ef}$  удовлетворительно согласуются с данными сканирующей электронной микроскопии. Зависимость  $d_{ef}$  и толщины слоя пористого карбида кремния от легирования подложки приведены на **рис. 5**.

Зная толщину пористого слоя  $h$ , пористость и  $d_{ef}$ , несложно вычислить объем одной поры и количество пор, приходящееся на 1 см<sup>2</sup> поверхности пористого карбида кремния. Поскольку формирование пористого карбида кремния для всех образцов проходило в одинаковом режиме, то масса, а значит, и объем удаленного травлением материала в пересчете на 1 см<sup>2</sup> был одинаков для всех образцов ( $\approx 1$  мг/см<sup>2</sup>). Таким

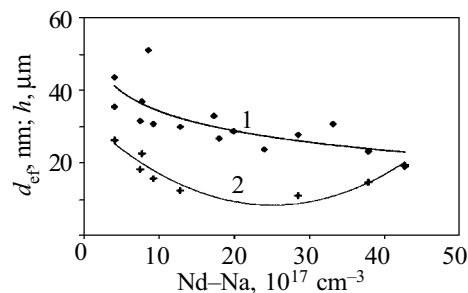


Рис. 5. Зависимость эффективного диаметра пор  $d_{ef}$  (1) и толщины пористого слоя  $h$  (2) от легирования подложки (плотность тока 20 мА/см<sup>2</sup>, время травления 15 мин)

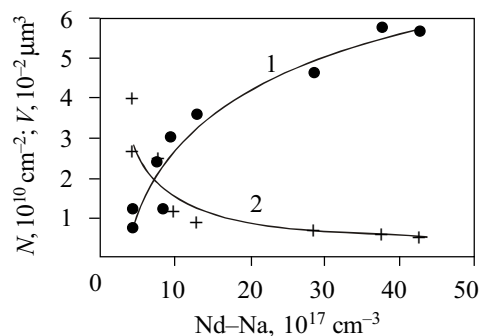


Рис. 6. Зависимость поверхностной концентрации пор  $N$  (1) и объема единичной поры  $V$  (2) от легирования подложки при тех же режимах травления

образом, полученные результаты должны зависеть только от легирования подложек и их дефектности.

Как видно из рис. 5, с ростом легирования подложек на порядок  $d_{ef}$  уменьшается примерно вдвое. При этом величина  $h$  имеет минимум, а пористость, которая в данном случае пропорциональна  $h^{-1}$ , имеет соответственно максимум, изменяясь в интервале 11,5 — 28%. С ростом легирования подложек объем одной поры снижается (рис. 6) примерно в 6 раз, а концентрация пор соответственно во столько же раз растет.

Таким образом, увеличение легирования подложек приводит к образованию существенно большего количества пор с меньшим диаметром при сравнительно небольшом изменении пористости. Имеющийся разброс данных, видимо, следует объяснить неоднородностью легирования и наличием структурных дефектов.

Зависимость  $d_{ef}$  от плотности тока проверялась на нескольких образцах. При этом пористый карбид кремния формировался на разных участках одного и того же образца. С ростом плотности тока диаметр пор слабо растет и скорость роста пористого слоя также увеличивается, как и в [4] для 6H–SiC. Аналогичные результаты были получены в работе [17]. Здесь исследовались образцы двух типов. Для первого типа плотность тока травления была 20, 60 и 100 мА/см<sup>2</sup> и время травления 15, 5 и 3 мин, соответственно. Для образцов второго типа плотность тока была меньше — 5, 10 и 15 мА/см<sup>2</sup>, а время травления 60, 30 и 20 мин. На **рис. 7** показаны зависимости размера пор (*a*), пористости (*b*) и толщины пористого слоя (*c*) от плотности анодного тока для этих образцов.

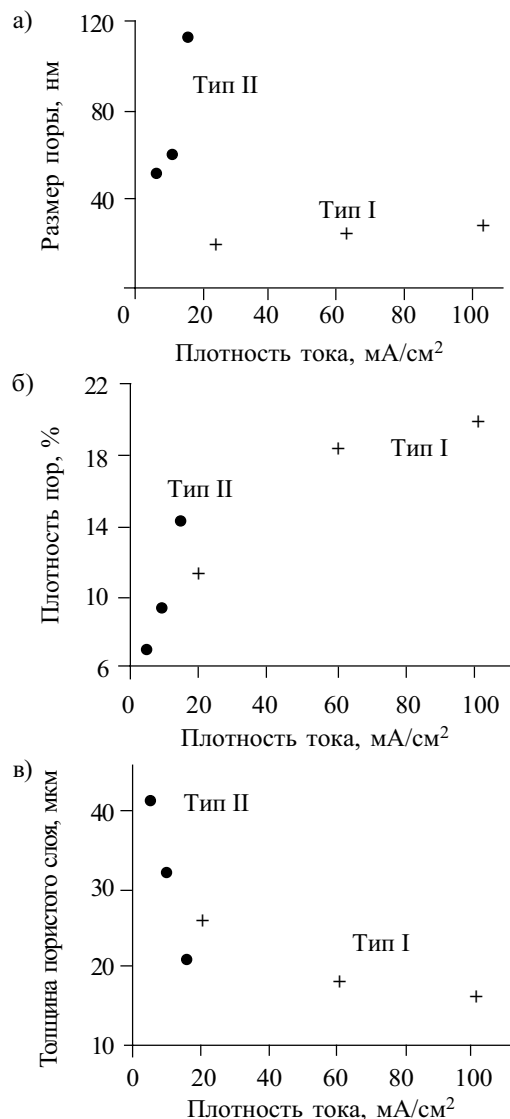


Рис. 7. Зависимости размера пор (а), пористости (б) и толщины пористого слоя (в) SiC от плотности анодного тока для двух типов образцов

Интересно сравнить полученные результаты с тем, что известно для пористого Si [1, 2]. В кремнии диаметр пор и скорость роста пористого слоя также увеличиваются с ростом плотности тока, но пористость имеет не максимум, а минимум при  $Nd \approx 10^{16} \dots 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Кроме того, при одинаковых режимах травления диаметр пор в пористом кремнии в несколько раз меньше, чем в пористом карбиде кремния, а пористость значительно выше, что, возможно, связано с различием энергии связей в кристаллической решетке кремния и карбида кремния. Отсюда следуют выводы: во-первых, нельзя автоматически переносить свойства одного пористого полупроводника на другие и, во-вторых, для получения воспроизводимых результатов пористый карбид кремния требует дальнейшего серьезного изучения.

