

# ТРА

## ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

- Одно и многоэлементные фотоприемники ( в т. ч. охлаждаемые)
- Фотоприемные устройства (фотоприемники с встроенной схемой предварительной обработки сигнала)
- Оптоэлектронные пары
- Гибридные печатные платы и оптические фильтры
- Фотометрические исследования и поверка фотометрических приборов



Украина  
58032, г. Черновцы  
ул. Голоцина, 246

Тел. (38-03722)4-26-13; 4-53-10  
Факс (38-03722)4-26-33  
E-mail: rbtm@chr.ukrpack.net

35 лет

на рынке полупроводниковых  
фотоприемников

# 4(58) 2005

ИЮЛЬ — АВГУСТ



# БЕСПРОВОДНЫЕ И МОБИЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

## MOBILE & WIRELESS TECHNOLOGIES

Международная конференция  
и выставка радиозлектронного  
оборудования и компонентов  
для систем связи и компью-  
терных технологий

Организатор:  
**INCONEX**  
International Conferences & Exhibition

INCONEX  
Тел.: (095) 102-59-13  
Факс: (095) 739-55-09  
e-mail: [electronica@list.ru](mailto:electronica@list.ru)  
[www.inconex.ru](http://www.inconex.ru)



# 22-24 ноября 2005

22-24 November 2005

Россия, Москва, Инфопространство  
InfoSpace, Moscow, Russia

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

### ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ



- Международная** Каталог периодических изданий Российской Федерации, стран СНГ и Балтийского региона. МК-PERIODICA. Индекс 71141.
- В Интернете** На сайте МК-PERIODICA ([www.periodicals.ru](http://www.periodicals.ru)). Индекс 71141.
- 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@presscentr.kiev.ua](mailto:info@presscentr.kiev.ua). Тел./факс +38 (044) 536-11-75, 536-11-80.
- По России** Отделения связи. Каталог «Газет и журналов». 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.
- По Белоруссии** Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ». Индексы 23785, 237852.
- 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, Л. М. Лейдерман,  
А. Н. Онищенко, М. С. Хлопова.

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

Журнал издается при поддержке  
Министерства промышленной  
политики Украины,  
НПП «Сатурн»,  
ЗАО «Укрналит»,  
Компании «Сатурн Дейта  
Интернешнл»  
(г. Киев),  
НПП «Карат» (г. Львов),  
СКБ «Молния»,  
Политехнического университета  
(г. Одесса),  
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)  
и других предприятий  
и организаций

Подписано к печати 15.08 2005 г. Формат 60x84 1/8.  
Печать офсетная. Печ. л. 8,0. Уч.-изд. л. 9,9. Тираж 500 экз. Заказ № 30.  
Издательство «Нептун-Технология»  
(65005, г. Одесса, ул. Прохоровская, 45).  
Отпечатано в типографии издательства «ГЭС»  
(65012, г. Одесса, ул. Канатная, 81/2).

ТЕХНОЛОГИЯ  
И  
КОНСТРУИРОВАНИЕ  
В  
ЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЕ

2005 № 4 (58)

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. В. Н. Годованюк  
К.т.н. А. А. Дашковский  
Д.т.н. Л. С. Лутченков  
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  
Д.ф.-м.н. А. Е. Беляев,  
зам. гл. редактора  
К.т.н. Э. Н. Глушеченко,  
зам. гл. редактора  
Д.т.н. В. Т. Дейнега  
Д.ф.-м.н. В. А. Дроздов  
К.т.н. И. Н. Еримичой,  
зам. гл. редактора  
К.т.н. А. А. Ефименко,  
ответственный секретарь  
Д.ф.-м.н. Г. П. Ковтун  
Л. М. Лейдерман  
К.т.н. И. Л. Михеева  
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. 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

Быстрее, лучше, дешевле (выставка «Электроника-2004», г. Мюнхен). В. Д. Вернер, А. А. Ковалев, А. А. Резнев, А. Н. Саудов, Ю. А. Чаплыгин 3

Электронные средства: исследования, разработки

Исследование анизотропных оптикотермоэлементов в случае различных оптических и тепловых режимов. А. А. Ащеулов, И. В. Гуцул 10  
Классификация и синтез полиномиальных кодеков в системах автоматизированной обработки данных. И. В. Иванова 19  
Трендовые статистики при обработке данных в системах технической диагностики. В. Ф. Миргород, Г. С. Ранченко 24

Энергетическая электроника

Моделирование термоэлектрической системы генерирования тепловой и электрической энергии. В. Я. Михайловский, Л. Т. Струтинская, Е. В. Чайковская 27

Сенсоэлектроника. Датчики

Дистанционный оптико-электронный датчик с растровой решеткой. И. А. Иванченко, В. И. Сантоний, Л. М. Будиянская 31

Функциональная микро- и нанoeлектроника

Емкостные свойства МДП-структур HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, Н. А. Кульчицкий 35  
Детекторы оптического сигнала на основе структур Au-nSi-Al, Au-nSi. Д. М. Ёдгорова, Э. Н. Якубов 39

Обеспечение тепловых режимов

Теплоотводящая поверхность с пластинчато-просечным оребрением при низкоскоростном обдуве. Е. Н. Письменный, В. А. Рогачев, А. В. Баранюк, Е. В. Цвященко 43

Технологические процессы и оборудование

Получение наноструктурированных пленок AlN и ZnO и их применение в электронной технике. А. Ф. Белянин, М. И. Самойлович, К. А. Ковальский, К. Ю. Петухов 46  
Технология получения пленок силицида палладия для мощных диодов Шоттки. Л. П. Ануфриев, В. В. Баранов, Я. А. Соловьев, М. В. Тарасиков 55  
Аналитические электронные весы с цифроаналоговым каналом компенсации. А. Ю. Литинский, А. Н. Рудякова, В. Г. Пицюга 57

Материалы электроники

Способ электродугового восстановления кремния. О. В. Соловьев, Б. П. Масенко, И. А. Хлопенова 60  
Исследование воспроизводимости электрофизических параметров толстопленочных структур "RuO<sub>2</sub>-стекло". Ш. Д. Курмашев, Н. Н. Садова, Т. И. Лавренова, Т. Н. Бугаева 62

Библиография

Новые книги 23, 42  
В портфеле редакции 23

Выставки. Конференции

26, 34, 42, 54, 59, 2-я, 3-я, 4-я стр. обл.

2005 № 4 (58)

ТЕХНОЛОГІЯ  
ТА  
КОНСТРУЮВАННЯ  
В  
ЕЛЕКТРОННІЙ  
АПАРАТУРІ  
(російською мовою)

### ЗМІСТ

#### Технічна політика

Швидше, краще, дешевше (виставка "Електроніка-2004", м. Мюнхен). *В. Д. Вернер, А. А. Ковальов, О. О. Резнев, О. М. Сауров, Ю. О. Чаплигін* (3)

#### Електронні засоби: дослідження, розробки

Дослідження анізотропних оптикотермоелементів у випадку різних оптичних та теплових режимів. *А. А. Ащеулов, І. В. Гуцул* (10)

Класифікація та синтез поліноміальних кодеків в системах автоматизованої обробки даних. *І. В. Іванова* (19)

Трендові статистики при обробці даних в системах технічної діагностики. *В. Ф. Міргород, Г. С. Ранченко* (24)

#### Енергетична електроніка

Моделювання термоелектричної системи генерування теплової та електричної енергії. *В. Я. Михайловський, Л. Т. Струтинська, О. В. Чайковська* (27)

#### Сенсоелектроніка. Датчики

Дистанційний оптико-електронний датчик з растровою решіткою. *І. О. Іванченко, В. І. Сантоній, Л. М. Будіянська* (31)

#### Функціональна мікро- та наноелектроніка

Ємнісні властивості МДН-структур HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. *О. В. Войцеховський, С. М. Несмелов, М. О. Кульчицький* (35)

Детектори оптичного сигналу на основі структур Au-nSi-Al, Au-nSi. *Д. М. Йодгорова, Е. Н. Якубов* (39)

#### Забезпечення теплових режимів

Тепловідводяча поверхня з пластинчато-просічним орєбренням при низькошвидкісному обдуві. *Є. М. Письменний, В. А. Рогачов, О. В. Баранюк, Є. В. Цвященко* (43)

#### Технологічні процеси та обладнання

Отримання наноструктурованих плівок AlN та ZnO та їх застосування в електронній техніці. *А. Ф. Белянін, М. І. Самойлович, К. А. Ковальський, К. Ю. Петухов* (46)

Технологія отримання плівок силіциду паладію для потужних діодів Шоткі. *Л. П. Ануфрієв, В. В. Баранов, Я. О. Соловійов, М. В. Тарасиков* (55)

Аналітичні електронні ваги з цифроаналоговим каналом компенсації. *А. Ю. Липінський, А. Н. Рудякова, В. Г. Пичюга* (57)

#### Матеріали електроніки

Спосіб електродугового відновлення кремнію. *О. В. Соловійов, Б. П. Масенко, І. А. Хлопенова* (60)

Дослідження відтворюваності електрофізичних параметрів товстопліткових структур "RuO<sub>2</sub>—скло". *Ш. Д. Курмашев, Н. М. Садова, Т. І. Лавренова, Т. М. Бугаєва* (62)

### CONTENT

#### Technical polytic

Faster, better, is cheaper (exhibition "Electronics-2004", Munich). *Verner V. D., Kovaljov A. A., Reznev A. A., Saurov A. N., Chaplygin Yu. A.* (3)

#### Electronic means: investigations, development

Research of anisotropic opticothermoelements in case of various optical and thermal modes. *A. A. Ascheulov, I. V. Gutsul* (10)

Classification and synthesis of polynomial codecs in systems of the automated data. *Ivanova I. V.* (19)

Trend statistics at data processing in technical diagnostics. *Mirgorod V. F., Ranchenko G. S.* (24)

#### The power electronics

Simulation of thermoelectric heat and electric power generation system. *Mikhailovsky V. Ya., Strutynska L. T., Chaikovska O. V.* (27)

#### The sensoelectronics. Sensors

Distant opto-electronic sensor with a raster grate. *Ivanchenko I. A., Santonij V. I., Budijanskaja L. M.* (31)

#### The functional micro- and nanoelectronics

The capacitance properties of MIS-structures HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. *Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Kulchitskii N. A.* (35)

Detectors of optical signal on the basis of Au-nSi-Al and Au-nSi. *Yodgorova D. M., Yakubov E. N.* (39)

#### Ensuring of thermal modes

Thermal efficiency of with plate-cut fins in conditions low speed to blow. *Pismenniy E. N., Rogachev V. A., Baranjuk A. V., Tsvyachenko E. V.* (43)

#### Technological processes and development

Obtaining nanostructural of films AlN and ZnO and their application in electronics. *Belyanin A. F., Samoylovich M. I., Kovalsky K. A., Petukhov K. Yu.* (46)

Palladium silicide films technology for power Schottky diodes. *Anufriev L. P., Baranov V. V., Solovjov J. A., Tarasikov M. V.* (55)

Analytical electronic weights with a digital-to-analog compensation channel. *Lipinskii A. Y., Rudiakova A. N., Pichuga V. G.* (57)

#### Materials of electronics

Method of electric arc reduction of silicon. *Solovjov O. V., Masenko B. P., Khlopenova I. A.* (60)

Research of reproduction of electrophysical parameters of the thick-layers RuO<sub>2</sub>—glass structures. *Kurmashev Sh. D., Sadova N. N., Lavrenova T. I., Bugayeva T. N.* (62)

Д. ф.-м. н. В. Д. ВЕРНЕР, к. т. н. А. А. КОВАЛЕВ, д. т. н. А. А. РЕЗНЕВ,  
д. т. н. А. Н. САУРОВ, д. т. н. Ю. А. ЧАПЛЫГИН

Россия, Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Перепечатано из журнала  
"Известия вузов. Электроника",  
№ 3'2005

## БЫСТРЕЕ, ЛУЧШЕ, ДЕШЕВЛЕ (ВЫСТАВКА «ЭЛЕКТРОНИКА-2004», г. МЮНХЕН)

*На основе анализа экспозиции выставки «Электроника-2004» (г. Мюнхен) рассмотрены тенденции развития электроники в настоящее время и в обозримом будущем.*

Международная выставка «Электроника» является одной из крупнейших в мире и дает представление об основных результатах и тенденциях развития электроники в мире на момент ее проведения [1]. Высокий авторитет этой выставки подтверждается успехом региональных выставок того же наименования («Электроника–Америка», «Электроника–Китай», «Электроника–Индия») [2]. Значимость выставки связана с широким участием в ней производителей изделий электронной техники (ИЭТ), а также большим спектром сопровождающих выставку мероприятий: конференций, семинаров, подиумов и т. д. Таким образом, посетитель выставки получает обширную информацию о мировой электронике. По оценке организаторов 91% посетителей имели возможность подробно ознакомиться с необходимой информацией, 20% — будут использовать полученную информацию для организации собственной деятельности по производству ИЭТ.

В работе выставки (9—12 ноября 2004 г.) приняли участие 3574 фирмы, в том числе 1401 из Германии и 1719 из 48 стран мира (373 — Тайвань, 328 — США, 197 — Китай, 82 — Япония, 60 — Индия, 9 — Россия, 9 — Венгрия и т. д.). Доля иностранных участников выросла с 32% в 2002 г. до 42% в 2004 г. Из 9 российских участников 5 являются изготовителями электронных компонентов, а 4 представляли сервисные направления: дистрибьюторы, издательские дома и выставочный бизнес. Но появление на «Электронике-2004» группы российских фирм, а не отдельных представителей, как это было на прошлых выставках, организаторы считают положительным фактом, свидетельствующим о развитии производства и рынка ИЭТ в России. Выставка проводилась по 12 направлениям в 14 павильонах. Наибольшее число фирм участвовали в следующих направлениях: полупроводниковые приборы — 537, пассивные элементы — 635, платы — 234, дисплеи — 196, сенсоры — 128. Непосредственно в области микроэлектромеханических систем (МЭМС) было представлено 15 фирм.

Основное отличие выставки 2004 г. от выставки 2002 г. состоит в том, что она проводилась на фоне максимума подъема продаж. Как известно, при циклическом развитии мирового рынка электроники следует ожидать последующего его спада. Эта проблема обсуждается большинством аналитических фирм.

Различия в терминологии этих фирм затрудняют анализ их статистики (электронные компоненты, электронные элементы, полупроводниковые приборы, кристаллы), но тенденции развития на качественном уровне совпадают. В качестве «опорной точки» был взят анализ фирмы iSuppli Corp., который дополнялся данными SIA, WTS, Gartner Corp. Следует добавить, что ранние и более поздние прогнозы могут существенно колебаться у одной и той же фирмы. По данным iSuppli Corp. падение продаж полупроводниковых приборов в 2001 г. составило 31,7% по сравнению с 2000 г. В 2002 г. наблюдался слабый рост на 1,5% и общий объем продаж составил 156 млрд. долл. США. Эти данные были получены на базе 100 полупроводниковых компаний. Основная доля продаж (78%) при этом падает на 30 ведущих компаний. Максимальный объем продаж в 2003 г. (27,03 млрд. долл.) имеет Intel (2004 г. — 30,9 млрд. долл.). Общий объем продаж полупроводниковых приборов в 2003 г. оценивался в 182 млрд. долл. (объем продаж ИЭТ — 1,06 трилл. долл.), в 2004 г. — 213 млрд. долл., т. е. рост составил 24%. Общий объем продаж ИЭТ вырос на 10% и достигает 1,16 трилл. долл. Объем продаж полупроводниковых приборов рос в течение всего 2004 г. (52,8; 54,7 млрд. в I кв. и II кв. и 58; 61 млрд. в III кв. и IV кв.). Предполагается, что в 2005 г. темп роста продаж будет снижаться до 11,8% (253,3 млрд. долл.), в 2006 г. будет +0,1% (253,4 млрд. долл.), а в 2007 г. начнется рост или стабилизация рынка +9,2% (276,6 млрд. долл.) и в 2008 г. +10,4% (305,4 млрд. долл.). Несмотря на такое снижение темпов, 85% посетителей и участников выставки оценивают перспективы рынка электроники хорошими (**таблица**).

Все аналитики считают, что в этот раз не будет обвала рынка, как это произошло в 2001 г. Однако опасения у производителей остаются, что сказывается в осторожности ввода новых мощностей. Загрузка существующих мощностей оценивается в 2003 г. на уровне 90,9% и в 2004 г. — 93,5%. Считают, что для снятия напряжения спроса необходимо ввести 5—10 заводов по производству на 300 мм пластинах. Ста-

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА

*Прогноз годового роста продаж (в %)*

Фирма	Год					
	2003	2004	2005	2006	2007	2008
iSuppli Corp.	16,6	24,4	11,8 (4,7)	0,1	9,2	10,4
SIA	20	28,6				
WTS		28,4	8,5	0,7	9,3	
Gartner		25	15			
WSTS			1,2	3,0	6,0	

тистика планируемого роста этого производства разных аналитических фирм существенно различается. Для определенности остановимся на прогнозе iSuppli: 11 новых заводов в 2004 г., 16 заводов в 2005 г. и последующий спад к 2007 г. Реально в 2003 г. только 4 фирмы ввели новое производство на 300 мм пластинах (Micron, Sony, SMIC, Texas Instruments). В результате вместо ожидаемого соотношения производств на 200 и 300 мм пластинах — 50:50 фактически оно составляет 60:40. В настоящее время 2/3 производства на 300 мм пластинах сосредоточено в Азии. Вместе с тем считают, что если темп роста числа транзисторов на кристалле сохранится (54% в год), то к 2012 г. производство должно перейти на 450 мм пластины. Рынок кремниевых пластин в 2004 г. вырос на 10,9% (7,34 млрд. долл.). В 2005 г. ожидается дальнейший рост на 12% (8,22 млрд. долл.). При этом в 2004 г. отмечался существенный рост продаж оборудования для полупроводникового производства (64% Gartner Inc.). 50% продаж произведено в Юго-Восточной Азии (рост 108%).

Выставка — это форум изготовителей и потребителей ИЭТ. Предполагается, что они должны понимать друг друга. Формированию общепринятой терминологии способствуют аналитические издания различных так называемых «дорожных карт» (Roadmap). В качестве примера можно назвать ITRS — ежегодные издания по микроэлектронике [3]. Для потребителя нужно знать, какие характеристики будут иметь новые ИС, какая у них будет цена и когда они будут доступны на рынке. Для изготовителя важно знать, какие технологии и в какие сроки он должен освоить, чтобы не отстать от конкурентов. Большое значение здесь имеет выявление тенденций изменения различных характеристик ИС и их технологий от времени. Наиболее ярким примером может служить закон Мура, который действует в течение более 40 лет. Закон Мура позволяет предсказать удвоение функциональных характеристик (например, числа бит или транзисторов на кристалле) за определенный промежуток времени (1,5 — 3 года). Специалисты Интел считают, что закон Мура будет действовать еще 10 лет. Все эти тенденции должны быть для потребителя ИЭТ пересчитаны в цены, например уменьшение цены транзистора в кристалле или цены одного вывода готового корпуса ИС. Например, цена транзистора в ИС за 30 лет упала в миллион раз. Для потребителя ИЭТ законом являются тенденции своего рынка. Если цена на функцию мобильного телефона в среднем падает на 29% в год, то их изготовитель ждет такого же уменьшения цены от поставщика ИС. Для изготовителя ИС указанные тенденции — производные. Из-

готовитель должен знать, когда нужно освоить новые технологические процессы проектирования, литографии, тестирования или производства на пластинах большего диаметра. Учитывая постоянно растущие цены на технологическое и измерительное оборудование, ему необходимо сбалансировать свои возможности и темпы развития рынка. Для этого он должен иметь возможность оценить тенденции развития технологии ИС на базе какого-то обобщающего параметра. По предложению IRTS в качестве такого параметра принята так называемая «узловая точка» (node). Это минимальное значение половины ширины и зазора металлизации в структуре транзистора ИС ОЗУ. Для микропроцессора эти параметры пересчитываются в литографическую/физическую длину затвора. Она приблизительно в 2 раза меньше значения узловой точки. С некоторыми вариациями последовательность уменьшения значений узловых точек (для ОЗУ) формулируется в виде: (90, 65, 45, 32, 22, 18 ...) нм, т. е. происходит уменьшение значений в 0,7 раз на одно поколение или в 0,5 раз за два поколения. Соответственно физическая длина затвора (37, 25, 18, 13, 9, 7...) нм. Важнейшей информацией при этом является темп смены поколений узловых точек. До последнего времени это было 2 года, сейчас есть основания считать, что срок смены увеличивается до 3 лет. На этой базе строится прогноз дальнейшего уменьшения значений узловых точек. Глубина прогноза должна быть не менее 15 лет. Отметим некоторые временные позиции узловых точек по ITRS-2003: 2004 г. — 90 нм, 2007 г. — 65 нм, 2010 г. — 45 нм, 2013 г. — 32 нм, 2016 г. — 22 нм, 2018 г. — 18 нм.

Само понимание достижения определенного уровня производства тоже должно быть формализовано так, чтобы сообщение отдельных фирм о достигнутом не противоречило прогнозу развития микроэлектронной промышленности в целом. К примеру, можно считать, что стадия «производство» начинается только после того, как первая фирма, а через 3 месяца — вторая выходят на уровень производства 10 К кристаллов в месяц. Для промышленного выпуска должно обрабатываться не менее 20 К пластин диаметром 300 мм. Для ОЗУ с площадью кристалла ~140 мм<sup>2</sup> это означает выпуск 6 М штук ИС в месяц. Следует отметить, что производство новой коммерческой генерации ИС охватывает период действия двух узловых и в течение 2—3 лет может составить до половины общего рынка, например ОЗУ. При этом на рынке одновременно присутствуют генерации, находящиеся в разных стадиях жизненного цикла. Так, в 2003 г. 4 Гб ОЗУ находились в стадии «введения», 1 Гб на стадии растущего производства, 512, 256, 128 и 64 Мб на различных участках массового производства кривой жизненного цикла.

Таким образом, необходимые темпы развития известны всем. Следующая проблема связана с путями преодоления трудностей при переходе к новым значениям узловых точек. Появились так называемые неклассические КМОП и технологические ускорители (напряженный кремний, ультратонкие КНИ, металлические затворы, структуры с двойным-тройным и объемным затвором и т. д.). Предлагаются альтер-

нативные 3У для замены классических кремниевых, например основанные на магнитных эффектах. Исследуются новые типы логической и информационной архитектуры. Ситуация тем более обостряется, что новые сектора рынка, например ИС для устройств бытовой техники, связаны с необходимостью сочетания цифровых и логических элементов. Потребность в новых и все более дорогих исследованиях непрерывно растет. Только часть результатов этих исследований может быть использована в производстве. По этой причине расширяется практика, начавшаяся более 20 лет назад, создания различных объединений, консорциумов и т. п. для совместного решения назревших проблем, в частности, возникающих на переходе к 45 нм.

Прежде всего, это материаловедческие проблемы замены подзатворного и изолирующего диэлектриков для медной металлизации. ITRS считает, что этот переход должен произойти к 2010 г. Фирмы Texas Instruments, Intel, AMD предполагают, что они преодолеют этот рубеж к 2007 г. Соответственно преодоление 22 нм ожидается к 2010—2012 гг. В любом случае традиционные материалы для транзисторных и конденсаторных структур Si—SiO<sub>2</sub> и поли-Si исчерпали свои возможности при переходе уже на 65 нм. В связи с этим считают, что наступила эра ограниченного материалами масштабирования. Предлагаются различные замены материалов элементов транзистора (например, силициды Hf, Ni и др.). При этом они могут быть разными для *n*- и *p*-транзисторов КМОП-структуры и различаться для низковольтных и высоковольтных приборов. Европа старается сохранить свое положение одного из ведущих регионов в области электроники. Например, проблему диэлектрика и затвора для 45 нм намерен решить Европейский альянс на базе LETI, NanoCMOS-проект (Франция). Другую проблему, связанную с фотолитографией для таких структур, будет разрабатывать альянс на базе IMEC (Бельгия). При переходе к 30—10 нм проектным нормам необходимо будет решить ряд принципиальных вопросов — это нагрев структур и возрастание токов утечки, необходимость снижения потребляемой энергии при росте тактовой частоты. Решение ищут в новой архитектуре ИС (например, многоядерный принцип для микропроцессоров), а также в управлении потреблением питания (выключение незадействованных ячеек). Сокращая сроки освоения нового поколения изделий, этапы исследования, проектирования и производства стараются вести параллельно. И, как следствие, передовыми фирмами (например, ST Microelectronics) осознана необходимость объединения в одном месте проведения НИОКР, создания пилотных образцов и развертывания массового производства. Следует отметить, что этот принцип много лет назад был положен в основу создания микроэлектронной промышленности СССР.

Чем меньше критический размер элементов ИС, тем ближе область, в которой начинают сказываться фундаментальные ограничения работоспособности КМОП-структуры. Разные специалисты называют разные минимальные размеры физической длины затвора: 5, 4 и 1,5 нм. К таким размерам должны по-

дойти к 2017—2020 гг. и тогда закончится эра классического транзистора. Поэтому к 2010 г. основные производители ИС должны уже иметь ориентиры новой элементной базы электроники. Как промежуточное решение рассматривается транзистор с нанотрубками (2014—2015 гг.). Однако, по мнению Г. Мура, пока не ясно, как соединить миллиарды нанотрубок в микросхеме. Фирма Fujitsu намерена использовать углеродные нанотрубки диаметром 5—10 нм для межсоединений вместо меди (проводимость в 1000 раз больше) при переходе к 45 нм технологии в 2010 г. На экспериментальных образцах было получено 10000 соединений. При освоении новых технологий необходимы существенные затраты на НИОКР, нужно новое поколение технологического оборудования (стоимость завода производства на 300 мм пластине — 3 млрд. долл., она удваивается каждые 4 года). Рост комплексности структур на кристалле требует новую методологию проектирования. Даже при уже отработанной САПР переход к следующей генерации связан с необходимостью создания комплекта фотошаблонов стоимостью до миллиона долл. Само проектирование требует от 1 до 100 млн. долл. Конкретное решение по проблемам каждой фирмы или уже более узкой группы фирм должно обеспечить преимущество в конкуренции на рынке перед другими участниками научно-исследовательских объединений. Поэтому на выставке «Электроника» фирмы представляют не только разработки, но и концепцию развития своей продукции.

В связи с указанными обстоятельствами перейти к новым поколениям ИС могут только фирмы, обладающие «критической массой» финансов, оборудования, интеллектуальных и трудовых ресурсов. В результате постоянно возрастает минимальный коммерчески эффективный объем массового производства. В конечном итоге область современной микроэлектроники становится ареной соперничества только технологических промышленных гигантов.

Эволюция рынка электроники все в большей степени носит региональный характер. В 2002 г. рост капитальных вложений в микроэлектронику Юго-Восточной Азии составлял 62%, в Европе — 8%. Одновременно менялся и региональный объем продаж ИС: 2001 г. — 29,9% (Азия) и 27,5% (США); 2003 г. — 39,9% (Азия) и 20,1% (США). Может показаться, что фирмы США теряют свои позиции мировых лидеров и лидерство смещается в Китай. Однако в 2002 г. фирмам США принадлежало 48,7% мировых продаж, при этом им принадлежало 51,2% продаж в Азии. Поэтому смещение производства в Азию (аутсорсинг) отнюдь не означает потерю лидерства фирмами США и Европы в области ИС.

Тенденция развития аутсорсинга (или «глобализации») производства служит одной из основных тем дискуссий различных изданий, приуроченных к времени проведения выставки. Движущей силой при этом является снижение себестоимости при переводе производства в страну с низкой оплатой труда и низкими налогами. Однако при передаче «ноу-хау» возникают трудности, связанные с более низкой производительностью труда и различием в технической

культуре. В результате западноевропейские фирмы стремятся перевести производство в Восточную Европу, например в Чехословакию — 50%, и только 23% — в Китай, 27% — в другие регионы, прежде всего в Латинскую Америку. Другим мощным фактором является закрепление фирм на новых, потенциально перспективных рынках. Самый перспективный рынок — китайский, который растет с темпом 14%, к 2010 г. должен достичь 459 млрд. долл. Эта цифра может и возрасти, так как, например, производство ИЭТ в 2005 г. должно достичь уровня 65 млрд. долл. (+135% к 2003 г.). Китай в 2003 г. экспортировал 65 видов электронных компонентов на 38 млрд. долл. (рост 26% к 2002 г.). Статистика, приводимая по Китаю, часто противоречива. Но в любом случае, 47% общего числа полупроводниковых приборов потребляется в Юго-Восточной Азии, из них треть — в Китае, на дочерних предприятиях иностранных фирм и в собственном производстве.

Огромное значение для полупроводниковой промышленности, которая остается наиболее быстроразвивающимся сектором индустрии, является гарантированный сбыт продукции. Один из значительных секторов потребления полупроводниковых приборов (24%) — производство электронной аппаратуры (ОЕМ). По данным iSuppli 160 крупнейших производителей аппаратуры потребляли в 2004 г. на 167,158 млрд. долл. кремниевых приборов. Почти половину этой суммы составляет потребление 10 ведущих фирм (76,306 млрд. долл.). Среди этих фирм на долю производителей средств вычислительной техники Hewlett-Packard и Dell приходится 14,482 и 13,442 млрд. долл., соответственно. Ожидаемый рост потребления в среднем +5%, у лидеров он выше (Hewlett-Packard — 11% и Dell — 16,1%). Фирмы контрактного производства ИЭТ покупают 13% всех чипов. Этот сектор быстро прогрессирует. Наибольший рост у азиатских EMS-фирм (Сервис Электронного Производства) — 20%, в Европе — 10%, в США существенного роста не предвидится. Значительными темпами растет и контрактное производство ИС — 45% в 2004 г. (16,7 млрд. долл.). Общую тенденцию поляризации рынка можно сформулировать так: массовое производство будет развиваться в азиатском регионе, прежде всего в Китае, малые серии и сложные электронные устройства — в Европе. США и Япония пока занимают срединную позицию.

Следует остановиться на конкурентной борьбе в различных секторах микроэлектроники. Один из «старых» конфликтов продолжает развиваться в области разделения сфер влияния между традиционными полужаказными ИС (ASIC) и программируемыми ИС. По данным iSuppli сектор ASIC (в основном на базе стандартных ячеек) растет, по крайней мере, с темпом +6%/год и к 2008 г. должен достичь 25 млрд. долл. Технологической основой этого сектора является производство в широком диапазоне проектных норм (от 0,25 мкм до 90 нм). Конкурирующее направление программируемых ИС (ПЛИС), в частности FPGA, в качестве главного аргумента против ASIC выдвигает высокую стоимость проектирования на базе ASIC. В результате по их оценкам

экономически целесообразным для ASIC является область с 600—800 тыс. ключей и выше. Проектирование ИС такого уровня занимает около 6 месяцев и стоит 15—20 млн. долл., комплект шаблонов — 1,1—1,3 млн. долл. Для амортизации этих затрат фирма должна выпустить продукцию на 400 млн. долл.

Необходимо учесть следующую статистику. Только одна из пяти разработок потребительских товаров, для которых создана ИС, выходит на рынок, и только один из десяти товаров выходит на серию порядка миллиона штук в год. Вместе с тем, ограничения FPGA, связанные с надежностью, быстродействием, числом актов перезаписи, не позволяют им занять абсолютно лидирующую позицию. Один из выходов видят в разработке так называемых структурированных sASIC, в которые включены как элементы, заданные маской (ASIC), так и программируемые элементы. Для них стоимость комплекта шаблонов снижается до 200—250 тыс. долл. и эффективный объем производства начинается с 10 тыс. шт. (для ASIC — с 250 тыс. шт.). Другой сектор рынка программируемых ИС — сектор флэш-памяти в 2003 г. достиг по данным Semico Research 11,3 млрд. долл. Более поздние прогнозы менее оптимистичны относительно спроса на ИС-флэш из-за их перепроизводства в 2004 г. Вместе с тем FPGA и ИС флэш-памяти уже испытывают трудности при масштабировании. Даже при 90 нм нормах возникают трудности с выходом годных из-за статистических вариаций параметров технологических процессов. Еще большие сложности возникают при 65 нм нормах. Появляется необходимость компенсировать эти отклонения на уровне структуры ИС. В связи с этим активно обсуждаются новые типы памяти, в которых традиционные электронные носители информации заменяются другими. Прежде всего это различные магнитные и другие нетрадиционные виды памяти. Они должны устранить недостатки существующих флэш- и динамических ИС памяти и позволить большее число перезаписи по сравнению с традиционными перепрограммируемыми ИС памяти. Считают, что новые типы памяти имеют пока только «нишевое» (специфическое) применение и их заметное появление на рынке ожидается в 2008—2010 гг.

В перспективном плане большое значение имеет расширение возможностей кремния как материала для создания приборов — источников света. Существует две проблемы: расширение спектрального диапазона от ультрафиолета до области ближнего инфракрасного диапазона (750—2500 нм) и увеличение интенсивности света, генерируемого источником света. О решении этих проблем упоминалось в [1]. Исследователи немецкого центра FZR за счет модификации Si ионным легированием получили излучение с длиной волны 1100 нм. С помощью микрорезонатора (силицид кобальта и чередующиеся слои Si и SiO<sub>2</sub>) удалось увеличить световой поток в 1000 раз. Идея микрорезонатора известна еще с 90-х гг., но реально осуществить ее удалось только сейчас.

Существенное внимание на выставке было уделено источникам питания. Рынок аккумуляторов и батарей оценивается на уровне 6 млрд. долл. 60—70% его составляют ионно-литиевые источники. Значительная их

часть изготавливается в Китае (в 2003 г. на 2,96 млрд. долл.), половина из них поставляется в США и Европу. Плотность энергии современной батареи уже равна приблизительно 1/3 энергии соответствующего куска динамита. Цена и недостаточная длительность работы батареи заставляют искать альтернативные источники, например топливные элементы на базе газовых или жидких веществ. Однако пока они не могут быть использованы в носимых электронных приборах (минимальный топливный элемент 42×80×13 мм, 104 г). Недавно фирма Georgia Tech анонсировала микрогенератор диаметром 10 мм, изготовленный с использованием МЭМС-технологии и способный развивать мощность 1,1 Вт. Проектируется довести мощность генератора до 20—50 Вт. Такие генераторы увеличат срок службы источников энергии носимых приборов в 10 раз по сравнению с батареями. Носимые электронные приборы дают существенный вклад в развитие миниатюризации элементной базы и уменьшения потребления энергии на единичную функцию. Так, сотовый телефон становится пакетным медиacentром, в котором есть цифровая камера, Интернет-браузер, ТВ-усилитель, MP3 DVD-плеер и т. д. Поэтому каждый элемент должен быть с минимальными весогабаритными характеристиками и потребляемой мощностью. «Самый малый в мире», «самый тонкий» — эти эпитеты часто сопровождают рекламу новых изделий (например, Epson так рекламирует свой гироскопический сенсор с размерами 5,0×3×2×1,3 мм). Эти же требования существуют для имплантируемых медицинских приборов и протезов. Для имплантации в глаз необходимо снижение мощности современных микропроцессоров в 1000 раз, и оно, как предполагается, будет достигнуто за 10 лет [4]. Автор [4] считает возможным полное решение задачи восстановления зрения за счет имплантированной электроники в течение 20 лет. В разрабатываемых проектах внутриглазная электроника контактирует с внешней электроникой на «очках» с помощью беспроводной связи.

Тематика беспроводной связи (БПС) была широко представлена на выставке и специальной конференции. Существенным сектором БПС стало ее применение в области бесконтактного считывания (RFID) со смарт-карт, интеллектуальность которых непрерывно растет за счет перехода к высокоразрядной архитектуре (32 и 64 разряда) и увеличения объема памяти до 128—256 Мбайт. По данным фирмы Frost&Sullivan нынешний рынок карт находится на уровне 1,4 млрд. долл. Следует отметить, что 37,1% карт и 47,3% чипов для них производит немецкая фирма Infineon. БПС используется в глобальных, региональных и локальных сетях. Последним уделяется особое внимание. Помимо традиционных CAN и Bluetooth активно развиваются новые сетевые стандарты широкополосные и высокочастотные: UWB, Zigbee, nanoNet, WiMAX, LIN, FlexRay, MOST и т. д. Они позволяют передавать информацию с большей скоростью и на большие расстояния. Информационное сетевое взаимодействие технических устройств становится все более актуальным. Это направление межмашинного информационного обмена обозначено аббревиатурой

«M2M». По данным фирмы Forrester Research только число SMS-сообщений между машинами к 2005 г. сравняется с числом SMS между людьми: в 2004 г. их было в мире 20 млрд., а к 2010 г. их число увеличится в 30 раз. В свою очередь, это означает дальнейшее развитие встроенных систем и скрытой (hidder) электроники. Тематика развития встроенных систем была представлена разделом на выставке и конференцией. Следует отметить, что в связи с необходимостью сокращения сроков разработки новых аппаратных устройств встроенных систем все большее значение получает встраиваемое программное обеспечение. По данным фирмы VDC в IV квартале рынок этого продукта достиг 1 млрд. долл. и растет с темпом 6,8% до 2006 г.

Значительная роль программному продукту отводится в обеспечении сбоеустойчивых электронных систем автомобилей. Автоэлектроника остается одним из важнейших секторов мировой электроники. Как уже указывалось [1], стоимость электронных блоков уже определяет 25%, а к 2010 г. — 40% стоимости автомобиля. Значительную долю этих блоков составляют системы безопасности. Общая стоимость произведенных систем безопасности в 2003 г. составляла 48 млрд. долл. и к 2010 г. вырастет до 62 млрд. долл. При этом темп роста продаж пассивных средств безопасности в год 4,3%, а активных — 14%. Насыщенность автомобиля электронными средствами (в среднем автомобиле около 50 различных электронных блоков со средним числом компонентов — 300) потребовала особых мер в обеспечении их сбоеустойчивости. При дефектности 1 ppm (1 на миллион) на компонент 1,5% автомобилей будут с дефектами электроники. Для гарантии общей дефектности на уровне 0,05% компоненты должны иметь дефектность 1 ppm (1 на миллиард). Для обеспечения необходимой сбоеустойчивости автоэлектроники разработана специальная европейская программа «Autosar». Фирмы Крайслер, Форд и Дженерал Электрик образовали специальный совет по сертификации электронных компонентов. Роль электроники в автомобиле возрастает в связи с широким внедрением круиз-контроля. К 2005 г. 1/3 военного транспорта США должна быть обеспечена такими системами. Автомобилем ближайшего будущего будут управлять на базе автоматизированного обобщения информации о состоянии собственных систем, окружающей обстановки и общения с соседним автотранспортом [5]. Сейчас в автомобиле вычислительной техники больше, чем в среднем университете 80-х гг. С учетом замены гидравлических и механических систем автомобиля на электромеханические (Drive-by-Wire) роль электроники еще более возрастает [1]. Создается (прежде всего в военной области) полностью автоматизированный транспорт. Говорят, что автомобиль становится суперкомпьютером на колесах. В связи с этим возникает новый сектор оборудования для тестирования электроники автомобиля.

Постоянно растущим сектором рынка электроники является бытовая техника («товары народного потребления» — ТНП в терминологии советских времен). По данным фирмы Gartner объем продаж «потреби-

тельской» электроники достигает 34 млрд. долл./год. Во всех случаях настоящее развитие бытовой техники связано с массовым производством. При этом важна скорость изменения поколений техники. Темп появления новых моделей электронных изделий постоянно увеличивается. Практически необходимо обновлять модельный ряд ежегодно. Это требует сокращения времени между созданием прототипа и массовым производством. Комплекующие микроэлектронные изделия должны все больше походить на конечный продукт. Именно в этом смысл перехода от простых СБИС к комплексным системам на кристалле (СНК-SoC). Разработка каждой новой генерации СНК требует существенных затрат, которые окупаются только при массовом производстве, а для него нужен массовый потребитель. Следовательно, необходимо расширять области применения микроэлектроники в конечной продукции. Во-первых, нужно насыщать электроникой уже существующие сектора рынка. Выше говорилось о тенденции роста цены электроники в автомобиле. В товарах народного потребления эти цифры, в среднем, составляли 6—7% несколько лет назад, сейчас — 20%, в перспективе — 40%. Во-вторых — диверсифицировать сектора этого рынка за счет новых возможностей ИЭТ. Например, развивать многофункциональные мобильные телефоны, средства индивидуального транспорта и т. д. При этом возникает проблема обеспечения новой продукцией массового рынка. Как уже отмечалось, создание новых СНК требует значительных затрат. Но в СНК помимо традиционной для микроэлектроники аппаратной составляющей (hardware) уже присутствует программная составляющая (software). Поэтому «подстройку» под требования новых заказчиков можно осуществлять за счет программной составляющей СНК. Например, в разрабатывающих подразделениях фирмы STM уже сейчас 50% занимают работы по программному обеспечению СНК. Развивая эту тенденцию, формируют задачу более полного перехода от локальной СНК к системе конечного продукта. Эволюция в этом направлении уже началась. Возрастает стратегический вес микроэлектронного производства в развитии всех секторов рынка, связанных с ИЭТ. Ускорению этого процесса будет способствовать появление крупных объединений проектировщиков и изготовителей СНК. Примером может служить планируемый альянс между Тайваньским СНК Консорциумом и Индийской Полупроводниковой Ассоциацией (ISA).