\*\*\*

Проведенные исследования показали, что пористый слой SiC на подложке можно использовать как буферный слой для получения более совершенных,

чем подложка, эпитаксиальных слоев SiC. Дальнейшие исследования могут подтвердить перспективность применения пористого карбида кремния при разработке устройств высокотемпературной электроники, в которых эффективно используется развитая поверхность, — например, при разработке контактов в мощных силовых приборах, в газочувствительных датчиках, в технологических операциях гетерирования неконтролируемых примесей в подложке.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Arita V., Sunohara Y. Formation and properties of porous silicon films // *Journ. Electrochem. Soc.*— 1977.— Vol. 124, N 2.— P. 285—295.
2. Herino R., Bomchil C., Barla C. et al. Porosity and pore size distributions of porous silicon layers // *Ibid.*— 1987.— Vol. 134, N 8.— P. 1994—2000.
3. Shor J. S., Grimberg J., Weiss B. et al. Characterization of nanocrystallites in porous *p*-type 6H-SiC // *Appl. Phys. Lett.*— 1994.— Vol. 76, N 7.— P. 4045—4049.
4. Савкина Н. С., Ратников В. В., Шуман В. В. Влияние высокотемпературного эпитаксиального процесса роста слоев SiC на структуру пористого карбида кремния // *Физика и техника полупроводников.*— 2001.— Т. 35, вып. 2.— С. 159—163.
5. Savkina N. S., Sorokin L. M., Hutchison J. L. et al. TEM and EDX studies of 6H-SiC porous layer as a substrate for subsequent homoepitaxial growth // *Mater. Sci. Forum.*— 2002.— Vol. 389—393.— P. 271—274.
6. Matsumoto T., Takahashi J., Tamaki T. et al. Blue-green luminescence from porous SiC // *Appl. Phys. Lett.*— 1994.— Vol. 64.— P. 226—228.
7. Shor J. S., Grimberg J., Weiss B.-Z., Kurtz A. D. Direct observation of porous SiC formed by anodization in HF // *Appl. Phys. Lett.*— 1993.— Vol. 62.— P. 2836—2838.
8. Mynbaeva M. Porous wide band-gap semiconductors: prospective applications / *Abstr. of the 4th Intern. Seminar on SiC and Related Mat.*— Novgorod the Great.— 2002.— P. 15.
9. Shulpina I. L., Ratnikov V. V., Savkina N. S., Shuman V. B. Real structure of homoepitaxial SiC-6H and 4H layers grown over porous substrates / *Abstr. of the 5th Intern. Seminar on SiC and Related Mat.*— Novgorod the Great.— 2004.— P. 32.
10. Mynbaeva M., Sadow S. E., Melnychuk G. et al. Chemical vapor deposition of 4H SiC epitaxial layers on porous SiC substrates // *Appl. Phys. Lett.*— 2001.— Vol. 78.— P. 117—119.
11. Sadow S. E., Choyke W. J., Melnychuk G. et al. SiC defect density reduction by epitaxy of porous surfaces // *Mater. Sci. Forum.*— 2001.— Vol. 115.— P. 353—356.
12. Sudarrchan T. S., Khlebnikov I. I. Silicon carbide research activity in south carolina / *Abstr. of the 4th Intern. Seminar on SiC and Related Mat.*— Novgorod the Great.— 2002.— P. 82.
13. Stoney G. The tension of metallic films deposited by electrolysis // *Proc. R. Soc. London, Ser. A.*— 1909.— Vol. 82.— P. 172—175.
14. Bellet D., Dolino G., Ligeon M. et al. Studies of coherent and diffuse x-ray scattering by porous silicon // *J. Appl. Phys.*— 1992.— Vol. 71.— P. 145—149.
15. Savkina N. S., Shuman V. B., Ratnikov V. B. et al. Features of sublimation growth on porous SiC substrates / *Abstr. of the 4th Intern. Seminar on SiC and Related Mat.*— Novgorod the Great.— 2002.— P. 17.
16. Савкина Н. С., Шуман В. В., Ратников В. В. Влияние легирования подложки на параметры пористых слоев SiC // *Письма в ЖТФ.*— 2002.— Т. 28, вып. 10.— С. 30—34.
17. Savkina N. S., Sorokin L. M., Hutchison J. L. et al. Role of the defects under porous silicon carbide formation // *Applied Surface Science.*— 2001.— Vol. 184.— P. 252—256.

А. Н. СМЕРНОВ, Н. С. ПУЧКОВА, к. т. н. Р. Г. СИДОРЦ,  
В. Д. ЛЕМЗА

Украина, г. Одесса, Научно-исследовательский технологический институт «Темп»

Дата поступления в редакцию  
16.11 2004 г.

Оппонент к. т. н. Л. И. ПАНОВ  
(ОНПУ, г. Одесса)

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ НИЗКООМНЫХ ТОЛСТОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Разработанная на основе Ag/Ru/Pd система паст и содержание в этой системе 35—45% стеклосвязки обеспечивают необходимые характеристики резисторов и расширяют возможности толсто пленочной технологии.*

Несмотря на бурное развитие полупроводниковой микроэлектроники толсто пленочная технология продолжает удерживать свои традиционные позиции на рынке разработки и производства радиоэлектронной аппаратуры. В последние годы наметилась тенденция применения толсто пленочной технологии в новых областях техники (сенсоры, люминесцентные панели, нагреватели различного типа и т. д.). Такое положение объясняется уникальным сочетанием экономических и технических характеристик технологического процесса: при достаточно низкой стоимости производства достигаются высокие качественные характеристики (стабильность, удельная мощность, диапазон номиналов и т. д.) [1, 2].

Новые схемотехнические решения аппаратуры потребовали решения задачи создания высокостабильных низкоомных переменных резисторов, при этом основное требование к резистивному слою — высокая устойчивость к истиранию и гладкость поверхности.

Существующие в стране резистивные материалы на основе соединений рутения имеют удельное сопротивление 5 Ом/□ и выше. Поверхность резистора шероховатая, что приводит к неравномерности показаний резистора в процессе подстройки и к изменению сопротивления резистора в процессе эксплуатации, поскольку при перемещении токоъемов (металлических щеток из сплава Ni/Ag) по такой поверхности наблюдается «втирание» материала контакта в приповерхностный слой.

Шероховатость поверхности резистора обусловлена снижением количества стеклообразующего наполнителя до 18—20%. Увеличение стеклонеполнителя до 30—40% обеспечивает необходимый вид поверхности, но увеличивает сопротивление до десятков килоом. Таким образом, единственным путем решения проблемы является поиск функционального материала, обеспечивающего требуемое сопротивление при достаточно высоком содержании стеклофазы.

На первом этапе разработки низкоомных паст с хорошими поверхностными свойствами была исследована система паст на основе Ag/Pd с содержанием

связки до 40%, но она в связи с высоким содержанием палладия в пасте (до 20%) не получила дальнейшего развития из-за значительной стоимости.

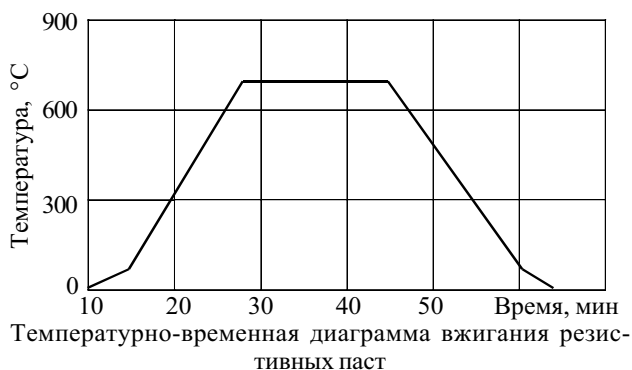
На следующем этапе исследовалась система паст на основе Ag/Ru. Разработанные пасты с номиналом 10—50 Ом/□ ввиду нестабильности резисторов и высокого положительного ТКС также не получили дальнейшего развития.