Таким образом, в эру СНК микроэлектроника предлагает своим потребителям — изготовителям аппаратуры и систем — путь наиболее быстрого и эффективного расширения рынка их изделий за счет дальнейшего увеличения степени интеграции в аппаратной и программной компонентах СНК. В этом направлении вполне возможно и расширение российского внутреннего рынка. Несмотря на узость его полупроводниковой составляющей (1,6 млрд. долл.), объем общего рынка ИЭТ в России около 20 млрд. долл., а в СНГ в целом — 30 млрд. долл. [8]. За счет деятельности центров проектирования (fables), изготовления фотошаблонов («маск-шоп»), отечествен-

ного малосерийного и заказного зарубежного массового производства (foundry) ИС и СНК могут быть удовлетворены потребности российских изготовителей аппаратуры различного применения.

Во избежание повторения глубокого провала рынка электроники в 2002 г. необходим постоянный приток инноваций, который нельзя обеспечить без проведения НИОКР (R&D). Электронные предприятия в среднем расходуют на них 10—15% оборотных средств. В [4] приводится перечень 100 фирм мира, вложивших максимальные средства в НИОКР в 2003 г. Он учитывает абсолютный уровень затрат, рост по отношению к 2002 г., долю затрат на НИОКР в обороте и удельную сумму НИОКР на одного работающего. На первом месте (в 2002 г. — десятое место) Microsoft Corp. с вложением 7,779 млрд. долл. в 2003 г. (рост +17%), долей расходов на НИОКР — 21,1% и объемом затрат на одного работающего — 141 тыс. долл. Intel находится на четырнадцатом месте в этом списке с показателями соответственно 4,360 млрд. долл. (рост +8,1%), долей расходов на НИОКР 14,5% и объемом затрат на одного работающего 55 тыс. долл. Мы привели эти цифры для того, чтобы была понятна трудность конкуренции российских инноваций на мировом уровне в области электроники при существенно меньшем финансировании НИОКР. К сожалению, следует отметить, что пока российский вклад в мировой рынок высоких технологий составляет 0,5% [6].

Наибольшая вероятность конкурентного выхода на рынок, очевидно, существует для новых направлений высоких технологий, например в микросистемной технике (МСТ). О перспективности этого направления говорилось много раз [7]. Проблема трансферта технологии микроэлектроники в МСТ становится актуальной и для западных полупроводниковых фирм из-за усиления конкуренции [8]. Западные аналитики рынка, например фирма WTC, считают эту область перспективной для западных малых и средних фирм. Вероятно, к этой категории следует отнести и российских производителей МСТ. Общие тенденции развития МСТ, отраженные на выставке 2004 г., мало изменились по сравнению с 2002 г. Пожалуй, наибольший интерес представляют работы в области сенсорных распределенных систем (сетей), в том числе с элементами самоорганизации. В этом направлении работает Siemens и группа европейских институтов и фирм, объединенных проектом Scatterweb. В отличие от родоначальника этого направления — американского проекта «Умная пыль» с активной единицей объемом порядка 1 мм<sup>3</sup>, европейские исследователи не ставят задачу минимизации объема активной ячейки, а направляют усилия на решение проблем самоорганизации сети и увеличения расстояния передачи информации до нескольких километров. Благодаря отсутствию требования минимизации размера ячейки возможна коммуникация не на базе оптической (лазерной) системы, а на основе систем беспроводной (радио) связи. По такому же пути пошла американская фирма Crossbow — лидер в области беспроводных сетей для датчиков. В области технологии МСТ следует отметить дальнейшую активность в развитии методов сборки и корпусирования МСТ, в

том числе на базе клеевых соединений и гибких носителей, а также успех IMEC в создании гироскопической системы на основе поверхностной микрообработки. Использование поли-SiGe для интеграции МЭМС с КМОП-электроникой давно пропагандируется этим институтом. В отличие от поли-Si технологии с температурами более 800°C, применение поли-SiGe позволяет снизить температурный интервал до 450—520°C. В результате МЭМС можно формировать поверх КМОП-структур. Совместно с фирмами Bosch и ASM в IMEC был изготовлен гироскоп на основе SiGe слоя толщиной 10 мкм, расположенный поверх стандартной КМОП-структуры с 5 уровнями металлизации.

Но не только техническое содержание инноваций позволяет быстро продвигать разработку на рынок. Огромную роль играет человеческий фактор, а конкретно — роль инженера в развитии и продвижении инновационных идей. Этому был посвящен специальный форум на «Электронике-2004» — Job Forum — «Semiconductor Careers Europe» и публикации в сопутствующей выставке периодике. Что касается выбора профессии инженера электронной техники и места работы, то основным критерием является уверенность в стабильности. По этой причине в Германии половина выпускников вузов хотели бы работать в больших и средних фирмах и только 6—7% — в малых. Другим фактором является отношение к работе, т. е. наличие мотивации к хорошей работе. Исследования показывают, что инженеров с высокой мотивацией к труду на фирмах в США — 29%, в Германии — 13%, Сингапуре — 6%. Работников с малой мотивацией в США — 54%, в Германии — 69%, в Сингапуре — 77%. Считают, что из-за потерь рабочего времени и малой производительности труда при низкой мотивации к работе Германия теряет 234—245 млрд. евро в год. В целом формируется мнение, что на предприятиях следует относиться к персоналу не как к стоимостному фактору, а как к важнейшему ресурсу. По существу вопрос состоит в оптимальном решении дилеммы: зарплата и необходимость быстрых инноваций. В определенной мере аутсорсинг решает проблему зарплат. По оценкам западных экспертов средняя зарплата опытного инженера в год составляет в США — 70 тыс. долл., в Индии — 20 тыс. долл., в России — 15 тыс. долл. [9]. По данным VDI Verlag в Германии эта цифра — 57 тыс. евро (с учетом курса зарплата, как в США). Но зарплата не решает проблему мотивации труда и «преданности» фирме. По опросам VDI в 2004/05 гг. 41% инженеров хотят со временем поменять работу (в 2002 г. их было 49%). В США многие инженеры так часто меняют работу, что возникают проблемы с их будущей пенсией. Несмотря на все колебания в содержании профессиональной деятельности инженера и местах его работы, по мнению автора статьи [11] работа инженером электроники остается билетом в комфортабельную жизнь уровня среднего класса. А сама профессия будет сохраняться, пока остается необходимость работы с «более или менее реальным миром».

Обобщая впечатление о выставке, подкрепленное публикациями, посвященными развитию электроники, следует отметить некоторую профессиональную напряженность. Она связана с неопределенностью судьбы полупроводниковой микроэлектроники при приближении к нижней границе КМОП-технологии. Существующий огромный массив технологического оборудования пока окупается в сравнительно короткие сроки и вполне ликвиден. Менее понятна судьба столь же огромного интеллектуального потенциала и ноу-хау, накопленного за десятилетия развития микроэлектроники в темпах, заданных законом Мура. Отметим некоторые тенденции современного этапа развития микроэлектроники.

- Расширение области применений изделий микроэлектроники путем смещения границы между комплектующей и конечной продукцией в сторону последней.
- Повышение роли встроенного программного обеспечения и возможностей БПС для большей гибкости в удовлетворении потребностей конкретных потребителей — изготовителей аппаратуры и систем.
- Трансферт технологии микроэлектроники субмикронного диапазона в микросистемную технику и нанотехнологию.
- Исследование и использование новых материалов (неорганических и органических) в массовом микроэлектронном производстве.
- Исследование возможностей применения эффектов, не связанных с переносом заряда, в конструкциях изделий микроэлектроники и нелиитографических технологий (например, самоорганизации) для массового производства.
- Усиление внимания к роли персонала как важнейшему ресурсу ускорения инновационного процесса и выхода изделий на рынок.
- Дальнейшее развитие процесса «глобализации» электронной промышленности путем усиления инновационной деятельности в западных странах и производственной в Юго-Восточной Азии, прежде всего в Китае.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вернер В. Д., Ковалев А. А., Тарасов В. А. Выставка «Электроника-2002» как зеркало мировой электроники // Изв. вузов. Электроника.— 2003.— № 2.— С. 96—102.
2. <http://www.global-electronics.net>
3. <http://www.public.itrs.net>
4. Jonson R. C. EE Times, November 2004.— P. 33—39.
5. Murray C. J. Self-navigating venchile EETimes, November 2004.— P. 41—46.
6. Алферов Ж. Полупроводниковая электроника в России // Электроника.— 2004.— № 4.— С. 88—91.
7. Вернер В. Д., Чаплыгин Ю. А., Сауров А. Н., Шелепин Н. А. Микросистемы и биочипы — трансферт технологии микроэлектроники // Электронные компоненты.— 2000.— Вып. 31.— С. 3—5.
8. Mounier E. The are plenty of exotic application for IC equipment makers outside the mainstream semiconductor business // Micronews.— 2005 Februar.— N 33.— P. 1.

Д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ, д. ф.-м. н. И. В. ГУЦУЛ

Украина, г. Черновцы, Институт термоэлектричества;  
 ЧНУ им. Юрия Федьковича  
 E-mail: photon@argocom.cv.ua

Дата поступления в редакцию  
 29.04 2005 г.

Оппоненты д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК  
 (ЧФ ИПМ, г. Черновцы),  
 д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ (ДонНУ, г. Донецк)

## ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПНЫХ ОПТИКОТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ В СЛУЧАЕ РАЗЛИЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

*Исследования впервые позволили предложить и реализовать метод «прозрачной стенки», предназначенный для регистрации лучистых потоков повышенной плотности в широком спектральном диапазоне.*

В настоящее время определенный интерес представляет эффект поперечной термоЭДС, обусловленный анизотропией коэффициентов термоЭДС [1] и теплопроводности [2]. Его исследованию посвящен ряд публикаций [3—8], где на основе уравнений теплопроводности с соответствующими граничными условиями рассмотрены конкретные распределения температур и термоэлектрических потенциалов анизотропной пластины, экспериментальное сравнение которых проведено в [9, 10].

Появление источников энергии повышенной плотности обусловило возникновение проблемы их преобразования и регистрации. Для ее решения впервые было предложено использовать среды с различной степенью оптической прозрачности при одновременном преобразовании поглощенной части энергии с помощью известных теплопирокалориметрических эффектов [11—14]. Проведенный анализ показал, что для лучистых потоков УФ-, видимой, ИК- и СВЧ-областей спектра реализация этого метода перспективна в случае вышеупомянутой поперечной термоЭДС, послужившей в дальнейшем основой для появления оригинальных анизотропных оптикотермоэлементов (АОТ) [15—17].

В настоящей работе представлены результаты исследований некоторых АОТ, проведенных авторами, в случае различных распределений температур и направлений лучистых потоков, а также рассмотрены их особенности.

### АОТ при одномерном распределении температур

В первых публикациях, посвященных исследованию поперечной термоЭДС с учетом оптических свойств, АОТ рассматривались в виде прямоугольной пластины 1 длиной  $a$ , высотой  $b$  и шириной  $c$  из оптически прозрачного материала, анизотропного по коэффициентам теплопроводности  $\hat{\chi}$  и термоЭДС  $\hat{\alpha}$  (рис. 1). Эти тензоры в лабораторной системе координат ( $X'YZ$ ), смещенной на угол  $\varphi$  в плоскости  $XOY$  относительно кристаллографической ( $XYZ$ ), имеют вид

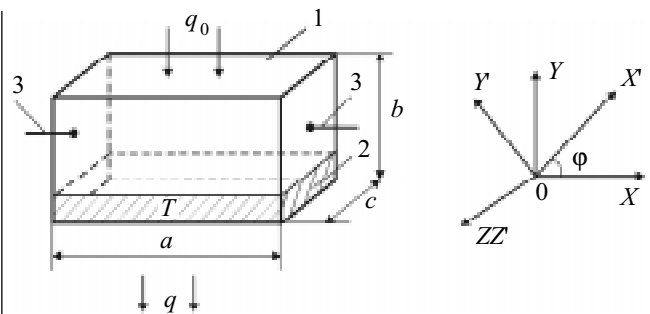


Рис. 1. Схема АОТ в случае термостатирования нижней рабочей грани:

1 — пластина из анизотропного материала; 2 — термостат; 3 — электровыводы. Справа — лабораторная система координат  $XYZ$  и ориентация главных кристаллографических осей  $X'YZ'$  монокристаллической пластины 1

$$\hat{\chi} = \begin{vmatrix} \chi_{\parallel} \cdot \sin^2 \varphi + \chi_{\perp} \cdot \cos^2 \varphi & (\chi_{\parallel} - \chi_{\perp}) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi & 0 \\ (\chi_{\parallel} - \chi_{\perp}) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi & \chi_{\parallel} \cdot \cos^2 \varphi + \chi_{\perp} \cdot \sin^2 \varphi & 0 \\ 0 & 0 & \chi_{\perp} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

$$\hat{\alpha} = \begin{vmatrix} \alpha_{\parallel} \cdot \sin^2 \varphi + \alpha_{\perp} \cdot \cos^2 \varphi & (\alpha_{\parallel} - \alpha_{\perp}) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi & 0 \\ (\alpha_{\parallel} - \alpha_{\perp}) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi & \alpha_{\parallel} \cdot \cos^2 \varphi + \alpha_{\perp} \cdot \sin^2 \varphi & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{\perp} \end{vmatrix}. \quad (2)$$

На верхнюю грань этой пластины падает однородный монохроматический лучистый поток плотностью  $q_0$ , а ее нижняя грань находится в теплооптическом контакте с термостатом 2 при температуре  $T=T_0$ . Термостат 2 выполнен из изотропного материала, оптический спектральный диапазон которого совпадает с соответствующим диапазоном длин волн материала АОТ. Боковые грани АОТ адиабатически изолированы, при этом краевые эффекты не учитываются ( $a=c \gg b$ ) [4].

Распределение температуры АОТ при антипараллельных направлениях градиента температуры и лучистого потока находится из основного уравнения теплопроводности [18] при наличии внутренних источников тепла:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c_0 d} \sum_{i,k=1}^3 \chi_{ik} \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_k} + \frac{q_v}{c_0 d}, \quad (3)$$

где  $c_0$  — удельная теплоемкость;  
 $d$  — плотность материала АОТ;

$\chi_{ik}$  — соответствующие компоненты тензора теплопроводности;  
 $q_v$  — количество тепла, выделяемого внутренними источниками в единице объема за единицу времени и определяемого законом Бугера–Ламберта.

В случае стационарного распределения температуры  $\left(\frac{\partial T}{\partial t} = 0\right)$  для приближений  $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$ ,  $\chi_{12} < \chi_{22}$  уравнение (3) приобретает вид

$$\chi_{22} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_0 \gamma \cdot e^{-\gamma(b-y)} = 0, \quad (4)$$

где  $\gamma$  — коэффициент оптического поглощения материала АОТ.

Решая (4) при граничных условиях

$$T \Big|_{y=0} = T_0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=b} = 0, \quad (5)$$

получим одномерное распределение температуры объема АОТ:

$$T(y) = T_0 + \frac{q_0}{\chi_{22}} \left[ y + \frac{e^{-\gamma b}}{\gamma} (1 - e^{-\gamma y}) \right]. \quad (6)$$

Компоненты напряженности термоэлектрического поля  $\vec{E}^T$  определяются соотношением

$$E_i^T = \sum_{k=1}^3 \alpha_{ik} \frac{\partial T}{\partial x_k}. \quad (7)$$

Подставляя (6) в (7), получим:

$$E_x^T = \alpha_{12} \frac{\partial T}{\partial y} = q_0 \frac{\alpha_{12}}{\chi_{22}} \left[ 1 - e^{-\gamma(b-y)} \right]. \quad (8)$$

В соответствии с [5] термоЭДС  $\varepsilon$  определяется следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{1}{bc} \int_0^b dy \int_0^c dz \int_0^a E_x^T dx. \quad (9)$$

Подставляя (8) в (9), получаем термоЭДС рассматриваемого АОТ:

$$\varepsilon^{\uparrow\downarrow} = q_0 a \frac{\alpha_{12}}{\chi_{22}} \left[ 1 - \frac{1}{\gamma b} (1 - e^{-\gamma b}) \right]. \quad (10)$$

Коэффициент полезного действия (КПД)  $\eta$  [14] таких устройств определяется соотношением [15]

$$\eta = \eta_k \frac{1}{1 + \Lambda}, \quad (11)$$

где  $\eta_k$  — КПД цикла Карно;

$$\Lambda = \frac{BT_0}{A};$$

$A = I^2 R_{\text{вн}}$  — мощность АОТ;

$B$  — скорость возникновения энтропии объема АОТ —

$$B = \frac{Q_0}{T_0} - \frac{Q_1}{T_1} = \chi_{22} S \left[ \frac{1}{T_0} \frac{dT}{dy} \Big|_{y=0} - \frac{1}{T_1} \frac{dT}{dy} \Big|_{y=b} \right]. \quad (12)$$

Здесь  $Q_0$  и  $Q_1$  — количество теплоты на нижней и верхней гранях АОТ, соответственно,  $S = ac$  — площадь этих граней,  $T_1$  — температура верхней грани.

С учетом (6), для (12) получаем:

$$B = q_0 ac T_0^{-1} (1 - e^{-\gamma b}). \quad (13)$$

Ток  $I$ , протекающий через АОТ,

$$I = \frac{\varepsilon}{R_i + R_{\text{вн}}} = \frac{q_0 a \alpha_{12}}{(R_i + R_{\text{вн}}) \chi_{22}} \left[ 1 - \frac{1}{\gamma b} (1 - e^{-\gamma b}) \right], \quad (14)$$

где  $R_i = \rho \frac{a}{bc}$  — внутреннее сопротивление АОТ;  
 $\rho$  — удельное сопротивление материала;  
 $R_{\text{вн}}$  — сопротивление нагрузки.