Наиболее перспективной для получения требуемого результата представляется система паст, разработанная на основе Ag/Ru/Pd. Содержание стеклосвязки в этой системе составляет 35—45 мас.%. Отличные поверхностные свойства и технологические характеристики паст обеспечивают их значительные преимущества по сравнению с существующими резистивными материалами.

Образцы для исследования изготавливались из паст, представляющих собой суспензию мелкодисперсных порошков серебра, палладия, рутения и стеклофазы в органическом связующем. Пасты наносили методом трафаретной печати на керамическое основание (подложки из 96% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Для печати использовался трафарет из сетки из нержавеющей стали с размером ячейки 40 мкм. Геометрия тестового резистора — длина 18 мм, ширина 3 мм.

После нанесения отпечатки предварительно подсушивали при комнатной температуре в течение 5—10 мин, а затем в течение 10—15 мин при 120°C, и вжигали на воздухе при пиковой температуре 800°C в течение 10 мин. Толщина подсушенного слоя 20—24 мкм.

Для изготовления контактных площадок использовалась проводниковая серебро-палладиевая паста марки 4320, предварительно вожженная при 850°C.



На рисунке представлена температурно-временная диаграмма вжигания резистивных паст. По внешнему виду пасты после вжигания представляют собой блестящий гладкий слой черного цвета без раковин и трещин.

Таблица 1  
Свойства разработанных низкоомных резистивных элементов

Параметр	Марка пасты		
	4301	4305	4310
Удельное сопротивление ( $\pm 20\%$ ), Ом/□	1	5	10
ТКС, $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ( $+25^\circ\text{C} \text{—} +125^\circ\text{C}$ )	+200	+150	+100
Условная вязкость, мм	20—24	20—24	20—24

Свойства полученных резистивных элементов приведены в табл. 1. Для получения промежуточных величин удельного сопротивления паста 4305 (5 Ом/□) может смешиваться с пастами соседних номиналов 4301 и 4310. Из-за различного химического состава пасты марок 4301, 4305 и 4310 не смешиваются с пастами серии 5000 и 5300 ТУ У 14314765.002—2000.

При необходимости пленочные резисторы могут защищаться пастой марки 0011 на основе многокомпонентного легкоплавкого стекла. Изменение удельного сопротивления после вжигания защитного слоя составляет 1—3%.

Таблица 2  
Характеристики потенциометров с использованием разработанных паст

Параметры контроля	Марка пасты		
	4301	4305	4310
Изменение контактного сопротивления после 100 скольжений, % (контакты из латунной проволоки)	0,8	0,6	0,4
Стабильность при погружении в расплавленный припой ПСр в течение 5 с при $220^\circ\text{C}$	2,0	1,0	1,5

В табл. 2 представлены характеристики потенциометров с использованием разработанных паст. Аналогичные материалы выпускаются фирмами «Du Pont» (США) [3] и «Элма-пасты» (Россия) [4]. Их характеристики приведены в табл. 3, 4.

Разработанная система низкоомных паст нашла неожиданное применение при изготовлении толстопленочных нагревательных элементов для копировальной техники и лазерных принтеров. Изготовленные

Таблица 3

Свойства низкоомных резистивных элементов из паст фирмы «Du Pont»

Параметр	Марка пасты		
	4662	4663	4664
Удельное сопротивление ( $\pm 20\%$ ), Ом/□	0,5	2,5	10
ТКС, $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ( $+25^\circ\text{C} \text{—} +125^\circ\text{C}$ )	$\pm 100$	$\pm 100$	$\pm 100$
Вязкость пасты (вискозиметр Брукфильда, при $25^\circ\text{C}$ )	120—220	120—220	120—220
Контакты из платино-серебряной пасты марки 9770 фирмы «Du Pont»			

Таблица 4

Свойства низкоомных резистивных элементов из паст фирмы «Элма-пасты»

Параметр	Марка пасты	
	ПСПрУ-0,5	ПСПрУ-10
Удельное сопротивление ( $\pm 20\%$ ), Ом/□	0,35-0,75	7,0-13,0
ТКС, $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ( $+25^\circ\text{C} \text{—} +125^\circ\text{C}$ )	+350	+150
Вязкость пасты (вискозиметр Брукфильда, при $25^\circ\text{C}$ )	20—25	20—25
Контакты из серебро-палладиевой и серебро-платиновой пасты серии ПП		

на алюмооксидной керамике нагревательные элементы не уступают по характеристикам широко применяемым тонкопленочным, но оказываются значительно долговечней, а главное, экономически более выгодны.

Еще одним применением является использование резистивных паст при изготовлении элементов термомпечатающих головок.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Падалко В. Г., Грищенко С. Г., Зубарев В. В. и др. Программа развития конкурентоспособных направлений микроэлектроники в Украине // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.—1999.— № 4.— С. 3—8.
2. Падалко В. Г. Состояние, проблемы и перспективы возрождения электроники Украины // Там же.— 1999.— № 2—3.— С. 3—5.
3. Низкоомные резистивные пасты марок 4662, 4663 и 4664 для керметных подстроечных резисторов / Проспект фирмы «Du Pont», 1993.
4. Резистивные серебро-палладиевые пасты серии ПСРУ / Проспект фирмы «Элма-пасты».— Зеленоград, 2003.

#### НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

### Джакония В. Е. (под ред.) Телевидение.— М.: Радио и связь, 2004.— 490 с.— 2-е изд., испр. и доп.

Излагаются теоретические основы телевидения и анализируются физические процессы в важнейших узлах телевизионной аппаратуры — фотоэлектрических и оптоэлектрических преобразователях, модулях ТВ приемников и др. Рассматриваются основные современные ТВ системы: цветного телевидения, спутникового ТВ вещания, кабельного ТВ, стереотелевидения, телевизионного контроля и измерения. Особое внимание уделяется проблемам цифрового ТВ вещания, технологии интерактивного телевидения, передачи телевизионных программ по сети Интернет и — в перспективе — интеграции всех телекоммуникационных служб в единую систему.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению «Телекоммуникации» и специальности «Радиосвязь, радиовещание и телевидение». Учебник будет также полезен для инженеров, работающих в области телевизионной техники.



К. т. н. Н. М. ВАКИВ, к. ф.-м. н. Р. Я. ГОЛОВЧАК,  
к. ф.-м. н. А. П. КОВАЛЬСКИЙ, д. ф.-м. н. О. И. ШПОТЮК

Украина, г. Львов, Научно-производственное предприятие «Карат»  
E-mail: shpotyuk@novas.lviv.ua

Дата поступления в редакцию  
06.09 2004 г.

Оппонент д. ф.-м. н. В. М. ЦМОЦЬ  
(Дрогобычский гос. пед. ун-т)

## УСЛОВИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТЕКЛООБРАЗНЫХ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СПЛАВОВ В ДОЗИМЕТРИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ $\gamma$ -КВАНТОВ

*Реализация дозиметрических систем на основе исследованных сред требует учета послерадиационной релаксации значений контролируемого параметра и его зависимости от нагрева.*

Поиск дешевых и эффективных сред для приборов контроля и регистрации высокоэнергетичных ионизирующих излучений уже длительное время является одной из актуальных задач радиационной физики. Как вариант ее решения может рассматриваться использование для этих целей различных стеклообразных сплавов.

Кроме оксидных стекол, традиционно применяемых в промышленной дозиметрии [1, 2], интерес вызывают и бескислородные ковалентно-увязанные халькогенидные сплавы (ХС), представляющие собой соединения атомов халькогена (серы, селена или теллура) с элементами IV и V групп Периодической таблицы. Их преимуществом, несомненно, является более высокий порог измеряемых доз, составляющий в случае стеклообразного трисульфида мышьяка  $10^7$  Гй [3, 4]. Успехи в области исследования влияния высокоэнергетичных излучений на структуру и физические свойства многокомпонентных ХС позволяют расширить внутри данного класса материалов поиск новых перспективных радиационно-чувствительных сред для промышленной дозиметрии [5, 6].

Среди многих исследованных авторами ХС тройных систем As—Sb—S, As—Bi—Se, Ge—Sb—S и Ge—As—S [5, 7, 8] именно нестехиометрический разрез последней  $(As_2S_3)_x(Ge_2S_3)_{1-x}$  обладает требуемым сочетанием технологических и дозиметрических свойств, необходимых для возможного промышленного внедрения. Однако имеются определенные ограничения, связанные с ощутимой температурной чувствительностью измеряемых физических параметров и наличием их послерадиационной релаксации [9]. Эти особенности и являются предметом анализа в настоящей работе.

Влияние радиационного поля высокоэнергетичных  $\gamma$ -квантов источника  $^{60}Co$  (средняя энергия  $E=1,25$  МэВ, мощность дозы  $P=1 \dots 2$  Гй/с) изучалось в диапазоне доз от 0,5 до 4,4 МГй для ХС разреза  $(As_2S_3)_x(Ge_2S_3)_{1-x}$  с  $x=0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,8$ . Каждому из составов соответствовало определенное значение среднего координационного числа  $Z$  (2,76, 2,72, 2,67, 2,64,

2,60, 2,56, 2,48), равного среднему количеству ковалентных химических связей в расчете на один атом формульной единицы стекла. (Следует отметить, что  $Z$  является общепринятой переменной при изучении концентрационных зависимостей физических свойств ХС [5].)

В качестве параметра, измеряемого до и после облучения, выбрано максимальное значение относительного изменения коэффициента оптического поглощения  $(\Delta\alpha/\alpha)_{\max}=\chi$ , полученное из зависимости  $\Delta\alpha/\alpha$  от  $Z$ . С целью изучения послерадиационной релаксации параметра  $\chi$  его значения регистрировались через 2 ( $\chi_{\Sigma}^{90}$ ) и 90 ( $\chi_{\text{ст}}^{90}$ ) суток после завершения радиационной обработки. Дозиметрическая эффективность ХС определялась значением чувствительности  $S$ , получаемой из формулы

$$\chi = S \lg \Phi + A, \quad (1)$$

где  $S = (\chi_2 - \chi_1) / \lg(\Phi_2 / \Phi_1)$ ;  
 $\chi_2, \chi_1$  — измеряемые физические величины при дозах облучения  $\Phi_2$  и  $\Phi_1$ , соответственно;  
 $A$  — некоторая постоянная.

Проведенные исследования показали (табл. 1), что при указанной выше мощности дозы только в диапазоне доз от 0,5 (порог чувствительности для данного разреза ХС) до 1 МГй практически отсутствует влияние температурного нагрева образца на дозовые зависимости измеряемого параметра  $\chi$ . Следовательно, именно в этом диапазоне возможно адекватное изучение дозиметрических характеристик ХС, а также механизмов послерадиационной релаксации контролируемых физических величин (в нашем случае  $\chi$ ).

Как видно из таблицы, через двое суток после облучения наибольшей чувствительностью  $S_{\Sigma}$  к  $\gamma$ -облу-

Таблица 1

*Дозиметрические характеристики ХС разреза  $(As_2S_3)_x(Ge_2S_3)_{1-x}$  рассчитанные через 2 ( $\chi_{\Sigma}^{90}, S_{\Sigma}$ ) и 90 ( $\chi_{\text{ст}}^{90}, S_{\text{ст}}$ ) суток после  $\gamma$ -облучения дозой 1,0 МГй*

Z	x	$\chi_{\Sigma}^{90}$	$S_{\Sigma}$	$\chi_{\text{ст}}^{90}$	$S_{\text{ст}}$	$(S_{\Sigma} - S_{\text{ст}}) / S_{\Sigma}$
2,76	0,1	0,52	1,73	0,17	0,56	0,68
2,72	0,2	0,61	2,03	0,27	0,90	0,56
2,67	0,3	0,63	2,10	0,28	0,93	0,56
2,64	0,4	0,42	1,40	0,25	0,83	0,41
2,60	0,5	0,38	1,26	0,215	0,72	0,43
2,56	0,6	0,34	1,13	0,18	0,60	0,47
2,48	0,8	0,27	0,90	0,10	0,33	0,63

чению обладают ХС, характеризующиеся значением  $Z=2,67$ . Известно [5, 6], что при этом значении среднего координационного числа в ХС в наибольшей степени проявляются структурные изменения, индуцированные внешними воздействиями, в том числе и полем высокоэнергетических  $\gamma$ -квантов. Данная особенность объясняется максимальной структурной разупорядоченностью матрицы ХС по сравнению с другими составами выбранного нестехиометрического разреза, о чем свидетельствует наблюдаемый в этой точке максимум молярного объема [5]. В то же время природа такой композиционной особенности уже на протяжении более 10 лет является предметом интенсивной научной дискуссии, где одна сторона стоит на позициях существования при данном соотношении химических компонент топологического фазового перехода от двухмерной к трехмерной структурной сетке стекла [10], а другая склоняется к возможности образования наноразмерных областей фазового расслоения [11].

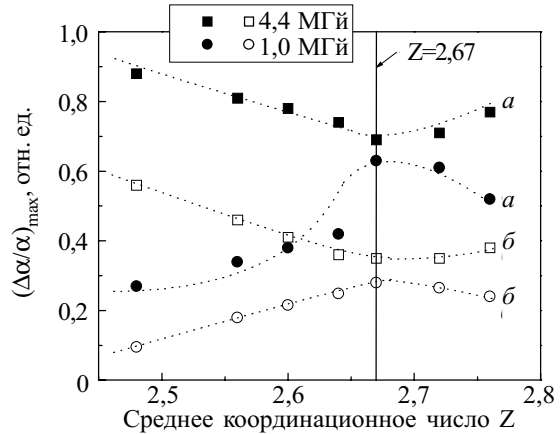
Вследствие послерадиационной релаксации значение параметра  $\chi$ , рассчитанное через 90 суток после облучения ( $\chi_{ст}^{90}$ ), существенно уменьшается. Но и в этом случае наиболее чувствительным остается ХС с  $Z=2,67$ , т. к. относительное изменение чувствительности  $(S_{\Sigma}-S_{ст})/S_{\Sigma}$  максимально для крайних составов, обогащенных As и Ge. Естественно, что уменьшение контролируемого параметра со временем после окончания радиационного воздействия требует дополнительного учета этой зависимости  $\chi(t)$  в процессе регистрации поглощенной дозы, однако дозиметрические характеристики ХС остаются вполне удовлетворительными для практической реализации такой регистрирующей системы впоследствии.