В случае  $R_i = R_{\text{вн}}$  выражение для работы  $A$  с учетом (14) приобретает вид

$$A = \frac{q_0^2 abc \alpha_{12}^2}{4 \rho \chi_{22}^2} \left[ 1 - \frac{1}{\gamma b} (1 - e^{-\gamma b}) \right]^2, \quad (15)$$

а безразмерный параметр  $\Lambda$ , входящий в выражение для КПД  $\eta$ , можно представить как

$$\Lambda = \frac{4 \rho \chi_{22}^2 (1 - e^{-\gamma b})}{q_0 b \alpha_{12}^2 \left[ 1 - \frac{1}{\gamma b} (1 - e^{-\gamma b}) \right]^2}. \quad (16)$$

В результате, подставляя (16) в (11) с учетом (6), получаем:

$$\eta^{\uparrow\downarrow} = \frac{q_0 b \chi_{22}^2 \left[ 1 + \frac{1}{\gamma b} (-1 + e^{-\gamma b}) \right]}{T_0 + q_0 b \chi_{22}^2 \left[ 1 + \frac{1}{\gamma b} (-1 + e^{-\gamma b}) \right]} \times \left[ 1 + \frac{4 \rho \chi_{22}^2 (1 - e^{-\gamma b})}{q_0 b \alpha_{12}^2 \left[ 1 - \frac{1}{\gamma b} (1 - e^{-\gamma b}) \right]^2} \right]^{-1}. \quad (17)$$

В некоторых случаях, например АОТ с верхней термостатированной рабочей гранью (рис. 2), направление распространения лучистого потока и градиента температуры совпадают [11]. Лучистый поток плотностью  $q_0$  падает на верхнюю грань термостата  $1$  толщиной  $b_1$

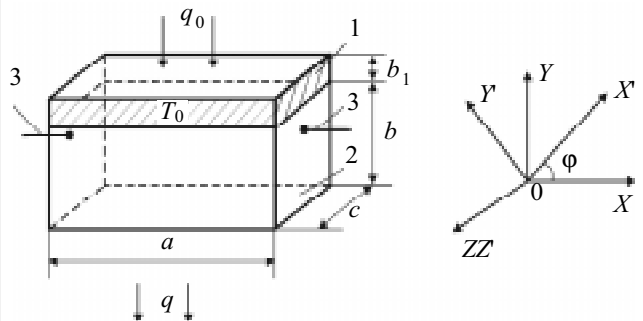


Рис. 2. Схема АОТ в случае термостатирования верхней рабочей грани:

1 — термостат; 2 — анизотропная пластина; 3 — электрические контакты. Справа — лабораторная система координат  $XYZ$  и ориентация главных кристаллографических осей  $X'Y'Z'$  монокристаллической пластины 2

из оптически прозрачного в требуемом спектральном диапазоне длин волн материала с коэффициентом поглощения  $\gamma_1$ . Нижняя грань термостата находится в теплооптическом контакте с верхней гранью пластины 2 при температуре  $T = T_0$ . Боковые и нижняя грани пластины 2 адиабатически изолированы. Распределение температуры такого термоэлемента также находится из уравнения теплопроводности (3), аналогично (4):

$$\chi_{22} \frac{d^2 T}{dy^2} + q_0 \cdot e^{-\gamma_1 b} \cdot \gamma \cdot e^{-\gamma(b-y)} = 0. \quad (18)$$

Решая уравнение (18) при граничных условиях

$$\left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=0} = 0, \quad T \Big|_{y=b} = T_0, \quad (19)$$

получим распределение температуры этого АОТ:

$$T = T_0 + \frac{q_0 e^{-\gamma_1 b}}{\chi_{22}} \left\{ (y-b)e^{-\gamma b} + \frac{1}{\gamma} [1 - e^{-\gamma(b-y)}] \right\}. \quad (20)$$

Используя соотношения (7) и (9), получим выражение поперечной термоЭДС  $\varepsilon^{\downarrow\downarrow}$  АОТ с параллельным направлением лучистого потока и градиента температуры:

$$\varepsilon^{\downarrow\downarrow} = \frac{q_0 a \alpha_{12} e^{-\gamma_1 b}}{\chi_{22}} \left\{ e^{-\gamma b} - \frac{1}{\gamma b} [1 - e^{-\gamma b}] \right\}. \quad (21)$$

Аналогично (17), коэффициент полезного действия  $\eta^{\downarrow\downarrow}$  для этого случая

$$\eta^{\downarrow\downarrow} = \frac{q_0 \gamma^{-1} e^{-\gamma_1 b} \chi_{22}^{-1} [1 - e^{-\gamma b} (1 + \gamma b)]}{T_0 + q_0 \gamma^{-1} e^{-\gamma_1 b} \chi_{22}^{-1} [1 - e^{-\gamma b} (1 + \gamma b)]} \times \left\{ 1 + \frac{4 \rho e^{-\gamma_1 b} (1 - e^{-\gamma b}) \chi_{22}^{-1}}{q_0 b \alpha_{12}^2 \left[ e^{-\gamma b} - \frac{1}{\gamma b} (1 - e^{-\gamma b}) \right]^2} \right\}^{-1}. \quad (22)$$

Из (10), (17), (21), (22) следует, что в зависимости от степени оптической прозрачности вольт-ваттная чувствительность [9]  $S_0$  и коэффициент полезного действия  $\eta$  АОТ с антипараллельным и параллельным распространением лучистого потока по отношению к градиенту температуры в случае одномерного распределения температуры имеют вид:

а) режим оптического пропускания ( $\gamma b \ll 1$ ,  $\gamma_1 b_1 \ll 1$ ) —

$$S_{01}^{\uparrow\downarrow} = \frac{\alpha_{12}}{2\chi_{22} c} \gamma b; \quad (23)$$

$$\eta_{11}^{\uparrow\downarrow} = \frac{q_0 b \chi_{22}^{-1} \gamma b}{2T_0 + q_0 b \chi_{22}^{-1} \gamma b} \left[ 1 + \frac{8\rho \chi_{22}^2 (2 - \gamma b)}{q_0 b \alpha_{12}^2 \gamma b} \right]^{-1}; \quad (24)$$

$$S_{01}^{\downarrow\downarrow} = \frac{\alpha_{12}}{\chi_{22} c} e^{-\gamma_1 b} \gamma b; \quad (25)$$

$$\eta_{11}^{\downarrow\downarrow} = \frac{q_0 b \chi_{22}^{-1} \gamma b e^{-\gamma_1 b}}{T_0 + q_0 b \chi_{22}^{-1} \gamma b e^{-\gamma_1 b}} \left[ 1 + \frac{4\rho \chi_{22}^2 e^{\gamma_1 b}}{q_0 b \alpha_{12}^2 \gamma b} \right]^{-1}; \quad (26)$$

б) режим объемного поглощения ( $\gamma b \approx 1$ ,  $\gamma_1 b_1 \ll 1$ ) —

$$S_{02}^{\uparrow\downarrow} = \frac{\alpha_{12}}{e\chi_{22} c}; \quad (27)$$

$$\eta_2^{\uparrow\downarrow} = \frac{q_0 b \chi_{22}^{-1} e^{-1}}{T_0 + q_0 b \chi_{22}^{-1} e^{-1}} \left[ 1 + \frac{4\rho \chi_{22}^2 (1 - e^{-1})}{q_0 b \alpha_{12}^2 e^{-2}} \right]^{-1}; \quad (28)$$

$$S_{02}^{\downarrow\downarrow} = \frac{\alpha_{12}}{\chi_{22} c} e^{-\gamma_1 b} (e - 2); \quad (29)$$

$$\eta_2^{\downarrow\downarrow} = \frac{q_0 \chi_{22}^{-1} \gamma^{-1} e^{-\gamma_1 b} (1 - 2e^{-1})}{T_0 + q_0 \chi_{22}^{-1} \gamma^{-1} e^{-\gamma_1 b} (1 - 2e^{-1})} \left[ 1 + \frac{4\rho \chi_{22}^2 e^{\gamma_1 b} (1 - e^{-1})}{q_0 b \alpha_{12}^2 (2e^{-1} - 1)^2} \right]^{-1}; \quad (30)$$

в) режим поверхностного поглощения ( $\gamma b \gg 1$ ,  $0 < \gamma_1 b_1 \leq \gamma b$ ) —

$$S_{03}^{\uparrow\downarrow} = \frac{\alpha_{12}}{\chi_{22} c} \left( 1 - \frac{1}{\gamma b} \right); \quad (31)$$

$$\eta_3^{\uparrow\downarrow} = \frac{q_0 b \chi_{22}^{-1}}{T_0 + q_0 b \chi_{22}^{-1}} \left[ 1 + \frac{4\rho \chi_{22}^2}{q_0 b \alpha_{12}^2} \right]^{-1}; \quad (32)$$

$$S_{03}^{\downarrow\downarrow} = \frac{\alpha_{12}}{\chi_{22} c} \frac{1}{\gamma b} e^{-\gamma_1 b}; \quad (33)$$

$$\eta_3^{\downarrow\downarrow} = \frac{q_0 \chi_{22}^{-1} \gamma^{-1} e^{-\gamma_1 b}}{T_0 + q_0 \chi_{22}^{-1} \gamma^{-1} e^{-\gamma_1 b}} \left[ 1 + \frac{4\rho \chi_{22}^2 e^{\gamma_1 b}}{q_0 b \alpha_{12}^2 (\gamma b)^2} \right]^{-1}. \quad (34)$$

Анализ выражений (23) — (34) показывает, что максимальные значения вольт-ваттной чувствительности  $S_0$  и КПД  $\eta$  определяются анизотропией коэффициентов термоЭДС  $\hat{\alpha}$  и теплопроводности  $\hat{\chi}$  и наблюдаются при некоторых оптимальных углах  $\varphi_{\text{опт}}$ , значения которых находятся из [5]:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \varphi} = 0, \quad \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial \varphi^2} < 0. \quad (35)$$

Проведенные исследования позволили сделать выводы о том, что эффективное использование АОТ в роли энергетических преобразователей перспективно в случае режима поверхностного поглощения ( $\gamma b \gg 1$ ) при антипараллельном расположении лучистого потока и градиента температуры. Термоэлементы, работающие в режиме оптического пропускания ( $\gamma b \ll 1$ ), наиболее эффективно проявили себя в качестве информационных преобразователей, позволивших предложить и реализовать новый метод регистрации лучистых потоков, названный нами методом “прозрачной стенки”, а также создать оригинальные средства для регистрации и непрерывного контроля проходящих лучистых потоков различной мощности [14].

#### АОТ при двухмерном распределении температуры, обусловленном анизотропией теплопроводности

Двухмерное распределение температуры, обусловленное анизотропией теплопроводности материала АОТ при антипараллельных направлениях лучистого потока и градиента температуры (рис. 1), также находится из уравнения теплопроводности (3), которое в приближении  $\chi_{11} > \chi_{12}$ ,  $\chi_{22} > \chi_{12}$  для стационарного случая имеет вид

$$\xi^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_0 \gamma [e^{-\gamma(b-y)} + e^{-\gamma x}] = 0, \quad (36)$$

где  $\xi^2 = \frac{\chi_{11}}{\chi_{22}}$ .

Решение уравнения (36) проводится при граничных условиях

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=a} = 0, \quad T \Big|_{y=0} = T_0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=b} = 0. \quad (37)$$

Известно, что собственной функцией задачи Штурма–Лиувилля [19, 20]

$$\frac{d^2 f}{dx^2} + \lambda^2 f = 0, \quad \frac{df}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{df}{dx} \Big|_{x=a} = 0 \quad (38)$$

является функция  $\cos \lambda_n x$ , отвечающая собственному

значению  $\lambda_n = \frac{n\pi}{a}$ , где  $n = 0, 1, 2, \dots$ .

Система  $\{\cos \lambda_n x\}_{n=0}^{\infty}$  — полная, замкнутая ортогональная система функций на отрезке  $[0, a]$ , что позволяет разложить функции  $f(x)$  в ряд Фурье.

Функция  $f(x)$  по своему изображению [20]

$$\hat{F}_n[f(x)] = \int_0^a f(x) \cos \lambda_n x dx \equiv f_n \quad (39)$$

однозначно восстанавливается по правилу

$$f(x) = \hat{F}_n^{-1}[f_n] = \frac{1}{a} \sum_{n=0}^{\infty} \delta_n f_n \cos \lambda_n x, \quad (40)$$

где  $\delta_n = \begin{cases} 1, & n=0 \\ 2, & n=1, 2, \dots \end{cases}$

Соотношения (39) и (40) носят название законченного прямого  $\hat{F}_n$  и обратного  $\hat{F}_n^{-1}$  интегральных косинус-преобразований Фурье [19]. Применяв к (36), (37) оператор  $\hat{F}_n$  по правилу (39), вследствие тождественности

$$\hat{F}_n \left[ \xi^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] \equiv \int_0^a \xi^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \cos \lambda_n x dx \equiv -\xi^2 \lambda_n^2 T_n(y), \quad (41)$$

где

$$T_n(y) = \int_0^a T(x, y) \cos \lambda_n x dx, \quad (42)$$

получаем задачу построения решения уравнения

$$\frac{d^2 T_n}{dy^2} - \xi^2 \lambda_n^2 T_n(y) = -\Phi_n(y), \quad y \in (0, b), \quad (43)$$

причем

$$\Phi_n(y) = \int_0^a \frac{q_0 \gamma}{\chi_{22}} \left[ e^{-\gamma(b-y)} + e^{-\gamma x} \right] \cos \lambda_n x dx \quad (44)$$

при граничных условиях

$$T_0(y) \Big|_{y=0} = T_{0n}, \quad T_{0n} = \int_0^a T_0 \cdot \cos \lambda_n x \cdot dx = \begin{cases} T_0 a, & n=0 \\ 0, & n=1, 2, \dots \end{cases}, \quad \frac{dT_n(y)}{dy} \Big|_{y=b} = 0. \quad (45)$$

При  $n=0$  уравнение теплопроводности (43) приобретает вид

$$\frac{d^2 T_0}{dy^2} = -\int_0^a \frac{q_0 \gamma}{\chi_{22}} \left[ e^{-\gamma(b-y)} + e^{-\gamma x} \right] dx \quad (46)$$

при следующих граничных условиях:

$$T_0(y) \Big|_{y=0} = T_0 a; \quad \frac{dT_0(y)}{dy} \Big|_{y=b} = 0. \quad (47)$$

Решение уравнений (46), (47) получаем в виде

$$T_0(y) = T_0 a + \frac{q_0 a}{\chi_{22}} \left\{ \frac{e^{-\gamma b}}{\gamma} + \left[ 1 + \frac{b}{a} (1 - e^{-\gamma a}) \right] y - \frac{e^{-\gamma(b-y)}}{\gamma} - \frac{1 - e^{-\gamma a}}{2a} y^2 \right\}. \quad (48)$$

Для  $n > 0$  общее решение (43) находится в виде суммы общего решения однородного и частного решения неоднородного уравнений, т. е.

$$T_n(y) \Big|_{n > 0} = T_n^{\text{одн}}(y) + T_n^{\text{неодн}}(y). \quad (49)$$

Общее решение однородного уравнения (43) ищем в виде

$$T_n^{\text{одн}}(y) \Big|_{n > 0} = A_{1n} \text{ch}(\xi \lambda_n y) + A_{2n} \text{sh}(\xi \lambda_n y). \quad (50)$$

Поскольку правая часть (43) определяется выражением (44), то после интегрирования она приобретает вид

$$\Phi_n(y) = \frac{q_0 \gamma^2}{\chi_{22}} \frac{[1 - (-1)^n e^{-\gamma a}]}{(\lambda_n^2 + \gamma^2)} \quad (51)$$

и является постоянной величиной.

Для частного решения  $T_n^{\text{неодн}}(y)$  получаем:

$$T_n^{\text{неодн}}(y) \Big|_{n > 0} = \frac{q_0 \gamma^2}{\chi_{22}} \frac{[1 - (-1)^n e^{-\gamma a}]}{\xi^2 \lambda_n^2 (\lambda_n^2 + \gamma^2)}. \quad (52)$$

Коэффициенты  $A_{1n}$  и  $A_{2n}$  вычислим после подстановки (50) и (52) в выражение (49) при граничных условиях

$$T_n(y) \Big|_{y=0} = 0; \quad \frac{dT_n(y)}{dy} \Big|_{y=b} = 0. \quad (53)$$

В результате общее решение неоднородного уравнения (43) при  $n > 0$  приобретает вид

$$T_n(y) \Big|_{n > 0} = \frac{q_0 \gamma^2}{\chi_{22}} \frac{[1 - (-1)^n e^{-\gamma a}]}{\xi^2 \lambda_n^2 (\lambda_n^2 + \gamma^2)} \left\{ 1 - \frac{\text{ch}[\xi \lambda_n (b - y)]}{\text{ch}(\xi \lambda_n b)} \right\}. \quad (54)$$

Применяя обратное интегральное косинус-преобразование Фурье (40) к общему решению неоднородного дифференциального уравнения (43)

$$T(x, y) = \hat{F}_n^{-1}[T_n(y)] = \frac{1}{a} \sum_{n=0}^{\infty} \delta_n T_n(y) \cos \lambda_n x = \frac{1}{a} T_0(y) + \frac{2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} T_n(y) \cos \lambda_n x \quad (55)$$

и подставив (48) и (54) в (55), получим распределения температуры в следующем виде:

$$T(x, y) = T_0 + \frac{q_0}{\chi_{22}} \left[ \frac{e^{-\gamma b}}{\gamma} (1 - e^{-\gamma y}) + y + (1 - e^{-\gamma a}) \left( \frac{b}{a} y - \frac{1}{2a} y^2 \right) \right] + \frac{2q_0 \gamma^2}{\alpha \chi_{11}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^n e^{-\gamma a}]}{\lambda_n^2 (\lambda_n^2 + \gamma^2)} \left\{ 1 - \frac{\operatorname{ch} \left[ \sqrt{\frac{\chi_{11}}{\chi_{22}}} \lambda_n (b - y) \right]}{\operatorname{ch} \left[ \sqrt{\frac{\chi_{11}}{\chi_{22}}} \lambda_n b \right]} \right\} \cos \lambda_n x. \quad (56)$$

Анализ (56) показывает, что полученное распределение температуры  $T(x, y)$  имеет сложную нелинейную зависимость от координат и определяется как анизотропией теплопроводности, так и оптическими свойствами материала пластины.

Подставив (56) в (7), получим:

$$E_x^T = \frac{q_0 \alpha_{12}}{\chi_{22}} \left[ 1 - e^{-\gamma(b-y)} + \frac{b}{a} (1 - e^{-\gamma a}) - \frac{1 - e^{-\gamma a}}{a} y \right] + \frac{2q_0 \gamma^2 \alpha_{12}}{\alpha \chi_{11}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^n e^{-\gamma a}]}{\lambda_n (\lambda_n^2 + \gamma^2)} \frac{\sqrt{\chi_{11}} \operatorname{sh} \left[ \sqrt{\frac{\chi_{11}}{\chi_{22}}} \lambda_n (b - y) \right]}{\operatorname{ch} \left[ \sqrt{\frac{\chi_{11}}{\chi_{22}}} \lambda_n b \right]} \times \cos \lambda_n x - \frac{2q_0 \gamma^2 \alpha_{11}}{\alpha \chi_{11}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^n e^{-\gamma a}]}{\lambda_n (\lambda_n^2 + \gamma^2)} \times \sin \lambda_n x \left\{ 1 - \frac{\operatorname{ch} \left[ \sqrt{\frac{\chi_{11}}{\chi_{22}}} \lambda_n (b - y) \right]}{\operatorname{ch} \left[ \sqrt{\frac{\chi_{11}}{\chi_{22}}} \lambda_n b \right]} \right\}. \quad (57)$$

Подставляя (57) в (9), после интегрирования получим выражение термоЭДС  $\epsilon_1^{\uparrow\downarrow}$  АОТ с антипараллельными направлениями лучистого потока и градиента температуры:

$$\epsilon_1^{\uparrow\downarrow} = \frac{q_0 \alpha_{12}}{\chi_{22}} \left[ 1 + \frac{b}{2a} (1 - e^{-\gamma a}) - \frac{1}{\gamma b} (1 - e^{-\gamma b}) \right] + \frac{4q_0 \gamma^2 \alpha_{11}}{ab \chi_{11}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1 + e^{-\gamma a}}{a^2 \left[ \frac{(2k+1)^2 \pi^2}{a^2} + \gamma^2 \right]} \times \left[ \frac{a}{(2k+1)\pi \sqrt{\chi_{11}}} \operatorname{th} \left( \frac{\sqrt{\chi_{11}} (2k+1)\pi b}{\sqrt{\chi_{22}} a} \right) - b \right]. \quad (58)$$

В отличие от одномерного распределения температуры (6), при котором поперечная термоЭДС  $\epsilon_1^{\uparrow\downarrow}$  (10) определяется только коэффициентом термоЭДС  $\alpha_{12}$ , в случае двухмерного распределения температуры (56) величина  $\epsilon_1^{\uparrow\downarrow}$  определяется и коэффициентом термоЭДС  $\alpha_{11}$ . Это значит, что при одномерном распределении температуры поперечная термоЭДС

обусловлена составляющей градиента температуры только вдоль оси  $OY$ , а при двухмерном — составляющими вдоль осей  $OY$  и  $OX$ .

Двухмерное распределение температуры АОТ с параллельными направлениями градиента температуры и лучистого потока (рис. 2) также находится из (3) —

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \beta^2 \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{q_0 \gamma}{\chi_{11}} \cdot e^{-\gamma b} [e^{-\gamma(b-y)} + e^{-\gamma x}] = 0, \quad (59)$$

где  $\beta^2 = \frac{\chi_{22}}{\chi_{11}}$

при граничных условиях

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{x=a} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad T \Big|_{y=b} = T_0. \quad (60)$$

Использование задачи Штурма–Луивилля с последующими прямыми и обратными интегральными косинус-преобразованиями Фурье [20] приводит, аналогично (39)—(55), к следующему распределению температуры АОТ:

$$T(x, y) = T_0 + \frac{q_0 \cdot e^{-\gamma b}}{\chi_{22}} \left\{ (y-b)e^{-\gamma b} + \frac{1}{\gamma} [1 - e^{-\gamma(b-y)}] + \frac{1 - e^{-\gamma a}}{2a} (b^2 - y^2) \right\} + \frac{2q_0 \gamma^2 \cdot e^{-\gamma b}}{\alpha \chi_{11}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^n \cdot e^{-\gamma a}]}{\lambda_n^2 (\lambda_n^2 + \gamma^2)} \left[ 1 - \frac{\operatorname{ch}(\beta^{-1} \lambda_n y)}{\operatorname{ch}(\beta^{-1} \lambda_n b)} \right] \cos \lambda_n x. \quad (61)$$

ТермоЭДС  $\epsilon^{\uparrow\downarrow}$  с учетом (7) и (61) приобретает вид

$$\epsilon_1^{\uparrow\downarrow} = \frac{q_0 \alpha_{12} e^{-\gamma b}}{\chi_{22}} \left\{ e^{-\gamma b} - \frac{1}{\gamma b} [1 - e^{-\gamma b}] - \frac{(1 - e^{-\gamma a})b}{2a} \right\} - \frac{4q_0 \gamma^2}{ab} \times \frac{\alpha_{11} e^{-\gamma b}}{\chi_{11}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1 + e^{-\gamma a}}{a^2 \left[ \frac{(2k+1)^2 \pi^2}{a^2} + \gamma^2 \right]} \times \left[ b - \frac{a}{(2k+1)\pi \sqrt{\chi_{11}}} \operatorname{th} \left( \frac{\sqrt{\chi_{11}} (2k+1)\pi b}{\sqrt{\chi_{22}} a} \right) \right]. \quad (62)$$

Как и в (58), первая тройка слагаемых (62) определяет термоЭДС, создаваемую градиентом температуры вдоль оси  $OY$ , а слагаемое со знаком суммы — термоЭДС, которая создается градиентом температуры вдоль оси  $OX$ . После соответствующих преобразований следует, что вольт-ваттные чувствительности АОТ с антипараллельными и параллельными направлениями лучистого потока и градиента температуры приобретают вид:

а) режим оптического пропускания ( $\gamma b \ll 1$ ,  $\gamma_1 b_1 \ll 1$ ) —

$$(S_{01}^{\uparrow\downarrow})' = \frac{\alpha_{12}}{\chi_{22} c} \left[ \frac{\gamma b}{2} + \frac{b}{2a} (1 - e^{-\gamma a}) \right] + \frac{4\gamma^2 \alpha_{11}}{a^2 b c \chi_{11}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1 + e^{-\gamma a}}{a^2 \left[ \frac{(2k+1)^2 \pi^2}{a^2} + \gamma^2 \right]} \times \left[ \frac{a}{(2k+1)\pi \sqrt{\chi_{11}}} \operatorname{th} \left( \frac{\sqrt{\chi_{11}} (2k+1)\pi b}{\sqrt{\chi_{22}} a} \right) - b \right]; \quad (63)$$

$$(S_{01}^{\downarrow\downarrow})' = \frac{\alpha_{12} e^{-\gamma_1 h}}{\chi_{22} c} \left[ \frac{\gamma b}{2} (\gamma b - 1) - \frac{b}{2a} (1 - e^{-\gamma a}) \right] - \frac{4\gamma^2 e^{-\gamma_1 h}}{a^2 b c} \frac{\alpha_{11}}{\chi_{11}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1 + e^{-\gamma a}}{(2k+1)^2 \pi^2 \left[ \frac{(2k+1)^2 \pi^2}{a^2} + \gamma^2 \right]} \times \left[ b - \frac{a}{(2k+1)\pi} \sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{11}}} \operatorname{th} \left( \sqrt{\frac{\chi_{11}}{\chi_{22}}} \frac{(2k+1)\pi b}{a} \right) \right]; \quad (64)$$

б) режим объемного поглощения ( $\gamma b \approx 1, \gamma_1 b_1 \ll 1$ ) —

$$(S_{02}^{\uparrow\downarrow})' = \frac{\alpha_{12}}{\chi_{22} c} \left[ \frac{1}{e} + \frac{b}{2a} (1 - e^{-\gamma a}) \right] + \frac{4\gamma^2}{a^2 b c} \frac{\alpha_{11}}{\chi_{11}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1 + e^{-\gamma a}}{(2k+1)^2 \pi^2 \left[ \frac{(2k+1)^2 \pi^2}{a^2} + \gamma^2 \right]} \times \left[ \frac{a}{(2k+1)\pi} \sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{11}}} \operatorname{th} \left( \sqrt{\frac{\chi_{11}}{\chi_{22}}} \frac{(2k+1)\pi b}{a} \right) - b \right]; \quad (65)$$

$$(S_{02}^{\downarrow\downarrow})' = \frac{\alpha_{12} e^{-\gamma_1 h}}{\chi_{22} c} \left[ \frac{2}{e} - 1 - \frac{b}{2a} (1 - e^{-\gamma a}) \right] - \frac{4\gamma^2 e^{-\gamma_1 h}}{a^2 b c} \frac{\alpha_{11}}{\chi_{11}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1 + e^{-\gamma a}}{(2k+1)^2 \pi^2 \left[ \frac{(2k+1)^2 \pi^2}{a^2} + \gamma^2 \right]} \times \left[ b - \frac{a}{(2k+1)\pi} \sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{11}}} \operatorname{th} \left( \sqrt{\frac{\chi_{11}}{\chi_{22}}} \frac{(2k+1)\pi b}{a} \right) \right]; \quad (66)$$

в) режим поверхностного поглощения ( $\gamma b \gg 1, 0 < \gamma_1 b_1 \leq \gamma b$ ) —

$$(S_{03}^{\uparrow\downarrow})' = \frac{\alpha_{12}}{\chi_{22} c} \left[ 1 - \frac{1}{\gamma b} + \frac{b}{2a} (1 - e^{-\gamma a}) \right] + \frac{4\gamma^2}{a^2 b c} \frac{\alpha_{11}}{\chi_{11}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1 + e^{-\gamma a}}{(2k+1)^2 \pi^2 \left[ \frac{(2k+1)^2 \pi^2}{a^2} + \gamma^2 \right]} \times \left[ \frac{a}{(2k+1)\pi} \sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{11}}} \operatorname{th} \left( \sqrt{\frac{\chi_{11}}{\chi_{22}}} \frac{(2k+1)\pi b}{a} \right) - b \right]; \quad (67)$$

$$(S_{03}^{\downarrow\downarrow})' = \frac{\alpha_{12} e^{-\gamma_1 h}}{\chi_{22} c} \left[ \frac{b}{2a} (e^{-\gamma a} - 1) - \frac{1}{\gamma b} \right] - \frac{4\gamma^2 e^{-\gamma_1 h}}{a^2 b c} \frac{\alpha_{11}}{\chi_{11}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1 + e^{-\gamma a}}{(2k+1)^2 \pi^2 \left[ \frac{(2k+1)^2 \pi^2}{a^2} + \gamma^2 \right]} \times \left[ b - \frac{a}{(2k+1)\pi} \sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{11}}} \operatorname{th} \left( \sqrt{\frac{\chi_{11}}{\chi_{22}}} \frac{(2k+1)\pi b}{a} \right) \right]. \quad (68)$$

Анализ численных значений  $(S_0^{\uparrow\downarrow})'$  и  $(S_0^{\downarrow\downarrow})'$  показывает, что в режиме оптического пропускания они практически совпадают. Для режима поверхностного поглощения численные значения  $(S_{03}^{\uparrow\downarrow})'$  значительно больше  $(S_{03}^{\downarrow\downarrow})'$ , что обусловлено сложным распределением температуры. В случае АОТ с антипараллельным направлением поглощенная часть энергии проходит через весь объем пластины. При параллельных направлениях поглощенная часть энергии выделяется на поверхности рабочей грани термостата, находящейся в тепловом контакте с термостатом. Большая часть этой энергии уходит в термостат, минуя объем АОТ.

**АОТ при двухмерном распределении температуры, обусловленном термостатированием боковых граней**

Наряду с отводом поглощенного тепла через рабочую грани большой интерес представляют АОТ, отвод поглощенного тепла которых осуществляется через боковые грани. В этом случае контролируемая лучистая энергия проходит только через анизотропную пластину, что расширяет энергетические и спектральные характеристики и упрощает конструкцию [21].

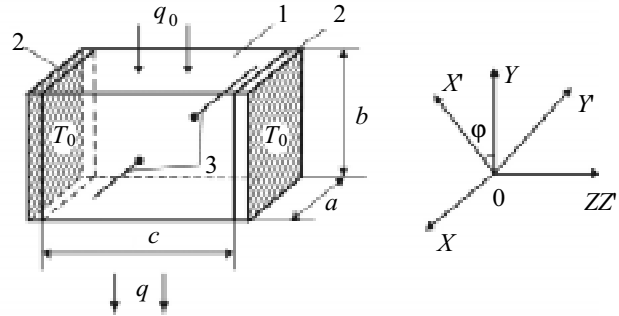


Рис. 3. Схема АОТ в случае термостатирования боковых граней:

1 — анизотропная пластина; 2 — термостат; 3 — электровыводы. Справа — лабораторная система координат XYZ и ориентация кристаллографических осей X'Y'Z' монокристаллической пластины I

Для АОТ прямоугольной формы ( $a \approx c > b$ ) с двумя термостатами, расположенными на боковых гранях ( $a \times b$ ) пластины I (рис. 3), распределение температуры находится из общего уравнения теплопроводности (3) при прежних приближениях —

$$\xi^2 \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_0 \gamma}{\chi_{33}} e^{-\gamma(b-y)} = 0, \quad \beta_0^2 = \frac{\chi_{22}}{\chi_{33}}, \quad (69)$$

решение которого проводится в приближении  $\chi_{12} \ll \chi_{22}$  при граничных условиях

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=a} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=b} = 0,$$

$$T|_{z=0} = T_0, \quad T|_{z=c} = T_0 \quad (70)$$

и после косинус-преобразований Фурье [20] представляется в виде

$$T(y, z) = T_0 + \frac{q_0(e^{-\gamma b} - 1)}{2b\chi_{33}}(z^2 - cz) + \frac{2q_0\gamma^2}{b\chi_{22}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[(-1)^n - e^{-\gamma b}]}{\omega_n^2(\omega_n^2 + \gamma^2)} \times$$

$$\times \left[ 1 + \frac{\operatorname{sh}\left(\sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{33}}}\omega_n(z-c)\right) - \operatorname{sh}\left(\sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{33}}}\omega_n z\right)}{\operatorname{sh}\left(\sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{33}}}\omega_n c\right)} \right] \cos \omega_n y, \quad (71)$$

а его поперечная термоЭДС  $\varepsilon_1^{\downarrow}$  с учетом (7) и (9) [5] имеет вид

$$\varepsilon_1^{\uparrow} = \frac{4q_0\alpha_{12}}{\chi_{22}} \frac{a}{b^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(1+e^{-\gamma b})(\gamma b)^2}{(2k+1)^2 \pi^2 [(2k+1)^2 \pi^2 + (\gamma b)^2]} \times$$

$$\times \left\{ 1 + \frac{b}{(2k+1)\pi c} \sqrt{\frac{\chi_{33}}{\chi_{22}}} \frac{2 \left[ 1 - \operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{33}}}\frac{(2k+1)\pi c}{b}\right) \right]}{\operatorname{sh}\left(\sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{33}}}\frac{(2k+1)\pi c}{b}\right)} \right\}. \quad (72)$$

Для АОТ с односторонним боковым термостатированием (рис. 4) уравнение теплопроводности также представляется выражением (3). Решаемое при граничных условиях

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=a} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=b} = 0,$$

$$T|_{z=c} = T_0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad (73)$$

с помощью собственной функции задачи Штурма–Лиувилля при соответствующих граничных условиях с последующими преобразованиями и разложением в ряд Фурье [19, 20], оно позволяет получить следующее выражение распределения температуры:

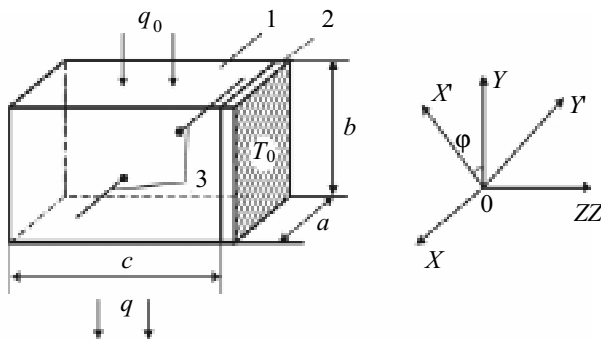


Рис. 4. Схема АОТ в случае термостатирования одной боковой грани:

1 — анизотропная пластина; 2 — термостат; 3 — электровыводы. Справа — лабораторная система координат XYZ и ориентация кристаллографических осей X'Y'Z' монокристаллической пластины 1

$$T(y, z) = T_0 + \frac{q_0(e^{-\gamma b} - 1)}{2\chi_{33}}(z^2 - c^2) +$$

$$+ \frac{2q_0\gamma^2}{b\chi_{22}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[(-1)^n - e^{-\gamma b}]}{\lambda_n^2(\lambda_n^2 + \gamma^2)} \left\{ 1 - \frac{\operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{33}}}\lambda_n z\right)}{\operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{33}}}\lambda_n c\right)} \right\} \cos \lambda_n y. \quad (74)$$

При этом поперечная термоЭДС  $\varepsilon_2^{\downarrow}$  такого АОТ согласно [5] имеет вид

$$\varepsilon_2^{\uparrow} = \frac{4q_0\alpha_{12}}{\chi_{22}} \frac{a}{b^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(1+e^{-\gamma b})(\gamma b)^2}{(2k+1)^2 \pi^2 [(2k+1)^2 \pi^2 + (\gamma b)^2]} \times$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{b}{(2k+1)\pi c} \sqrt{\frac{\chi_{33}}{\chi_{22}}} \operatorname{th}\left[\sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{33}}}\frac{(2k+1)\pi c}{b}\right] \right\}. \quad (75)$$

Аналогично предыдущим случаям, вольт-ваттные чувствительности АОТ с термостатированием одной и двух боковых граней представляются в следующем виде:

а) режим оптического пропускания ( $\gamma b \ll 1$ ) —

$$S_{01}^{\downarrow} = \frac{4\alpha_{12}}{\chi_{22}c} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2 - \gamma b}{(2k+1)^2 \pi^2 \left[ \frac{(2k+1)^2 \pi^2}{(\gamma b)^2} + 1 \right]} \times$$

$$\times \left\{ 1 + \frac{2b}{(2k+1)\pi c} \sqrt{\frac{\chi_{33}}{\chi_{22}}} \frac{1 - \operatorname{ch}\left[\sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{33}}}(2k+1)\pi c b^{-1}\right]}{\operatorname{sh}\left[\sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{33}}}(2k+1)\pi c b^{-1}\right]} \right\}; \quad (76)$$

$$(S_{01}^{\downarrow})' = \frac{4\alpha_{12}}{\chi_{22}c} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2 - \gamma b}{(2k+1)^2 \pi^2 \left[ \frac{(2k+1)^2 \pi^2}{(\gamma b)^2} + 1 \right]} \times$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{b}{(2k+1)\pi c} \sqrt{\frac{\chi_{33}}{\chi_{22}}} \operatorname{th}\left[\sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{33}}}(2k+1)\pi c b^{-1}\right] \right\}; \quad (77)$$

б) режим объемного поглощения ( $\gamma b \approx 1$ ) —

$$S_{02}^{\uparrow} = \frac{4\alpha_{12}}{\chi_{22}c} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1 + e^{-1}}{(2k+1)^2 \pi^2 [(2k+1)^2 \pi^2 + 1]} \times$$

$$\times \left\{ 1 + \frac{b}{(2k+1)\pi c} \sqrt{\frac{\chi_{33}}{\chi_{22}}} \frac{2 \left[ 1 - \operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{33}}}\frac{(2k+1)\pi c}{b}\right) \right]}{\operatorname{sh}\left(\sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{33}}}\frac{(2k+1)\pi c}{b}\right)} \right\}; \quad (78)$$

$$(S_{02}^{\uparrow})' = \frac{4\alpha_{12}}{\chi_{22}c} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1 + e^{-1}}{(2k+1)^2 \pi^2 [(2k+1)^2 \pi^2 + 1]} \times$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{b}{(2k+1)\pi c} \sqrt{\frac{\chi_{33}}{\chi_{22}}} \operatorname{th}\left[\sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{33}}}\frac{(2k+1)\pi c}{b}\right] \right\}; \quad (79)$$

в) режим поверхностного поглощения ( $\gamma b \gg 1$ ) —

$$S_{03}^{\uparrow \rightarrow} = \frac{4\alpha_{12}}{\chi_{22}^c} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(1+e^{-\gamma b})(\gamma b)^2}{(2k+1)^2 \pi^2 \left[ (2k+1)^2 \pi^2 + (\gamma b)^2 \right]} \times \left\{ 1 + \frac{b}{(2k+1)\pi c} \sqrt{\frac{\chi_{33}}{\chi_{22}}} \frac{2 \left[ 1 - \operatorname{ch} \left( \sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{33}}} \frac{(2k+1)\pi c}{b} \right) \right]}{\operatorname{sh} \left( \sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{33}}} \frac{(2k+1)\pi c}{b} \right)} \right\}; \quad (80)$$

$$(S_{03}^{\uparrow \rightarrow})' = \frac{4\alpha_{12}}{\chi_{22}^c} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(1+e^{-\gamma b})(\gamma b)^2}{(2k+1)^2 \pi^2 \left[ (2k+1)^2 \pi^2 + (\gamma b)^2 \right]} \times \left\{ 1 - \frac{b}{(2k+1)\pi c} \sqrt{\frac{\chi_{33}}{\chi_{22}}} \operatorname{th} \left[ \sqrt{\frac{\chi_{22}}{\chi_{33}}} \frac{(2k+1)\pi c}{b} \right] \right\}. \quad (81)$$

Численные оценки показали, что вольт-ваттная чувствительность АОТ с двухсторонним термостатированием боковых граней меньше вольт-ваттной чувствительности АОТ с односторонним. Также следует отметить, что АОТ с термостатированием боковых граней обладает значительно меньшей чувствительностью, чем АОТ с термостатированными рабочими гранями.

**Экспериментальные исследования АОТ**

Для оценки реальных возможностей АОТ исследовались их характеристики в режиме оптической прозрачности. Проведено сравнение теоретических расчетов и экспериментальных результатов, полученных по методике [13, 14]. В качестве источников лучистой энергии использовались газовые CO<sub>2</sub>-лазеры типа ЛГ22 и др. ( $\lambda_0=10,6$  мкм), гелий-неоновые лазеры ЛГ-36 ( $\lambda_0=1,06...3,36$  мкм), а также рубиновые лазеры ( $\lambda_0=0,53$  мкм), излучающие необходимые плотности лучистых потоков. Эта энергия корректировалась с помощью делителей мощности из монокристаллических CdTe, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и других материалов в виде круглых пластин диаметром 1,5—3,0 см различной толщины. Предварительная калибровка этих делителей осуществлялась на спектрографе ИКС-21 по уровню пропускания. Далее делители мощности вместе с испытуемым АОТ размещались в камере, термостатированной с помощью регулятора температуры при заданной температуре  $T=T_0$ . Величина термоЭДС исследуемых АОТ определялась при помощи цифрового микровольтметра типа В7-21.

Держатель образцов АОТ представляет собой цилиндрический корпус из меди, в центре которого размещен оптически прозрачный теплоотвод. Он выполняется из тех же материалов, что и делители мощности. Для увеличения оптического пропускания на грани теплоотвода и АОТ методом высокочастотного катодного распыления наносили просветляющие слои из CaF<sub>2</sub> соответствующей толщины. Предварительные оценки и испытания показали, что при теплоотводах из монокристаллов CdTe диаметром 3,0 см и толщиной 0,5 см проходящее излучение плотностью до 10<sup>3</sup> Вт/см<sup>2</sup> практически не вызывает искажений распределений температурного поля внутри объема АОТ.

АОТ выполнялись из материалов, параметры которых приведены в табл. 1 [22—24]. Оптимальный угол  $\phi$ , под которым ориентированы выбранные кристаллографические направления, составляет 45°.

Анализ экспериментальных результатов показал, что при соответствующих геометрических размерах АОТ и заданных параметрах его материалов зависимость между ЭДС  $\epsilon$  и плотностью падающей энергии  $q_0$  носит линейный характер. В случае проходящего излучения плотностью свыше 10<sup>3</sup> Вт/см<sup>2</sup> ( $\lambda=10,6$  мкм) и высоты АОТ из CdSb  $b=0,2$  см наблюдается отклонение от линейности, связанное с перегревом термоэлемента, и возрастание вследствие этого коэффициента оптического поглощения  $\gamma$  и поперечной термоЭДС  $\alpha_{12}$ . Проведенные оценки показывают, что в этом случае каждые 25 Вт проходящей мощности вызывают перегрев верхней грани АОТ на 1 К. Следует отметить, что значение ЭДС оптически просветленных АОТ превышает ЭДС непросветленных.

В некоторых случаях при больших плотностях проходящей энергии  $q_0$  и некачественной подготовке поверхности рабочей грани термоэлемента, а также при больших толщинах клеевых слоев, наблюдается значительный перегрев АОТ, приводящий к его разрушению.

В табл. 2 и 3 приведены параметры АОТ, работающих в режиме оптической прозрачности, в случае термостатирования рабочих и боковых граней. Данные таблиц соответствуют температуре  $T=300$  К.

Следует отметить, что созданные АОТ позволили контролировать лучистую энергию непосредственно в процессе выполнения различных информационно-технологических задач и впервые реализовали метод «прозрачной стенки» [12].