Таблица 2

Значения чувствительности ХС разреза  $(As_2S_3)_x(Ge_2S_3)_{1-x}$  к высокоэнергетичному  $\gamma$ -облучению, рассчитанные через 2 ( $S_{\Sigma}$ ) и 90 ( $S_{ст}$ ) суток после  $\gamma$ -облучения различными дозами

Z	x	$\Phi=0,5...1,0$ МГй, $T<320...330$ К		$\Phi=1,0...4,4$ МГй, $T\leq 370...380$ К		$(S_{\Sigma}-S_{ст}')/S_{\Sigma}$	$(S_{ст}-S_{ст}')/S_{ст}$
		$S_{\Sigma}$	$S_{ст}$	$S_{\Sigma}'$	$S_{ст}'$		
		2,76	0,1	1,73	0,56		
2,72	0,2	2,03	0,90	0,16	0,16	0,92	0,82
2,67	0,3	2,10	0,93	0,09	0,11	0,96	0,88
2,64	0,4	1,40	0,83	0,50	0,17	0,64	0,80
2,60	0,5	1,26	0,72	0,63	0,30	0,50	0,58
2,56	0,6	1,13	0,60	0,73	0,44	0,35	0,27
2,48	0,8	0,90	0,33	0,95	0,73	-0,06	-0,63

Более сложным является учет совместного воздействия излучения и температуры нагрева образца ХС в канале источника при высоких поглощенных дозах (табл. 2). В результате такого влияния максимальной чувствительностью обладают дозиметрические системы на основе мышьякообогащенных ХС, структура которых практически не изменяется под действием температурного фактора. В то же время в ХС с  $Z=2,67$  наблюдается температурное стирание радиационно-индуцированных изменений параметра  $\chi$ , вследствие чего такие стекла становятся менее чувствительными к влиянию поля высокоэнергетических  $\gamma$ -квантов по сравнению с ХС других составов данного разреза (см. рисунок). Данный факт легко объясняется максимальным уменьшением (с увели-



Композиционные зависимости относительного изменения коэффициента оптического поглощения  $(\Delta\alpha/\alpha)_{max}$ , зарегистрированные через 2 (а) и 90 (б) суток после завершения процесса радиационной обработки  $\gamma$ -квантами дозами 1,0 и 4,4 МГй, для ХС разреза  $(As_2S_3)_x(Ge_2S_3)_{1-x}$

чением дозы для названного состава) относительно изменения чувствительности как суммарного эффекта  $(S_{\Sigma}-S_{ст}')/S_{\Sigma}$ , так и его статической составляющей  $(S_{ст}-S_{ст}')/S_{ст}$ .

Таким образом, ХС нестехиометрического разреза  $(As_2S_3)_x(Ge_2S_3)_{1-x}$  могут быть эффективно использованы для контроля и регистрации больших поглощенных доз  $\gamma$ -излучения. При этом практическая реализация дозиметрических систем на основе этих сред требует учета как послерадиационной релаксации значений контролируемого параметра, так и его зависимости от нагрева в канале источника излучения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Пикаев А. К. Современная радиационная химия. Твердое тело и полимеры. Прикладные аспекты.— М.: Наука, 1987.
2. Франк М., Штольд Б. Твердотельная дозиметрия ионизирующих излучений.— М.: Атомиздат, 1973.
3. Shpotyuk O. I. Amorphous chalcogenide semiconductors for dosimetry of high-energy ionizing irradiation // Radiat. Phys. Chem.— 1995.— Vol. 46, N 4—6.— P. 1279—1282.
4. Shpotyuk O. I., Balitska V. O., Vakiv M. M., Shpotyuk L. I. Sensors of high-energy radiation based on amorphous chalcogenides // Sensor Actuat. A.— 1998.— Vol. 68.— P. 356—358.
5. Shpotyuk O., Kovalskiy A. Compositional trends in the radiation-optical properties of chalcogenide glasses // J. Optoelectron. Adv. Mater.— 2002.— Vol. 4, N 3.— P. 751—762.
6. Kovalskiy A. Peculiarities of  $\gamma$ -induced optical effects in ternary systems of amorphous chalcogenide semiconductors // Ibid.— 2001.— Vol. 3, N 2.— P. 323—327.
7. Ковальський А. Вплив високоенергетичного  $\gamma$ -випромінювання на оптичні властивості халькогенідних стекол системи As—Sb—S // Вісн. НУ “Львівська політехніка”.— 2002.— № 455: Електроніка.— С. 28—33.
8. Ковальський А. П. Вплив гама-опромінення на спектри оптичного пропускання халькогенідних стекол  $As_2Se_3Bi_x$  // Вісн. Львівського університету. Сер. Фіз.— 1989.— Вип. 22: Фізичне матеріалознавство.— С. 85—88.
9. Вакив Н. М., Балицкая В. А., Шпотюк О. И., Буткевич Б. Деградиационные превращения в топологических разупорядоченных твердых телах: 1. Математические модели кинетики.— Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2003.— № 4.— С. 61—64.
10. Tanaka Ke. Structural phase transitions in chalcogenide glasses // Phys. Rev. B.— 1989.— Vol. 39, N 2.— P. 1270—1279.
11. Boolchand P., Georgiev D. G., Micolaut M. Nature of glass transition in chalcogenides // J. Optoelectron. Adv. Mater.— 2002.— Vol. 4, N 4.— P. 823—836.

## ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2004 г.

## Техническая политика

Проблемы создания системы глобального дистанционного зондирования Земли в ИК-диапазоне. *Б. Н. Формозов* 1

Спутниковая распределительная сеть информационного обеспечения как составляющая Национальной системы спутниковой связи. *И. В. Горбач, А. А. Макаров* 5

## Электронные средства: исследования, разработки

Метод компоновки плат микросборки. *В. Г. Спирин* 1

Экономичный метод приближенной минимизации ДНФ булевых функций. *С. Ю. Лузин, О. Б. Полубасов* 1

Методика конструкторской реализации непроволочных переменных резисторов с заданными свойствами. *В. М. Николаенко, А. В. Задерейко, О. В. Николаенко* 1

Выбор цифровой камеры для оптического микроскопа. *В. Н. Боровицкий* 1

Портативный пламенно-ионизационный газоанализатор. *В. Ф. Рыжков* 1

Радиационный анизотропный оптикотермоэлемент с боковым термостатированием. *А. А. Ащеулов, В. Г. Охрем* 1

Компактные измерительные приборы для определения параметров активных и пассивных компонент ВОЛС. *А. А. Воронько, П. А. Мерзвинский, В. И. Осинский, К. Б. Карпинский, В. Г. Вербицкий* 1

Оценка электромонтажных параметров коммутационных плат на ранних этапах проектирования РЭС. *Б. А. Елизаров, А. В. Максимов, В. И. Шелест, Ю. Н. Ширяев* 2

Повышение эффективности силового размещения компонентов. *П. И. Дмитриев, С. В. Зудин, М. С. Лузин, О. Б. Полубасов* 2

Изменения низкочастотных шумов в  $p-n$ -переходах при низких температурах. *А. Г. Головкин* 2