Изменение геометрии лучепреломляющих поверхностей АОТ и термостата, формы их поперечного сечения [21] привело к появлению устройств, позволяющих, наряду с регистрацией лучистых потоков, проводить необходимые энергоспектральные перерас-

Таблица 1

Характеристики материалов, используемых для АОТ

Материал	Область оптического пропускания, $\lambda$ , мкм	Коэффициент оптического поглощения, $\gamma$ , см <sup>-1</sup>	Коэффициент поперечной термоЭДС, $\Delta\alpha$ , мкВ/К	Коэффициент теплопроводности, $\chi$ , Вт/(см·К)	Коэффициент электропроводности, $\sigma$ , (Ом·см) <sup>-1</sup>
CdSb	2,6—40,0	0,1—0,3	100—300	1,5·10 <sup>-2</sup>	0,3
ZnSb	2,4—27,0	0,4—0,8	100—200	1,1·10 <sup>-2</sup>	0,5
CdAs <sub>2</sub>	1,25—16,0	0,5—1,0	250—450	3·10 <sup>-2</sup>	0,03
ZnAs <sub>2</sub>	1,36—21,0	0,8—1,2	180—360	6·10 <sup>-2</sup>	0,01
CdS	0,5—18,0	0,2—0,8	120—220	2·10 <sup>-2</sup>	0,6

Таблица 2  
 Параметры АОТ при термостатировании рабочей грани

Тип приемника	Материал термоэлемента	Материал термостата	$S_0$ , В/Вт	$q_{0max}$ , Вт·см <sup>-2</sup>	Размеры рабочих граней АОТ, см
АПП-1	CdSb	CdTe	$2 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^3$	0,3×0,3
АПП-2	CdSb	CdTe	$3 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^2$	1,0×1,0
АПП-3	CdAs <sub>2</sub>	CdTe	$3 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^3$	0,1×0,1
АПП-4	ZnAs <sub>2</sub>	CdTe	$0,8 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^4$	0,8×0,8
АПП-5	CdS	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^4$	0,5×0,5

Таблица 3  
 Параметры АОТ при термостатировании боковых граней

Тип приемника	Материал термоэлемента	Материал термостата	$S_0$ , В/Вт	$q_{0max}$ , Вт·см <sup>-2</sup>	Размеры рабочих граней АОТ, см
АПП-11	CdSb	Cu	$7 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^3$	0,3×0,3
АПП-32	CdAs <sub>2</sub>	Cu	$2 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^3$	0,1 × 0,1
АПП-36	CdS	Cu	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^4$	0,5 × 0,5

пределения. При этом возможно одновременное использование их в качестве конструктивных элементов — таких как выходные окна и фильтры различных излучателей.

**Выводы**

1. Определены ЭДС, КПД и вольт-ваттная чувствительность анизотропных оптикотермоэлементов при одномерном распределении температур. Показана возможность их работы в режимах оптического пропускания, объемного и поверхностного поглощений.

2. Анизотропия теплопроводности материала приводит к увеличению вольт-ваттной чувствительности АОТ в случае термостатирования нижней рабочей грани, и к ее уменьшению — в случае термостатирования верхней рабочей грани.

3. Термостатирование боковых граней АОТ ведет к уменьшению их вольт-ваттной чувствительности, однако при этом наблюдается минимальное искажение фазо-амплитудных характеристик регистрируемого излучения.

Рассмотренные АОТ впервые позволили предложить и реализовать метод «прозрачной стенки», предназначенный для регистрации лучистых потоков повышенной плотности в широком спектральном диапазоне.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Tomson W. On thermoelectric currents in linear conductors of crystallintidiens // Math. Phys. Papers.— 1882.— N 1.— P. 266—273.  
 2. Kohler M. Dependence of thermoelectric phenomena from crystalline orientation // Annal. Phys.— 1941.— Vol. 40.— N 13.— P. 243—249.  
 3. Анатыхчук Л. И., Лусте О. Я. Вихревые термоэлектрические токи и вихревые термоэлементы // ФТП.— 1976.— Т. 10, № 5.— С. 817—831.

4. Слипенченко В. Н., Снарский А. А. Влияние анизотропии теплопроводности на поперечную термоэдс // Там же.— 1974.— Т. 8, № 10.— С. 2010—2012.  
 5. Снарский А. А. ЭДС термоэлементов, использующих анизотропию термоЭДС. Анизотропные термоэлементы прямоугольной формы // Там же.— 1977.— Т. 11, № 10.— С. 2053—2055.  
 6. Ащеулов А. А., Беликов А. Б., Раренко А. И. Поперечная термоЭДС, обусловленная анизотропией теплопроводности // УФЖ.— 1983.— № 8.— С. 1226—1336.  
 7. Ащеулов А. А., Гуцул И. В., Раренко А. И. ЭДС и КПД анизотропного термоэлемента в случае учета анизотропии термоЭДС и теплопроводности//Там же.— 1997.— Т. 42, № 6.— С. 698—701.  
 8. Снарский А. А., Пальти А. М., Ащеулов А. А. Анизотропные термоэлементы // ФТП.— 1997.— Т. 31, № 11.— С. 1281—1298.  
 9. Ащеулов А. А., Гуцул И. В., Снарский А. А. Анизотропные оптикотермоэлементы / Докл. VII Межгос. семинара «Термоэлектрики и их применение». — С.-Петербург.— 2002.— С. 402—405.  
 10. Ащеулов А. А. Анизотропный радиационный термоэлемент для измерения проходной мощности // Оптико-механическая промышленность.— 1989.— № 12.— С. 47—49.  
 11. Гуцул И. В. Анизотропный оптикотермоэлемент в случае совпадения направлений лучистого потока и градиента температуры // УФЖ.— 1998.— Т. 43, № 10.— С. 1278—1281.  
 12. Ащеулов А. А., Гуцул И. В., Раренко А. И. Метод «прозрачной стенки» для контроля лучистых потоков различной мощности // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 1999.— № 2—3.— С. 33—36.  
 13. Ащеулов А. А., Пилат И. М., Раренко И. М. Влияние теплообмена на вольт-ваттную чувствительность АТ // Физ. электроники.— 1980.— № 21.— С. 98—100.  
 14. Ащеулов А. А. Физико-химические основы технологии оптических анизотропных термоэлектрических и оптикотермоэлектрических материалов из антимонида кадмия / Автореф. дис.: ... докт. техн. наук.— Черновцы: ЧГУ, 1994.  
 15. Ащеулов А. А., Кондратенко В. М., Пилявский Ю. Б., Раренко И. М. ЭДС АОТ в режиме оптического пропускания // ФТП.— 1984.— Т. 5, № 7.— С. 1330—1331.  
 16. Ащеулов А. А., Гуцул И. В., Раренко А. И. Анизотропный радиационный термоэлемент, действующий в режиме внутреннего отражения // Оптический журнал.— 1993.— № 4.— С. 78—79.  
 17. Ashcheulov A. A., Gutsul I. V. Anisotropic optical thermoelectric elements // J. of Thermoelectricity.— 1997.— N 3.— P. 81—89.  
 18. Лыков А. В. Теория теплопроводности.— М.: Высшая школа, 1967.  
 19. Ленюк М. П. Интегральные преобразования с раздельными переменными (Фурье, Ханкеля) / Препринт Ин-та математики 83.4.— Киев: Ин-т математики, 1983.  
 20. Ащеулов А. А., Гуцул И. В. Исследование распределения температуры анизотропной пластины с учетом ее оптических свойств // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2003.— № 6.— С. 49—50.  
 21. Ащеулов А. А., Охрем В. Г. Радиационный анизотропный оптикотермоэлемент с боковым термостатированием // Там же.— 2004.— № 1.— С. 45—47.  
 22. Ashcheulov A. A., Manik O. N., Marenkin S. F. Cadmium antimonide: chemical bonding and technology // Inorganic Materiale.— 2003.— Vol. 39, N 32.— P. 59—67.  
 23. Ащеулов А. А., Воронка Н. К., Маренкин С. Ф., Раренко И. М. Получение и использование оптимизированных материалов из антимонида кадмия // Неорг. материалы.— 1996.— Т. 32, № 9.— С. 1049—1060.  
 24. Маренкин С.Ф., Раухман А. М., Пищиков Д. И., Лазарев А. Б. Получение и свойства диарсенидов кадмия и цинка // Неорг. материалы.— 1992.— Т. 28, № 10.— С. 1813—1832.  
 25. Гуцул И. В. Явища електро- та теплопереносу у анізотропних напівпровідниках / Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук.— Черновцы: ЧНУ им. Ю. Федьковича, 2000.

К. т. н. И. В. ИВАНОВА

Россия, г. С.-Петербург, Северо-Западный гос. заочный  
 технический университет  
 E-mail: rilala\_spb@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
 20.05 2005 г.

Оппонент к. т. н. И. А. КИРЕЕВ  
 (ОНАС, г. Одесса)

## КЛАССИФИКАЦИЯ И СИНТЕЗ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ КОДЕКОВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

*Рассматриваются структуры кодеков. Показаны перспективы развития гибридной реализации кодека: временной кодер — гибридный декодер.*

Одна из наиболее трудных задач в технике передачи информации — обеспечение достаточной помехоустойчивости. Широкому распространению высокоэффективных помехоустойчивых кодов с обнаружением и исправлением ошибок препятствует сложность практической реализации устройств декодирования.

Различные типы кодов описаны в [1—8], их многообразии отражено на рис. 1.

Важным и широко используемым подмножеством кодов Боуза–Чоудхури–Хоквингема (БЧХ) являются коды Рида–Соломона. Это такие коды БЧХ, у которых мультипликативный порядок алфавита символов кодового слова делится на длину кода. Доказано [5], что не существует кода, у которого минимальное расстояние больше, чем у кода Рида–Соломона. Этот факт часто является определяющим для использования кода Рида–Соломона (РС). Коды РС всегда оказываются короче всех других циклических кодов над тем же алфавитом. Коды РС это такие коды БЧХ над полем Галуа  $GF(q)$ , длина которых  $n$  равна  $q-1$ . Они не только являются хорошей иллюстрацией кодов БЧХ, но и сами представляют значительный прак-

тический и теоретический интерес. На их основе удобно строить другие коды — либо используя только сами коды РС, например отображая их в двоичные, либо используя в каскадных кодах [1].

Процесс кодирования состоит в том, что наборы  $k$  информационных символов отображаются в кодовые последовательности, состоящие из  $n > k$  символов. Любое такое отображение будем называть  $(n, k)$ -кодом. Кодовое слово  $(n, k)$ -кода представляется в виде набора длиной  $n$ :  $(a_0, a_1, \dots, a_{n-1})$  или многочлена

$$f(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_{n-1}x^{n-1}.$$

Полиномиальный код можно определить как множество всех многочленов степени, не большей  $n-1$ , содержащее в качестве множителя некоторый фиксированный многочлен  $g(x)$ . Многочлен  $g(x)$  называется порождающим многочленом кода.

Ошибки в рассматриваемых кодах исправляются путем решения систем алгебраических уравнений.

Блочное кодирование состоит в том, что последовательность символов источника сообщений  $(a_1, a_2, \dots)$  разбивается на блоки, например по  $k$  символов в каждом:

$$\mathbf{a}_1 = (a_1, a_2, \dots, a_k), \mathbf{a}_2 = (a_{k+1}, a_{k+2}, \dots, a_{2k}), \dots$$

Кодер преобразует каждый входной  $k$ -блок  $\mathbf{a}_i$  в выходной  $n$ -блок

$$\mathbf{x}_i = x(\mathbf{a}_i) = (x_1(\mathbf{a}_i), \dots, x_n(\mathbf{a}_i))$$

таким образом, чтобы различным входным блокам соответствовали различные выходные ( $n=k$ ). Совокупность  $\mathbf{C}$  всех различных  $\mathbf{x}(\mathbf{a})$  называется блоковым кодом длины  $n$  и мощности  $M=q^k$ . Скорость кода в  $q$ -ичных единицах измерения

$$R = \lfloor \log_q M \rfloor / n = k/n.$$

Критерием качества кода является кодовое расстояние

$$d(x, y) = |x - y|,$$

определяющее способность кода исправлять ошибки [1—3, 8].

Любое линейное подпространство  $\mathbf{C}$  можно задать с помощью базиса из  $k$  линейно независимых векторов ( $l=k=n$ ), где  $k$  называют

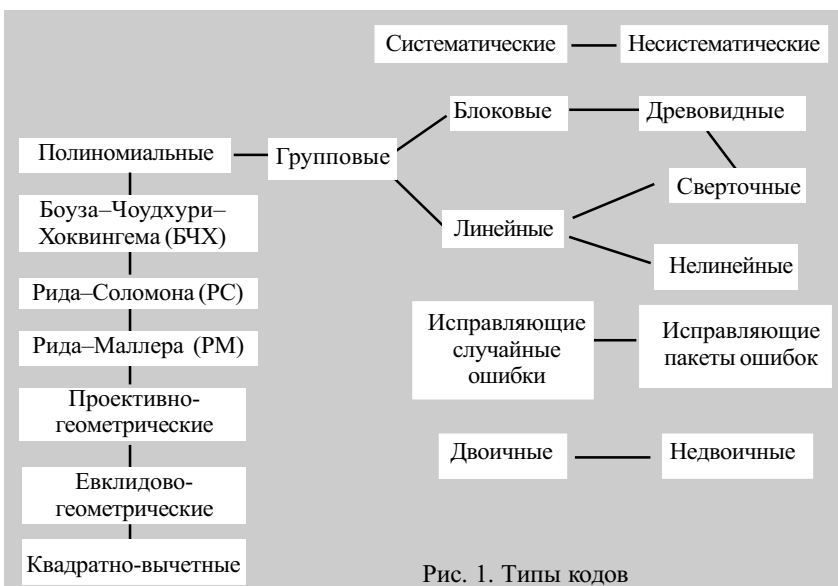


Рис. 1. Типы кодов

размерностью подпространства. *Линейным*  $(n, k)$ -кодом называют  $k$ -мерное линейное подпространство. Линейный код может быть задан порождающей матрицей кода:

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1n} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{k1} & g_{k2} & \dots & g_{kn} \end{bmatrix}$$

Тогда кодовый вектор имеет вид  $g = aG$ .

Линейный код можно определить как множество решений

$$gH^T = 0,$$

где  $H$  — проверочная матрица кода  $GH^T = 0$ .

Современное состояние теории линейных кодов отражено в [1, 5–8]. Совокупность векторов  $U = (u_0, u_1, \dots, u_{n-1})$  образует циклический  $(n, k)$ -код, если все соответствующие многочлены  $u(x) = u_0 + u_1x + \dots + u_{n-1}x^{n-1}$  содержат в качестве корней  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ .

Пусть  $g(x)$  содержит серию последовательных корней  $\beta^b, \beta^{b+1}, \beta^{b+\delta-2}$ , где  $\beta$  — примитивный корень, т. е.  $\beta^n = 1, \beta^s \neq 1, s < n$ . Код, порождаемый этим многочленом, называется кодом Боуза–Чоудхури–Хоквингема (БЧХ-кодом), для него  $k \geq n - m(\delta - 1)$  и  $d \geq \delta$ . Как уже было отмечено, важным частным случаем БЧХ-кодов являются коды Рида–Соломона (РС), которые имеют следующие параметры:  $n = q - 1, k = n - d + 1, d = \delta$ . Таким образом, коды РС являются разделимыми с максимальным расстоянием (достигается равенство  $d \leq n - k + 1$ ).

Интерес к этому классу линейных кодов обусловлен вышеуказанными причинами, а также тем, что он используется в конструкциях обобщенных каскадных кодов [9, 10] для исправления многократных пакетов ошибок и имеет эффективный алгебраический метод декодирования.

Известно [9], что код РС над полем  $GF(q)$  — это код, состоящий из всех слов  $(f_0, f_1, \dots, f_{n-1})$  длины  $n$ , для которых выполняются  $d - 1$  уравнений

$$\sum_{i=0}^{n-1} f_i \alpha_i^m = 0, f_i \in GF(q), m_0 \leq m \leq m_0 + d - 2, \quad (1)$$

где  $m_0$  и  $d$  — произвольные целые числа (не больше  $n$ );  $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{n-1}$  — различные ненулевые элементы поля  $GF(q)$  (локаторы  $i$ -й позиции слова).

Принадлежность кодов РС к классу максимальных кодов следует из свойств его проверочной матрицы:

$$\begin{bmatrix} \alpha_0^{m_0} & \alpha_1^{m_0} & \dots & \alpha_{n-1}^{m_0} \\ \alpha_0^{m_0+1} & \alpha_1^{m_0+1} & \dots & \alpha_{n-1}^{m_0+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_0^{m_0+r-1} & \alpha_1^{m_0+r-1} & \dots & \alpha_{n-1}^{m_0+r-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \alpha_0 & \alpha_1 & \dots & \alpha_{n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_0^{r-1} & \alpha_1^{r-1} & \dots & \alpha_{n-1}^{r-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_0^{m_0} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_1^{m_0} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \alpha_{n-1}^{m_0} \end{bmatrix},$$

где  $r = n - k$ .

Любые  $r$  столбцов матрицы  $H$  линейно независимы и образуют матрицу Вандермонда. Отсюда следует, что для любого заданного набора локаторов и любых значений  $k$  символов кодового слова система

линейных уравнений над  $GF(q)$  имеет единственное решение относительно оставшихся  $r = n - k$  неизвестных, которое может быть найдено, например, методом Гаусса.

Циклический код РС состоит из всех многочленов степени меньше  $n$  над  $GF(q)$ , корнями которых являются элементы  $\{\beta^{m_0+i}\}, i = 0, r - 1$ , где  $\beta \in GF(q), \beta^n = 1$  и  $n$  кратно  $q - 1$ . Это свойство циклических кодов РС интересно тем, что оно позволяет определить сам код и его декодирование в терминах преобразования Фурье над конечным полем. Выбирая подходящую систему обозначений, можно показать, что вычислительные задачи, составляющие основу приложений методов контроля ошибок, — это те же вычисления сверток, преобразований Фурье и обратный теплицевых систем уравнений, хотя и в другой числовой системе, называемой полем Галуа [11].

Порождающим многочленом  $(n, k, d)$ -кода РС называется многочлен степени  $(d - 1)(\deg(d - 1))$ :

$$g(x) = (x - \beta^{m_0})(x - \beta^{m_0+1}) \dots (x - \beta^{m_0+d-2}).$$

Проверочным называется многочлен степени  $k$ , удовлетворяющий условию

$$h(x)g(x) \equiv 0 \pmod{x^n - 1}.$$

Пусть  $(u_0, u_1, \dots, u_{n-1})$  — принятая последовательность символов на выходе дискретного канала, где  $u_i = f_i + e_i, f_i$  — символ кодового слова и  $e_i \in GF(q)$  — значения ошибок. Обнаружение ошибок состоит в проверке условий (1) для принятого слова. Назовем синдромом вектор  $(S_0, S_1, \dots, S_{d-2})$ , где

$$S_j = \sum_i u_i \alpha_i^{m_0+j}, j = 0, d - 2. \quad (2)$$

Одним из методов декодирования кодов РС является декодирование по максимуму правдоподобия, которое состоит в решении следующей задачи: для заданного  $u$  найти слово  $f \in C$ , максимизирующее условную вероятность  $P(u/f)$  [12].

Рассмотрим алгебраический метод декодирования  $(n, k, d)$ -кода РС, исправляющего любые комбинации ошибок веса не более  $(d - 1)/2$ . Пользуясь определением синдрома (2), можно построить многочлен

$$S(x) = \sum_{j=0}^{r-1} S_j x^j = \sum_{j=0}^{r-1} x^j \sum_{i=0}^{n-1} e_i \alpha_i^{m_0+j},$$

где  $r = n - k$ .

Производя некоторые преобразования [7], приходят к уравнению, которое обычно называют ключевым уравнением:

$$S(x)\sigma(x) \equiv \omega(x) \pmod{x^r},$$

где  $\sigma(x)$  — многочлен локаторов ошибок;  $\deg \sigma(x)$ , если  $t < r$ ;  
 $\omega(x)$  — многочлен значений ошибок;  $\deg \omega(x) < \deg \sigma(x)$ .

Решение ключевого уравнения можно искать с помощью алгоритмов Евклида или Берлекэмп–Мессис. Алгоритм Евклида для произвольной пары  $(a, b)$  целых чисел (или многочленов) дает решение уравнения

$$aQ + bP = d,$$

где  $d$  — наибольший общий делитель (НОД) пары  $(a, b)$  [7].

На практике для решения ключевого уравнения обычно используется алгоритм Берлекэмп–Мессис, который синтезирует минимальный регистр с обрат-

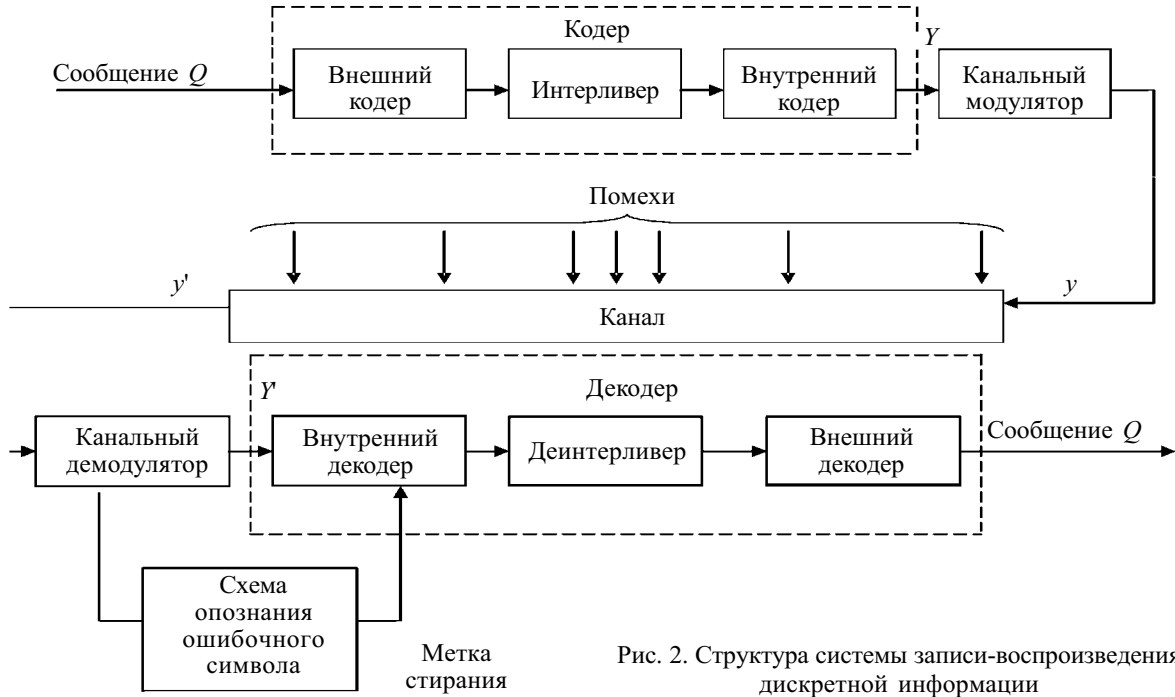


Рис. 2. Структура системы записи-воспроизведения дискретной информации

ной связью, порождающий заданную последовательность символов [3].

Обобщенная структура системы записи-воспроизведения цифровой информации (на диске, полупроводниковом запоминающем устройстве) приведена на рис. 2. Кодер преобразует сообщение  $Q$  в кодовое слово  $V$ , которое подвергается канальной модуляции. В системах записи-воспроизведения цифровой информации модулятор представляет собой логическую комбинационную схему, задача которой — преобразование кодовых символов.

Декодер исправляет стирания и ошибки, если их число не нарушает условия

$$d \geq 2\tau + v + 1,$$

где  $d$  — кодовое расстояние кода;  
 $\tau$  — число стираний;  
 $v$  — число ошибок.

Повысить кодовое расстояние  $d$  кода можно при каскадировании. Кодер и декодер на рис. 2 изображены двухкаскадными [9, 10, 13].

В качестве кодов в обоих каскадах целесообразно использовать коды Рида–Соломона над полем  $GF(2^n)$ .

Как отмечалось выше, кодировать и декодировать РС-коды над бесконечными полями можно во временной и в частотной областях. Сказанное справедливо и для конечных полей.

Обобщенные структуры кодеров и декодеров изображены на рис. 3—6.

Кодирование во временной области осуществляется с помощью порождающей матрицы или порождающего полинома. В этом случае кодирование может быть как несистематическим, так и систематическим. В частотной области кодирование всегда несистематическое.

Особенность временного декодера (рис. 4) — раздельное вычисление позиций и величин ошибок. Для этого приходится решать: а) степенное уравнение ло-

каторов; б) систему линейных уравнений относительно величин стираний (после того как найдены позиции ошибок, последние переходят в разряд стираний).

Частотное декодирование (рис. 5) не требует решения указанных уравнений, т. к. позволяет непосредственно найти спектр  $E$  конфигурации ошибок, вычисляемый как продолжение синдрома (ганкелевой матрицы). Недостаток данной структуры — невозможность косвенного контроля выделенного сообщения  $Q$ , т. к. ошибка в блоке преобразования Фурье–Мэттсона–Соломона (ФМС) не может быть обнаружена и исправлена без повторных ФМС-преобразований аналогичными блоками.

Гибридная структура на рис. 6 согласуется с временным кодером. Рекуррентное продолжение характерно для частотного декодирования. Далее осуществляется обратное ФМС-преобразование синдрома

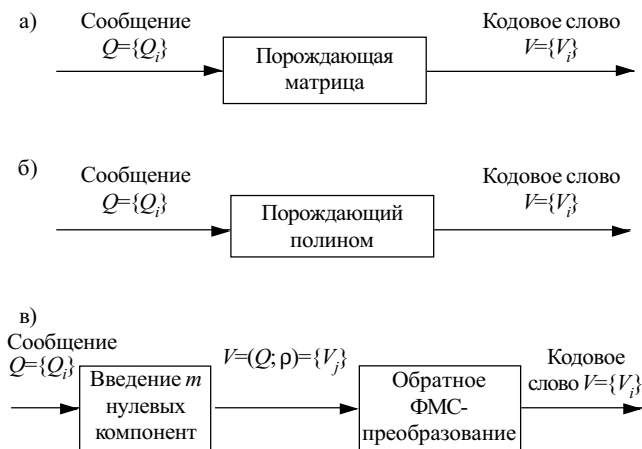


Рис. 3. Обобщенные структуры кодеров РС-кодеров: во временной области — линейного (а) и циклического (б); в частотной области — в;  $i=1, 2, \dots, k; j=1, 2, \dots, n=k+m; \rho=(0\dots 0)m$  нулей

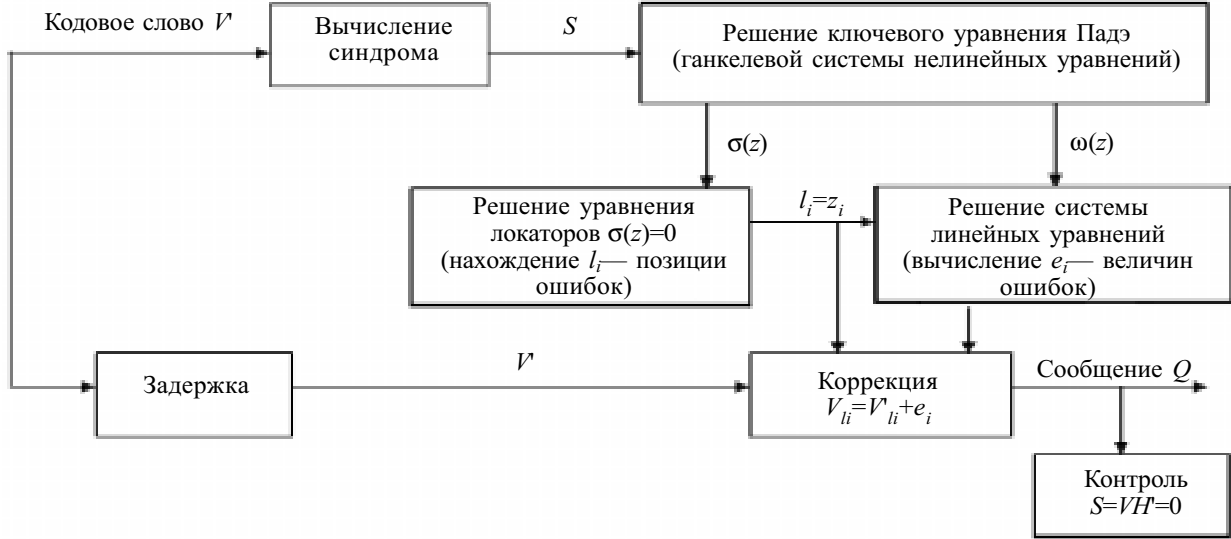


Рис. 4. Временная структура декодеров:

$$S=(S_0, S_1, \dots, S_{m-1}); C=(C_0, C_1, \dots, C_k, \dots, C_{n-1}); E=(E_0, E_1, \dots, E_k, \dots, E_{n-1}); C_k=S_0=E_k, C_{k+1}=S_1=E_{k+1}, \dots, C_{n-1}=S_{m-1}=E_{n-1}$$

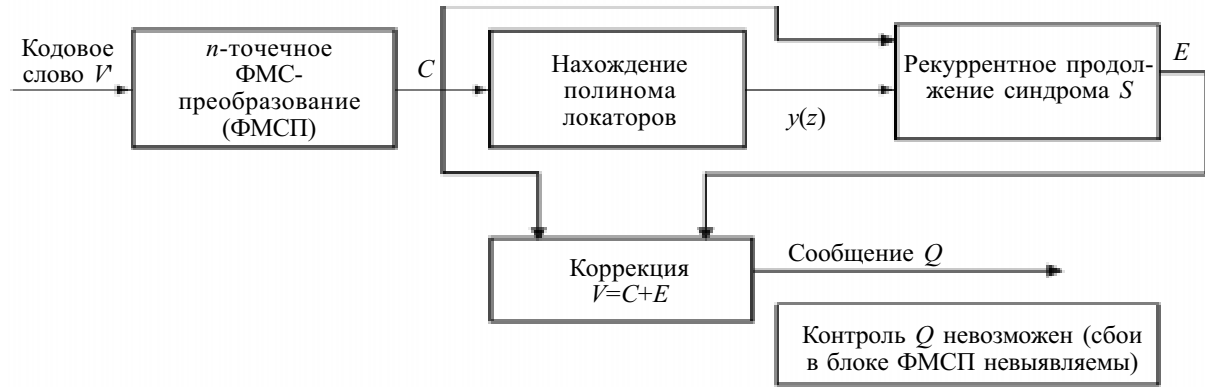


Рис. 5. Структурная схема частотного декодирования:

$$S=(S_0, S_1, \dots, S_{m-1}); C=(C_0, C_1, \dots, C_k, \dots, C_{n-1}); E=(E_0, E_1, \dots, E_k, \dots, E_{n-1}); C_k=S_0=E_k, C_{k+1}=S_1=E_{k+1}, \dots, C_{n-1}=S_{m-1}=E_{n-1}$$

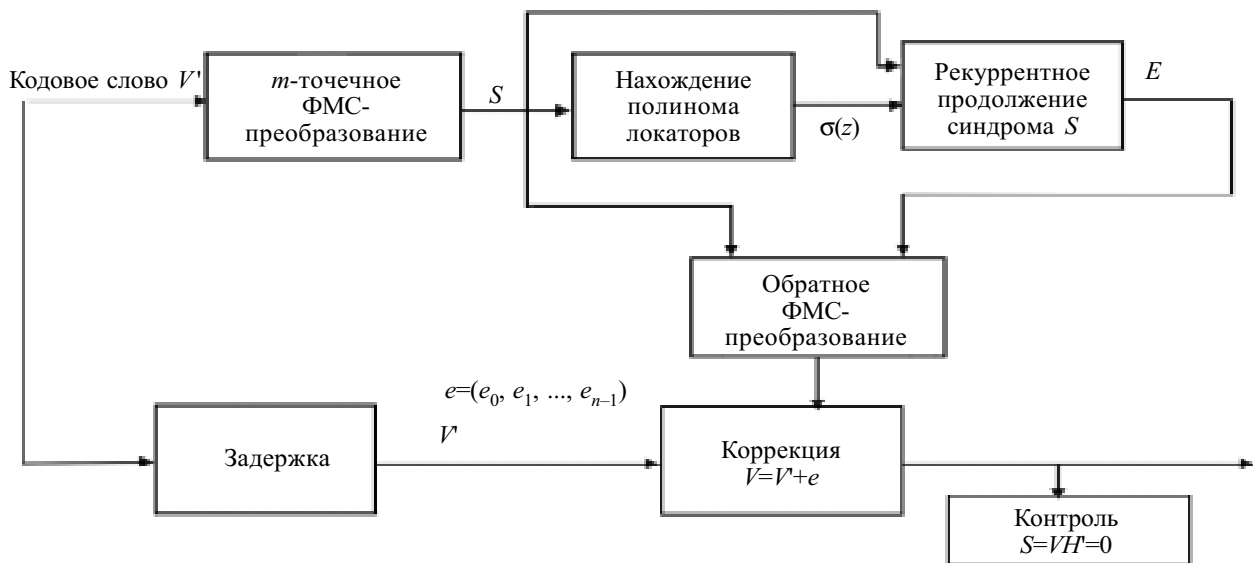


Рис. 6. Гибридная (частотно-временная) структура декодеров:

$$S=(S_0, S_1, \dots, S_{m-1}); C=(C_0, C_1, \dots, C_k, \dots, C_{n-1}); E=(E_0, E_1, \dots, E_k, \dots, E_{n-1}); C_k=S_0=E_k, C_{k+1}=S_1=E_{k+1}, \dots, C_{n-1}=S_{m-1}=E_{n-1}$$

$S$ , удлинённого его продолжением  $C$ , что даёт временной вектор  $e$  ошибок.

Исследования [5—7, 11] показали, что наиболее перспективна именно смешанная реализация кодера: временной кодер — гибридный декодер; причём для прямого и обратного ФМС-преобразования могут быть использованы быстрые алгоритмы.

\*\*\*

Упрощение схемной реализации позволяет широко использовать высокоэффективные помехоустойчивые коды с обнаружением и исправлением ошибок. Внедрение таких устройств приведёт к повышению вероятности обнаружения ошибок в системах автоматизированной обработки данных.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Мак-Вильямс Ф. Дж., Слоэн Н. Дж. А. Теория кодов, исправляющих ошибки.— М.: Связь, 1979.
2. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки.— М.: Мир, 1976.

3. Берлекэмп Э. Алгебраическая теория кодирования.— М.: Мир, 1971.

4. Блох Э. Л., Зяблов В. В. Обобщённые каскадные коды: алгебраическая теория и сложность реализации.— М.: Связь, 1976.

5. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролируемых ошибки.— М.: Мир, 1986.

6. Кларк Дж., Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи.— М.: Радио и связь, 1987.

7. Габидулин Э. М., Афанасьев В. Б. Кодирование в радиоэлектронике.— М.: Радио и связь, 1986.

8. Теория кодирования / Т. Касами, Н. Токура, Е. Ивадари, Я. Инагаки.— М.: Мир, 1978.

9. Форни Д. Каскадные коды.— М.: Мир, 1970.

10. Блох Э. Л., Зяблов В. В. Линейные каскадные коды.— М.: Наука, 1982.

11. Блейхут Р. Э. Алгебраические поля, обработка сигналов, контроль ошибок // ТИИЭР.— 1985.— Т. 73, № 5.— С. 30—53.

12. Евсеев Г. С. К вопросу о сложности декодирования линейных кодов / Тр. V Междунар. симп. по теории информ. Ч. I.— Москва—Тбилиси.— 1979.— С. 139—141.

13. Морелос—Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение.— М.: Техносфера, 2005.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

**Денисенко А. Н. Сигналы. Теоретическая радиотехника. (Справочное пособие.)— М.: Горячая линия—Телеком, 2005.— 704 с.**

В достаточно сжатой и приемлемой для инженерной и исследовательской практики форме обобщены и достаточно полно изложены методы анализа детерминированных сигналов (часть 1) и случайных сигналов и шумов (часть 2), используемые в теоретической радиотехнике. В каждом разделе теоретическая часть заканчивается расчетными выражениями и примерами расчета по ним.

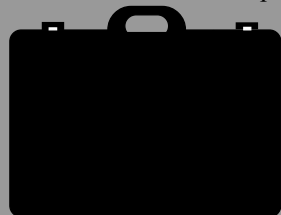
Для инженеров и исследователей, работающих в области радиотехники, преподавателей, студентов старших курсов радиотехнических факультетов вузов, аспирантов.



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

- Сетевая система контроля технологического процесса выращивания полупроводниковых кристаллов и тонких пленок. (Украина, г. Черновцы)
- Некоторые вопросы проектирования микросхем широкополосных усилителей. (Украина, г. Киев)
- Моделирование амплитудно-частотных характеристик электромеханических фильтров с использованием метода электромеханических аналогий. (Украина, г. Алчевск)
- Установка для регенерации сорбентов в электромагнитном поле. (Украина, г. Харьков)
- Состояние и перспективы развития метода ионно-плазменного, магнетронного распыления материалов в вакууме применительно к микро- и нанoeлектронике. (Грузия, г. Тбилиси)
- Методы синдромного декодирования кодов Рида—Соломона, основанные на вычислениях особых продолжений ганкелевых матриц. (Россия, г. Санкт-Петербург)
- Экспериментально-расчетная методика определения характеристик встречнообратновключенных переходов. (Узбекистан, г. Ташкент)
- Использование термозащитных пленочных покрытий на основе AlN в электронной технике. (Россия, г. Москва, г. Пермь)
- Зависимость свойств толстопленочных терморезисторов от состава базовой шпинеи. (Украина, г. Львов, г. Дрогобыч)
- Плазмохимическое травление эпитаксиальных структур нитрида галлия. (Украина, г. Киев; Россия, г. Москва)
- Проектирование трансформаторов для балансных кольцевых смесителей. (Украина, г. Киев)
- Измерение толщины покрытий с помощью емкостных датчиков. (Россия, г. Рыбинск)
- Принципиально новая технология изготовления элементов узлов систем связи и навигации. (Украина, г. Днепропетровск)
- Широкополосные трансформаторы для интегральных схем в технологии LTCC. (Украина, г. Киев)

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



К. т. н. В. Ф. МИРГОРОД, к. т. н. Г. С. РАНЧЕНКО

Украина, г. Одесса, ОАО «Элемент»  
E-mail: element@farlep.net

Дата поступления в редакцию  
28.04 2005 г.

Оппонент д. т. н. Ю. А. ДОЛГОВ  
(Приднестровский гос. ун-т  
им. Т. Г. Шевченко, г. Тирасполь)

## ТРЕНДОВЫЕ СТАТИСТИКИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

*Выполнена оценка вероятностных характеристик критерия Хальда–Аббе для обнаружения тренда при статистической обработке данных в системах технической диагностики.*

Решение общей проблемы повышения эффективности систем технической диагностики (СТД) РЭА, наряду с совершенствованием аппаратных средств, обусловлено необходимостью повышения надежности статистических выводов о техническом состоянии объектов диагностики. Важной практической задачей диагностики является расширение возможностей реализуемых систем, охватывая не только традиционный допусковой контроль, но и прогнозные оценки изменения контролируемых параметров на основе измеренных их значений в виде временных рядов, что составляет предмет одной из областей прикладной статистики — трендового анализа.

Трендовый анализ является в настоящее время функционально необходимой частью алгоритмического обеспечения СТД, позволяя определить факт необратимого изменения состояния диагностируемых объектов (задачи обнаружения «разладки» [1]), оценить параметры возникшей тенденции к изменению контролируемых параметров и дать прогнозную оценку их возможного состояния [2, 3].

Предлагаемые критерии наличия тренда в данных (Хальда–Аббе [4], кумулятивных сумм [1], Спирмена [3], Фишера [5, 6] и др.) отличаются разнообразием и предоставляют возможность выбора при практической реализации. В то же время применение указанных критериев при анализе реальных временных рядов зачастую не дает положительных результатов вследствие несоблюдения условий их корректного использования. Общее условие, накладываемое на исходные данные, — о принадлежности выборки к генеральной совокупности некоррелированных нормально распределенных случайных величин — практически невозможно проверить при реализации трендовых статистик. Поэтому необходимо определить факторы, влияющие на эффективность и условия корректного применения тех или иных статистик тренда при решении прикладных задач диагностики.

Целью настоящего исследования является оценка вероятностных характеристик одного из наиболее широко применяемых для обнаружения тренда кри-

терия Хальда–Аббе при анализе реальных временных рядов в системах технической диагностики.

Критерий Хальда–Аббе формулируется в задачах обнаружения тренда в виде статистики

$$r = \left[ 2 \sum_{k=1}^N (y_k - \bar{y})^2 \right]^{-1} \sum_{k=1}^N (y_{k+1} - y_k)^2 > r_0, \quad (1)$$

где  $y_k$  — исследуемый временной ряд;

$\bar{y}$  — выборочное среднее,

$$\bar{y} = N^{-1} \sum_{k=1}^N y_k;$$

$r_0$  — пороговое значение критерия.