Математические модели сопротивления тонкопленочного резистора с размерами 50 мкм. *В. Г. Спирин* 2

Система линейной телемеханики «Хортица-М» для газопроводов. *С. В. Дубец, Е. Н. Федорченко, В. И. Кузьминов* 2

Малогобаритный стационарный пирометр с повышенным температурным разрешением. *А. М. Ахиезер* 2

Анализ измерительных схем автоматических хемилюминесцентных газоанализаторов оксидов азота и озона. *И. Л. Михеева, В. К. Куринный, В. Ю. Таякин, Л. Д. Мазыра* 2

Система экологического мониторинга состояния воздуха вдоль автомагистралей населенных пунктов. *Г. А. Девятко, С. А. Лацис, В. Я. Подольский, В. В. Закрасняный* 2

Метод оперативного тестирования вычислительных устройств с плавающей точкой. *А. В. Дрозд, Н. Б. Копытчук, Е. В. Огинская* 2

Закономерности деградации светоизлучающих диодов. *И. М. Викулин, В. И. Ирха, Б. В. Коробицын, В. Э. Горбачев* 2

Механизм возникновения шумовых максимумов в элементах с нелинейными вольт-амперными характеристиками. *А. Г. Головкин* 3

Компенсация систематических погрешностей тонкопленочных элементов через элементы фотошаблона. *В. Г. Спирин* 4

Моделирование низкочастотных соединителей для применения в высокочастотных цепях. *А. А. Ефименко, В. В. Шаталов* 4

Компьютерное моделирование флуктуационных преобразований в полупроводниковых барьерах. *А. Г. Головкин* 4

Модель электромагнитных помех УВЧ-усилителя мощности. *В. Г. Кудря* 4

Пьезоэлектрические преобразователи энергии волнения моря. *М. Д. Скубилин* 4

Ультрафиолетовый радиометр диапазона 300...400 нм. *А. А. Ащеулов, В. К. Бутенко, И. В. Докторович, А. Х. Дунаенко, В. Д. Фотий* 4

Оценка производственных погрешностей тонкопленочных элементов. *В. Г. Спирин* 4

Метод проектирования топологии тонкопленочной микросборки с размерами пленочных элементов 10—50 мкм. *В. Г. Спирин* 4

Аналоги негatronов для защиты мощной цепи от перегрузки. *О. Н. Негоденко, Е. Б. Лукьяненко, Д. В. Заруба* 5

Контроллер последовательного синхронного приема. *Г. В. Куценко* 5

Основы технологии согласования волновых сопротивлений на границе раздела воздуха и ферромагнитной среды. *Б. А. Демьянчук* 5

Схемное решение построения каскадного регистра сдвига. *Г. В. Куценко* 6

## СВЧ-техника

Генерирующие структуры в виде ГИС с элементами микромеханики. *В. И. Юрченко, С. Д. Воторопин* 1

Приемные устройства мм-диапазона для систем связи и вещания. *И. К. Сундучков* 5

Малосигнальная модель транзистора в разработке СВЧ малощумящих усилителей. *П. А. Емцев* 6

## Системы передачи и обработки сигнала

Многофункциональная аппаратура передачи и приема данных 3-501. *Куценко В. Н., Левченко Т. В.* 2

Реализация элементов быстродействующего цифрового фильтра на ПЛИС. *В. П. Малахов, В. С. Ситников, П. В. Ядвичук* 4

Приемник импульсной радиолокационной станции с модуляционной обработкой сигнала. *А. Г. Сорочан* 4

Метод эффективной обработки импульсно-модулированных сигналов. *Ю. П. Сердюков* 5

Линии задержки в J-корреляционном методе пеленгации. *А. Г. Сорочан* 5

## Биомедицинская электроника

Разработка конструкции и технологии изготовления диодов Ганна для КВЧ-терапии. *В. Н. Иванов, В. М. Ковтонюк, Н. С. Раевская* 3

Полупроводниковый генераторный модуль с умножением частоты для аппаратуры КВЧ-терапии. *В. И. Перфильев, С. В. Плаксин, С. И. Соколовский* 4

Термоэлектрический прибор для медико-биологической экспресс-диагностики. *А. А. Ащеулов, Л. Я. Кушнерик* 4

## Сенсоэлектроника. Датчики

Стабильность характеристик медных пленочных термопреобразователей сопротивления. *В. В. Брайловский, О. Е. Иларионов, П. М. Шпатар* 1

Сенсор для контроля процессов формирования и набора прочности вяжущих сред. *Л. М. Зайченко, А. И. Середюк, В. Д. Фотий, Ю. Ф. Шевчук*

Преобразователь давления с частотным выходом на основе однопереходных тензотранзисторов. *Г. Г. Бабичев, Г. И. Гаврилюк, Э. А. Зинченко, С. И. Козловский, В. А. Романов, Н. Н. Шаран*

Мостовые магниточувствительные сенсоры. *Л. Ф. Викулина, В. А. Мингалёв*

Датчик давления с тензочувствительным преобразователем на поверхностных акустических волнах. *Я. И. Лепих*

Газоаналитические средства системы контроля утечек хлора на основе электрохимических сенсоров. *Г. А. Девятко, С. А. Лацис, Г. М. Сычёв*

Исследование функций преобразования и чувствительности радиоизмерительного преобразователя давления. *В. С. Осадчук, А. В. Осадчук, Г. И. Гаврилюк, Н. Л. Билоконь*

Устройства измерения температуры на основе пленочных термоэлектрических сенсоров. *Н. В. Капитанов, А. И. Копыл, С. И. Кособуцкий, В. В. Разиньков, А. И. Середюк*

**Функциональная микро- и наноэлектроника**

Эффекты переключения и памяти в МОП-структурах Al—SiO<sub>2</sub>—Si. *З. А. Искендер-заде, М. Р. Ахундов, Э. А. Джафарова, Ш. А. Алиханова*

Акустостимулированное понижение температуры отжига радиационных дефектов в кристаллах Ge. *Я. М. Олих, И. А. Лисюк, Н. Д. Тимочко*

Устройства на основе фотонных кристаллов. *Е. А. Нелшн*

Методы построения микроэлектронных радиоизмерительных преобразователей с частотным принципом работы. *В. С. Осадчук, А. В. Осадчук*

Оптимизация геометрических характеристик р-п-структур для оптоэлектроники. *И. М. Викулин, В. И. Ирма, Б. В. Коробицын, В. Э. Горбачев*

Мощный инвертор напряжения со специальной силовой микросхемой. *Г. И. Гаврилюк, А. П. Бакалюк, В. В. Севастьянов, В. В. Чечель*

Измерители магнитных полей на автогенераторных принципах для магнитолевитирующего транспорта. *С. В. Плаксин, И. И. Соколовский*

Микронегатронный преобразователь давления на основе кремниевой МОП-структуры. *А. М. Гасанов, Ф. Д. Касимов, А. Э. Лютфалибекова*

Многоуровневая оптическая память на микро- и наноразмерных структурах. *В. В. Демёхин, В. В. Данилов*

Координатно-чувствительный фотоэлектромагнитный детектор ИК-излучения на основе HgCdTe. *О. А. Боднарук, Е. Д. Громко, А. В. Марков, С. Э. Остапов, И. М. Раренко, А. Г. Швец*

Модули солнечных элементов на основе тандемных гетероструктур GaAs—InGaAs—AlGaAs. *С. И. Круковский, Ю. Е. Николаенко*

КМОП БИС 16-разрядного микропроцессора, устойчивого к воздействию γ-радиации. *В. Г. Вербицкий, В. И. Золотаревский, Л. И. Самотовка, Б. А. Балай, А. Ф. Воцкинин, В. Л. Коба, Е. С. Тоемач, А. А. Явецкий*

Особенности разработки термостабилизированных германиевых фотодиодов. *В. В. Рюхтин, Ю. Г. Добровольский*

Проектирование схемы считывания для матриц ИК-фотодиодов среднего диапазона длин волн. *В. П. Рева, Ф. Ф. Сизов*

**Обеспечение тепловых режимов**

Математическая модель теплопроводности в сложных дискретно-непрерывных конструкциях. *А. Б. Козин, Л. А. Довнарлович, И. А. Данилюк, О. Б. Папковская*

Тепловой режим радиоэлектронного блока с изотермической подложкой и регулируемой температурой. *В. М. Батуркин*

Эффективный алгоритм управления термостатом. *А. М. Ахиезер, В. И. Мещеряков*

Устройство для охлаждения элементов микроэлектронной аппаратуры. *А. А. Ащеулов, В. Г. Охрем, Е. А. Охрем*

Исследование теплопередающих характеристик радиаторов с оребрением на основе миниатюрных тепловых труб. *В. Ю. Кравец, Ю. Е. Николаенко, А. И. Руденко*

Энергетические возможности проницаемых термоэлектрических охладителей из функционально-градиентных материалов. *Л. Н. Вихор, Р. Г. Черкез*

Исследование анизотропии теплопроводности деформированных медных пластин. *В. В. Усов, Н. М. Шкатуляк*

Тепловая эффективность оребренных поверхностей при низкоскоростном обдуве. *Е. Н. Письменный, В. Д. Бурлей, В. А. Рогачев, А. М. Терех*

Исследование проволочного радиатора с тепловыми трубами для средств вычислительной техники. *Л. А. Булавин, Т. Ю. Николаенко, Ю. Е. Николаенко*

**Технологические процессы и оборудование**

Коррекция электропроводности ферритонаполненных композитов путем СВЧ-воздействия. *Б. А. Демьянчук*

Получение электрокоммутационных слоев керамических теплопереходов методом детонационного напыления. *А. А. Ащеулов, А. Х. Дунаенко, В. И. Пундик, И. С. Романюк, В. Д. Фотий*

Выявление резервов производства методами статистического моделирования по пассивным данным. *Ю. А. Долгов*

Микроволновый нагрев: особенности модернизации технологии. *Б. А. Демьянчук*

Проблемы ресурсосбережения и экологической безопасности в гальванотехнологии. *М. Д. Скубулин, А. В. Письменов, Б. А. Гусев*

Использование фотоприемных устройств в качестве контрольных для снижения погрешности измерений. *Б. М. Ницович, И. В. Докторович, В. Н. Годованюк, В. К. Бутенко, В. Г. Юрьев*

Экспресс-метод контроля качества полупроводниковых диодных кристаллов. *С. П. Павлюк, Л. В. Ищук, В. М. Кислицын*

Интегрированный метод принятия решений об эффективной структуре технологических процессов. *Н. А. Алексеев*

Формирование столбиковых выводов для GaAs пиксельных детекторов. *З. В. Беришвили, Л. В. Джангидзе, Г. А. Схиладзе, Р. Г. Мелкадзе, Т. М. Лежнева, Г. Г. Перадзе*

Математическая модель технологического процесса по выборкам малого объема. *Ю. А. Долгов, А. Ю. Долгов*

Осаждение ЭДТА из комплексных растворов тяжелых металлов и его регенерирование. *О. Гилене, И. Айкайте, О. Нивинскене*

Технология изготовления термоэлектрических модулей Пельтье повышенной надежности. *А. А. Ащеулов, Ю. Г. Добровольский, И. С. Романюк*

Автоматизация процесса диагностики РЭА на основе метода эвристической классификации. *В. Е. Трофимов*  
 Исследование MOSFET-транзисторов в различных герметичных корпусах для поверхностного монтажа. *И. И. Рубцевич, Л. П. Ануфриев, А. Ф. Керенцев*  
 Температурные изоляторы для фидера сечением 70/30 мм. *Е. В. Кирюкова*  
 Исследование диагностических признаков в статистической диагностике изделий методом низкоскоростного удара. *В. С. Еременко, В. М. Мокийчук*  
 Технологические приемы улучшения теплового режима выращивания кристаллов GaAs методом Чохральского. *Г. П. Ковтун, А. И. Кравченко, А. И. Кондрик, А. П. Щербань*  
 Измерительный комплекс для определения фотоэлектрических параметров приемников излучения. *А. А. Ащеулов, А. Х. Дунаенко, В. Д. Фотий*

**Материалы электроники**

Деграционные превращения в топологически разупорядоченных твердых телах: 2. Мономолекулярная модель кинетики. *В. А. Балицкая, Н. М. Вакив, О. И. Шпотюк*

Термоэлектрические свойства сплавов системы  $TlInTe_2-PbYbTe_2$ . *М. М. Зарбашиев, Н. Ф. Гахраманов, Н. С. Сардарова, Г. А. Гейдарова*  
 Выбор полупроводникового материала для детекторов гамма-излучения. *А. С. Абызов, В. М. Ажажа, Л. Н. Давыдов, Г. П. Ковтун, В. Е. Кутний, А. В. Рыбка*  
 Полупроводниковые гетеропереходы оксид—InSe(GaSe) для фотоэлектрических анализаторов поляризованного излучения. *З. Д. Ковалюк, В. Н. Катеринчук*  
 Деграционные превращения в топологически разупорядоченных твердых телах: 3. Бимолекулярная кинетика затухания радиационных эффектов в ХСП. *Н. М. Вакив*  
 Диэлектрическая релаксация Коул-Коула. *В. В. Новилов, О. А. Комкова*  
 Квантовый выход межзонной излучательной рекомбинации в кристаллах CdHgTe. *А. И. Власенко, З. К. Власенко*  
 Моделирование свойств CdZnTe и параметров детекторов  $\gamma$ -излучения на его основе. *А. И. Кондрик*

**Библиография**

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2003 г.

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

- Лазерное текстурирование поверхности монокристалла кремния на температурном пьедестале плавления. (Украина, г. Херсон)
- Монтаж микросборок с подложкой из кремния. (Россия, г. Арзамас)
- Волноводные преобразователи электромагнитной энергии в тепловую. (Украина, г. Одесса)
- Блок детектирования гамма-излучения на основе CdZnTe для систем контроля радиационной обстановки. (Украина, г. Одесса)
- Двухспектральный сенсор дистанционной селекции естественных поверхностей. (Украина, г. Одесса)
- Оптико-электронный дистанционный сенсор с растровой решеткой. (Украина, г. Одесса)
- Нанесение тонких пленок в вакууме на подложки из синтетического опала. (Россия, г. Москва)
- Фотоприемник на основе полевого и однопереходного фототранзисторов. (Украина, г. Одесса)
- Акустоэлектронные сенсоры газа со слоистыми структурами. (Украина, г. Одесса)
- Микроэлектронные термодиодные сенсоры и их применение в экстремальной электронике. (Украина, г. Киев)
- Двухспектральный фотоприемник. (Украина, г. Черновцы)
- Исследование коэффициентов конвективного теплообмена в полупроводниковых термоэлектрических генераторах с каталитическим источником тепла. (Украина, г. Черновцы)
- Теоретическая оценка эффективности принудительного воздушного теплоотвода в рамочных конструкциях БЦВС. (Россия, г. Москва)
- Функциональный генератор колебаний напряжения на КНИ-транзисторе. (Украина, г. Киев)
- Переходные процессы в кремниевых  $n^+ - n - n^+$ -резисторах при протекании импульса тока. (Украина, г. Киев)
- Зависимость электрофизических параметров толстопленочных структур "RuO<sub>2</sub>—стекло" от дисперсности компонентов и температуры вжигания. (Украина, г. Одесса)
- Оптимизация цифрового фильтра для увеличения глубины резко изображаемого пространства в цифровой оптической микроскопии. (Украина, г. Киев)
- Моделирование сумматоров на языке VERILOG. (Украина, г. Одесса)
- Емкостные свойства МДП-структур HgCdTe/SiO<sub>2</sub>—Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. (Россия, г. Томск, г. Москва)
  - Деграционные превращения в топологически разупорядоченных твердых телах: 4. Особенности экспоненциальной кинетики. (Украина, г. Львов)
  - Матричный регистр. (Украина, г. Киев)
  - Интегрально-оптические волноводные дисперсионные элементы для ВОЛС. (Россия, г. Москва)
  - Функциональные свойства модифицированных пленок бактериородопсина, перспективного материала для молекулярной электроники. (Россия, г. Москва)

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



# РЕКОМЕНДАЦИИ АВТОРАМ ПО ПОДГОТОВКЕ РУКОПИСИ

1. Рукопись должна отличаться подчеркнуто прикладной направленностью. Если результаты получены в смежных областях знаний, необходимо показать их применимость в области интересов журнала.

2. При подготовке рукописи нужно учесть, что в редакции она пройдет рецензирование в **следующих аспектах**:

- адресат статьи (категория читателей);
- актуальность темы;
- обоснование постановки задачи;
- новизна информации (в сравнении с работами предшественников);
- бесспорность исходных положений;
- убедительность доказательств;
- правомерность выводов;
- целесообразность (и адекватность тексту) таблиц, иллюстраций, списка использованных источников;
- композиция рукописи, в т. ч. **оправданность объема**.

3. Название рукописи должно быть конкретным и, в то же время, по возможности кратким.

4. В дополнение к названию приведите мини-аннотацию в 12—16 слов с информацией, важной для адресата статьи.

5. При необходимости разделите рукопись на разделы. Там, где это возможно, желательно выделить выводы (резюме, заключение). Кстати, **проверьте себя** — насколько согласуются заявленная задача, констатация ее решения в выводах, аннотация статьи, ее мини-аннотация и название.

6. Размерность всех величин, используемых в рукописи, должна отвечать современным требованиям, а использованные символы (как и аббревиатуры) должны быть пояснены по мере их употребления в тексте.

7. При ссылке в тексте на численные значения, формулы и иные **фактические** данные, заимствованные из *книг*, следует (для удобства поиска) указывать не только саму книгу, но и страницу (например [2, с. 418]).

8. Список «Использованные источники» составляется в последовательности, соответствующей порядку ссылок в тексте. Желательно избегать ссылок на труднодоступные источники (например, на материалы конференций). Источники описываются на языке оригинала. Принятая в журнале полнота описания источников показана на сайте [tkea.wallst.ru](http://tkea.wallst.ru).

9. Сопроводите рукопись текстом библиографической карточки на русском и английском языках с аннотацией до 500 печ. знаков. Укажите ключевые слова, а также индекс рукописи по Универсальной десятичной классификации (УДК).

10. Материалы статьи направляйте по e-mail [<tkea@odessa.net>](mailto:tkea@odessa.net) (размер письма не должен превышать 1 Мб). Если Вы направляете рукопись по почте, приложите запись статьи на дискете.

Текст статьи набирается в текстовом редакторе Microsoft Word размером 12, без переносов, с интервалом не менее 1,5. Все слова внутри абзаца разделяются только одним пробелом. Правый край текста выравнивать не обязательно. **Крайне нежелательно** использование редактора Equation **при наборе текста** (он допустим только для набора сложных формул).

Общий объем иллюстраций не должен превышать объем текста. Иллюстрации должны быть представлены **отдельными файлами**. Графики и чертежи следует выполнять в **черно-белом (битовом) режиме**.

Если рисунки выполнялись в программе CorelDraw или Word, то необходимо представить оригинальные файлы, т. е. \*.cdr или \*.doc. Рисунки, созданные в других программных пакетах, необходимо экспортировать в любой из следующих форматов: PCX, JPG, TIF.

В случае когда автор не может обеспечить высокое качество рисунка в машинном виде, допускается его выполнение вручную с дальнейшим сканированием в битовом режиме с разрешением 300 ppi.

*Желательно представление двух вариантов каждого рисунка: с надписями и выносными линиями; без них.*

При подготовке цветных иллюстраций желательно фотографировать объекты на однотонном фоне. Сканирование фотографий необходимо выполнять с разрешением 300 ppi.

11. Снабдите рукопись публикуемыми сведениями об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, место работы), а также сообщите служебные и домашние адреса с указанием почтового индекса, сведения о должностном положении, e-mail, телефоны, телефаксы для связи, даты рождения.

12. Если есть ощущение, что могут возникнуть вопросы охраны государственной тайны, сопроводите статью экспертным заключением о возможности ее публикации в открытой печати.

# Е•Х•Р•О ELECTRONICA

8-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ  
ВЫСТАВКА ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ  
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

8th INTERNATIONAL EXHIBITION FOR ELECTRONIC  
COMPONENTS AND TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

## 5-8 АПРЕЛЯ / APRIL 2005

РОССИЯ, МОСКВА, СК "ОЛИМПИЙСКИЙ"  
OLIMPIYSKIY COMPLEX, MOSCOW, RUSSIA

Совместно с / Incorporating:

**electron**tech **expo**



При официальной поддержке / The official support:



Министерство промышленности и энергетики Российской Федерации  
Ministry of Industry and Energy of the Russian Federation  
Министерство экономического развития и торговли Российской Федерации  
Ministry of Economic Development and Trade of the Russian Federation  
Министерство информационных технологий и связи Российской Федерации  
Ministry of Information Technologies and Communications of the Russian Federation  
Правительство Москвы  
Moscow government

Информационные спонсоры / Information sponsors:



[www.expoelectronica.ru](http://www.expoelectronica.ru)

Пишите  
Подписывайтесь  
Читайте



Номер готовили Арзамас, Баку, Донецк,  
Дрогобыч, Киев, Львов, Москва, Одесса, Смена,  
Смоленск, Таганрог, Тамск, Харьков, Черновцы.