Опорной гипотезой  $H_0$  является предположение об отсутствии тренда. При ее выполнении статистика (1) обычно [4, с. 237] формируется в виде

$$r' = 0,5 \cdot \ln[(2-r)/r] > r'_0 \quad (2)$$

и, согласно [4], при  $N > 10$  нормализуется с дисперсией  $Dr' = 1/(N-3)$ . Поэтому уровни принятия гипотезы  $H_0$  легко устанавливаются по их значимости  $\alpha$  для обычно применяемых в диагностике  $\alpha = 0,01$ ;  $0,05$ .

Например, для применяемых значений  $N = 20$  эти уровни составляют  $r'_{0,01} = 0,6306$ ;  $r'_{0,05} = 0,4729$ .

Анализируя выражение для статистики (1), нетрудно убедиться, что критерий Хальда–Аббе сводится к известному [6, 7] критерию некоррелированности выборки. Действительно, функционал (1) преобразуется к виду

$$r = \left[ 2 \sum_{k=1}^N (y_k - \bar{y})^2 \right]^{-1} \sum_{k=1}^N [(y_{k+1} - \bar{y}) - (y_k - \bar{y})]^2 =$$

$$= \left[ 2 \sum_{k=1}^N (y_k - \bar{y})^2 \right]^{-1} \left[ \sum_{k=1}^N (y_{k+1} - \bar{y})^2 + \sum_{k=1}^N (y_k - \bar{y})^2 - \right.$$

$$\left. - 2 \sum_{k=1}^N (y_{k+1} - \bar{y})(y_k - \bar{y}) \right] =$$

$$= 1 - \hat{\rho} + \sum_N, \quad (3)$$

где  $\hat{\rho} = \rho_{k,k+1}$  — выборочный коэффициент корреляции между отсчетами, имеющий распределение [6, с. 640]

$$f(\rho, \hat{\rho}) = \left[ (N-2)/\pi \right] (1-\rho^2)^{\frac{N-1}{2}} (1-\hat{\rho}^2)^{\frac{N-4}{2}} \times$$

$$\times \int_0^1 \frac{\lambda^{N-2} d\lambda}{(1-\rho\hat{\rho}\lambda)^{N-1} \sqrt{1-\lambda^2}} \quad (4)$$

со средним  $M\hat{\rho}=\rho+0(1/N)$  и дисперсией

$$D\hat{\rho} = (1-\rho^2)^2 / N + 0(1/N^{3/2}).$$

Собственно с  $r$ -критерием в прикладной статистике [6, 7] связывается важный частный случай плотности (4) при  $\rho=0$  (гипотеза некоррелированности), при котором (4) приобретает вид

$$f(0, \hat{\rho}) = \frac{\Gamma\left(\frac{N-1}{2}\right)}{\pi \Gamma\left(\frac{N-2}{2}\right)} (1-\hat{\rho}^2)^{\frac{N-4}{2}}, \quad (5)$$

где  $\Gamma(\chi)$  — гамма-функция.

Соотношение  $r = 1 - \hat{\rho}$  справедливо с точностью до случайной добавки

$$\Sigma_N = (y_{N+1}^2 - y_1^2) / 2 \sum_{k=1}^N (y_k - \bar{y})^2,$$

имеющей двухстороннее распределение Фишера с плотностью

$$f(\Sigma_N) = N(N/2)^{N/2} \frac{\Gamma\left(\frac{N+2}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{N}{2}\right)} \left(1 + \frac{N^2}{2} \Sigma_N\right)^{-\frac{N+2}{2}}, \quad (6)$$

средним и модой, равными нулю, и дисперсией

$$D_{\Sigma_N} = N / (N-2)^2 (N-4).$$

По отношению к распределению (4) указанное распределение (6) является  $\delta$ -образным, поэтому плотность суммы выборочного коэффициента корреляции и случайной величины  $\Sigma_N$  в виде свертки указанных плотностей совпадает с (4) — по крайней мере до тех пор, пока отношение дисперсий  $D_{\Sigma_N} / D_{\hat{\rho}}$  является малой величиной. Нетрудно видеть, что для рассматриваемого частного случая  $\rho=0$  это отношение имеет порядок  $0(1/N)$ , следовательно, влиянием  $\Sigma_N$  можно пренебречь.

Соответственно нормализуемый критерий (2) согласно (3) переходит в известный [6, 8] критерий оценки значимости выборочного коэффициента корреляции

$$r' = 0,5 \cdot \ln[(2-r)/r] = -0,5 \cdot \ln[(1-\hat{\rho})/(1+\hat{\rho})] = z, \quad (7)$$

который при  $N > 10$  распределен приблизительно нормально [6, с. 641] с центром и дисперсией

$$Mz = 0,5 \cdot \ln[(1-\rho)/(1+\rho)] + \rho/2(N-1); D_z = 1/(N-3).$$

Таким образом, критерий Хальда–Аббе практически не отличается от известного критерия некоррелированности соседних отсчетов выборки. Следовательно, когда отвергается опорная гипотеза  $H_0$  об отсутствии тренда согласно классической формулировке критерия, тем самым отвергается гипотеза о некоррелированности выборки. Однако в практических приложениях указанные гипотезы не равносильны.

Действительно, коррелированность выборки может быть обусловлена как физическими явлениями в объекте диагностирования, так и фильтрацией данных в из-

мерительном канале, что вовсе не предполагает наличие тренда. Если отвлечься от моделей изменения параметров объекта диагностики, то необходимая операция фильтрации данных однозначно превращает исследуемую выборку в коррелированную, при этом в предположении о некоррелированности исходных (нефильтрованных) данных справедливо соотношение

$$\rho = h(\Delta t),$$

где  $h(\Delta t)$  — значение импульсной переходной функции фильтра на интервале дискретизации  $\Delta t$ .

При учете динамики объекта диагностики и/или высокочастотной цифровой фильтрации в измерительном канале априорное значение коэффициента корреляции положительно —  $\rho > 0$ . Согласно (7) происходит смещение уровня решающей статистики в сторону установленного порога и, соответственно, рост уровня ложных тревог о наличии тренда. Например, для выборки с  $N=20$  и уровня значимости  $\alpha=0,05$  при априорном значении  $\rho=0,3$ , признаваемым [9, с. 78] малозначимым, происходит рост уровня ложных тревог в три раза — до  $\alpha=0,15$ .

Применяемая предварительная обработка с целью исключения скрытых периодичностей временного ряда [3] сопровождается режекторной цифровой фильтрацией, для которой характерно  $h(\Delta t) < 0$ . В этом случае согласно (7) уровень решающей статистики смещается в противоположную от порога сторону, что сопровождается повышением вероятности пропуска трендового участка выборки. Коррекция порогового уровня возможна только в том случае, если известен априорный коэффициент корреляции, т. к. оценка выборочного коэффициента корреляции на короткой выборке имеет низкую достоверность и сводится к той же статистике (7).

Априорный коэффициент корреляции, таким образом, должен быть определен до применения процедуры трендового контроля путем построения диагностической модели исследуемого процесса в объекте и тщательной оценки метрологических характеристик измерительного канала.

Не менее важным фактором, влияющим на эффективность трендовых статистик, в том числе исследуемой Хальда–Аббе, является возможное отличие исходной выборки от гауссовской. Анализ типовых измерительных каналов [9] показывает, что распределения ошибок измерения зачастую имеют существенно негауссовский характер, а при использовании методов косвенных измерений негауссовский характер выборки является скорее правилом, чем исключением.

Если исследуемая выборка имеет плотность распределения, отличную от нормальной, то соответственно нет основания полагать, что статистика (1) совпадает с  $r$ -статистикой, а статистики (2), (7) близки к нормальному распределению, и уровни значимости критериев выбраны правильно.

Разнообразие распределений ошибок различных измерительных каналов [9] не позволяет получить аналитические соотношения для искомых распределений трендовых статистик, поэтому для оценки влияния этого фактора использован метод статистического моделирования в интерактивной среде MATLAB

[10]. При таком моделировании использовались выборки из нормальной генеральной совокупности, которая подвергалась нелинейному преобразованию, и на полученной негауссовской выборке тестировались статистики (1), (2). Совместному анализу подвергались гистограммы исходной выборки и значений решающих статистик, а также значения выборочных моментов до четвертого порядка включительно.

Как это установлено в результате численных экспериментов, наиболее существенное влияние на уровень значимости критериев тренда оказывает асимметрия распределения выборки, что выражается в росте вероятностей ошибок первого и второго рода.

Из проведенных исследований и результатов численного моделирования следуют предлагаемые выводы и рекомендации.

1. Эффективность критериев тренда, в частности Хальда–Аббе, существенно зависит от статистических свойств тестируемой выборки — справедливости гипотез о некоррелированности и принадлежности к нормальной генеральной совокупности, надежность которых целесообразно установить в результате предварительного анализа данных.

2. Для повышения достоверности статистических выводов об отсутствии тренда необходимо предварительное построение диагностических моделей исследуемого процесса, например в виде АРСС-моделей [11], а также тщательная оценка метрологических свойств измерительного канала, включая алгоритмы цифровой фильтрации данных и оценку вероятностных характеристик ошибок измерений.

3. Для предварительной оценки возможностей использования одной из статистик тренда целесообразно определить общие статистические свойства (тип статистической модели) исследуемого временного ряда на основе одного из критериев Фишера [5, 6], либо процедуры Кохрейна [12].

4. Подтверждение надежности статистических выводов по нормализуемым статистикам тренда может

быть получено лишь при достаточном объеме собственной трендовой статистики, в частности, для уровня значимости  $\alpha=0,05$  такой объем составляет  $N_y \geq 80$ , а для  $\alpha=0,01$  соответственно  $N_y \geq 400$  [9, с. 43].

Перспективы дальнейших исследований в направлении повышения эффективности трендовых статистик в системах технической диагностики РЭА заключаются в обосновании реалистичных статистических моделей исследуемых временных рядов для конкретных прикладных задач диагностики.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Жигалевский А. А., Красковский А. Е. Обнаружение разладки случайных процессов в задачах радиотехники.— Л.: Изд. Ленинград, ун-та, 1988.
2. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей.— М.: Финансы и статистика, 1985.
3. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы.— М.: Мир, 1982.
4. Епифанов С. В., Кузнецов В. И., Богаенко И. И. и др. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей.— К.: Техника, 1998.
5. Кармалита В. А., Лобанов В. Э. Точность результатов автоматизированного эксперимента.— М.: Машиностроение, 1992.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров.— М.: Наука, 1973.
7. Бендат Дм., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных.— М.: Мир, 1989.
8. Математическая статистика / Под ред. В. С. Зарубина и А. П. Крищенко.— М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002.
9. Новицкий П. В., Заграф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений.— Л.: Энергоатомиздат, 1985.
10. Дьяконов В. П. MATLAB 6/6.1/6.5+Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя.— М.: Солон-пресс, 2002.
11. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя.— М.: Наука, 1991.
12. Cochran I. H. How big is the random walk in GNP // Journal of Political Economy.— 1998.— N 96.— С. 893—920.

#### ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

## ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОНИКИ НА ЗАКАЗ



3 ноября 2005 г., Санкт-Петербург, отель «Коринтия Невский палас»

Конференция призвана дать возможность получить большой объем полезной информации, установить отношения с руководителями и инженерами ведущих российских дизайн-центров, обсудить вопросы организации разработок с российскими и зарубежными коллегами, познакомиться с представителями государственных и крупных корпоративных заказчиков электроники, помочь российским компаниям в решении следующих задач:

- разработка уникальной продукции;
- внедрение новых технологий;
- сокращение времени выхода новых продуктов на рынок;
- эффективное использование интеллектуального потенциала.

**ОРГКОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ:**

тел/факс: (095) 741-7701; 741-7702; e-mail: conf@ecomp.ru; www.elcp.ru

К. х. н. В. Я. МИХАЙЛОВСКИЙ, к. х. н. Л. Т. СТРУТИНСКАЯ,  
Е. В. ЧАЙКОВСКАЯ

Украина, г. Черновцы, Институт термоэлектричества  
E-mail: vimot@bk.ru

Дата поступления в редакцию  
05.04.2005 г.

Оппонент д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН  
(НТУ "Львовская политехника", г. Львов)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

*Предложена аналитическая модель термоэлектрического генератора (ТЭГ) на газовом топливе с водяным охлаждением. Описан метод оптимизации ТЭГ с учетом его функционального назначения.*

Благодаря последним достижениям в области разработки термоэлектрических материалов и систем [1, 2] возобновился интерес к применению термоэлектричества для генерирования электрической энергии. Преимущества термоэлектрических систем — отсутствие подвижных частей, бесшумная работа, перспективы экологической чистоты и возможности рекуперации отработанной тепловой энергии — усиливают эту заинтересованность. Необходимость разработок совершенных термоэлектрических систем с целью получения максимальной электрической мощности и КПД повышает важность методов компьютерного моделирования таких систем.

В работе [3] представлена аналитическая модель термоэлектрического генератора (ТЭГ), работа которого основана на принципе встречных потоков теплоносителей. Она позволяет прогнозировать рабочие характеристики генератора и влияние некоторых рабочих параметров на характеристики ТЭГ. Авторы работ [1, 4] решают задачи проектирования ТЭГ с учетом особенностей их применения с низкопотенциальными источниками тепла [5], для которых главная цель — надежность, а не КПД. Задача оптимизации конструктивных параметров решается авторами [2, 6] при моделировании термоэлектрических устройств с высокой плотностью энерговыделения, в которых использована тепловая изоляция. В приведенных работах термогенераторы рассматриваются только как источники электрической энергии.

Практически отсутствуют публикации работ, в которых комплексно исследовались бы термоэлектрические системы тепловой и электрической энергии с учетом рациональных конструктивных решений, функционального назначения, в том числе в условиях автономного использования. Вместе с тем когенерационные системы могут иметь широкое практическое использование. Комбинированное производство тепловой и электрической энергии позволяет увеличить коэффициент полезного использования теплотворной способности топлива до 90%. При этом себестоимость производства электроэнергии снижается в 2—2,5 раза [7].

Целью данной работы является построение аналитической модели термоэлектрической системы генерирования тепловой и электрической энергии, оптимизация энергетических характеристик ТЭГ.

### Физическая модель

Физическая модель термоэлектрического генератора тепла и электричества приведена на рис. 1.

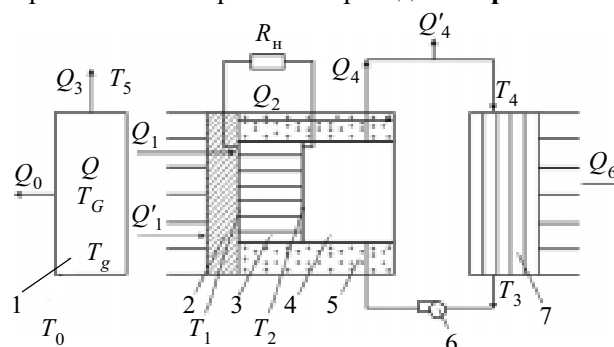


Рис. 1. Физическая модель генератора с водяным охлаждением: 1 — источник тепла; 2 — горячий радиатор; 3 — термоэлектрическая батарея; 4 — холодный жидкостный радиатор; 5 — изоляция; 6 — циркуляционный насос; 7 — холодный воздушно-жидкостный радиатор

Источником тепла в данной модели ТЭГ является химическая реакция горения пропан-бутановой смеси с выделением тепловой мощности  $Q$ :

$$Q = gG, \quad (1)$$

где  $g$  — расход топлива;

$G$  — теплотворная способность топлива.

Тепло  $Q_1$  от источника тепла 1 к горячему радиатору 2 передается конвективным путем и излучением:

$$Q_1 = \varepsilon \sigma_0 (T_G^4 - T_1^4) S_{wr} + \alpha_w (T_G - T_1) S_{wr}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  — эффективная степень черноты системы "источник тепла — горячий радиатор";

$\sigma_0$  — постоянная Стефана-Больцмана;

$T_G$  — средняя температура горячих газов в системе "источник тепла — горячий радиатор";

$T_1$  — температура горячего радиатора;

$S_{wr}$  — площадь теплопринимающей поверхности горячего радиатора;

$\alpha_w$  — коэффициент конвективного теплообмена между горячим газом и поверхностью горячего радиатора.

Для выбранного типа и конструкции источника тепла потери на его элементах составляют около 3%, т. е.

$$Q_0 = 0,03Q. \quad (3)$$

Часть генерированного тепла  $Q_3$  отводится в окружающую среду с продуктами реакции горения  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и азотом воздуха, который необходим для горения топлива:

$$Q_3 = Q_{\text{CO}_2} + Q_{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{N}_2};$$

$$Q_{\text{CO}_2} = c_{p1}(T_5 - T_0)g \cdot 3;$$

$$Q_{\text{H}_2\text{O}} = [c_{p2}(T_5 - 100) + \lambda' + c_{p3}(100 - T_0)]g \cdot 1,615;$$

$$Q_{\text{N}_2} = c_{p0}(T_5 - T_0)g \cdot 17,25 - c_{p4}(T_5 - T_0)g \cdot 3,624, \quad (4)$$

где  $c_{p0}, c_{p1}, c_{p2}, c_{p3}, c_{p4}$  — значения теплоемкости соответственно воздуха,  $\text{CO}_2$ , водяного пара, воды и кислорода;

$T_5$  — температура продуктов сгорания на выходе из горячего радиатора;

$T_0$  — температура окружающей среды;

$\lambda'$  — удельная теплота парообразования воды;

коэффициенты 3 и 1,615 определяют соответственно массовые доли  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , которые получаются при сгорании единицы массы пропан-бутановой смеси, а коэффициенты 17,25 и 3,624 — соответственно массу воздуха и кислорода.

Полезное тепло  $Q_1$  передается от горячего радиатора 2 к термоэлектрической батарее (ТЭБ) 3 теплопроводностью.

На элементах конструкции термопреобразователя теряется часть тепла  $Q_2$ :

$$Q_2 = \frac{\lambda_n S}{L}(T_1 - T_2), \quad (5)$$

где  $\lambda_n$  — теплопроводность изоляционного материала;

$S$  — площадь теплоотдающей поверхности горячего радиатора, которая не занята модулями;

$L$  — толщина слоя теплоизоляции;

$T_2$  — температура холодной стороны ТЭБ.

Тепловой поток  $Q_1$  устанавливается в зависимости от разности температур  $T_1 - T_2$  на спаях ТЭБ, которая, согласно закону Зеебека, генерирует ЭДС. В замкнутой цепи на нагрузке  $R_n$  выделяется электрическая мощность  $P$ , причем

$$Q_1 = P + Q_4. \quad (6)$$

Тепло  $Q_4$  отводится от ТЭБ потоком воды, которая циркулирует в жидкостном радиаторе 4:

$$Q_4 = g_b c_{p3}(T_4 - T_3), \quad (7)$$

где  $g_b$  — расход воды;

$T_3, T_4$  — значения температуры воды на входе и на выходе радиатора, соответственно.

Тепло, которое передается жидкостным радиатором 4,

$$Q_5 = \alpha_c S_{wt}(T_2 - T_0), \quad (8)$$

где  $\alpha_c, S_{wt}$  — соответственно коэффициент теплообмена и площадь теплопринимающей поверхности холодного жидкостного радиатора.

В рассматриваемой модели ТЭГ  $Q_6$  — это тепло, рассеиваемое в окружающую среду воздушно-жидкостным радиатором 7:

$$Q_6 = \alpha_{\text{эф}} \left( \frac{T_3 + T_4}{2} - T_0 \right) S_r, \quad (9)$$

где  $\alpha_{\text{эф}}$  — эффективный коэффициент теплоотдачи для воздушно-жидкостного радиатора в условиях свободной конвекции воздуха;

$T_3, T_4$  — соответственно значения температуры воды на выходе и входе радиатора;

$S_r$  — площадь теплоотдающей поверхности.

Величина  $Q_1$  для ТЭГ заданной электрической мощности получена исходя из мощности  $P'$  одного стандартного модуля при определенных температурах горячей  $T_1$  и холодной  $T_2$  сторон ТЭБ, его КПД  $\eta'$  и количества модулей  $n$ :

$$Q_1(T_1, T_2) = n \frac{P'(T_1, T_2)}{\eta'(T_1, T_2)}. \quad (10)$$

Температурные зависимости электрических параметров стандартных модулей А-1061, которые использованы в данной модели ТЭГ, приведены в [8].

Вариант ТЭГ, рассматриваемый в данной работе, содержит ТЭБ, которая состоит из 24 модулей, соединенных последовательно-параллельно для обеспечения электрического напряжения не менее 12 В и выходной электрической мощности не менее 100 Вт.

КПД термогенератора

$$\eta = \frac{Q_1}{Q} \eta'. \quad (11)$$

График функции  $\eta(T_1, T_2)$  приведен на рис. 2.

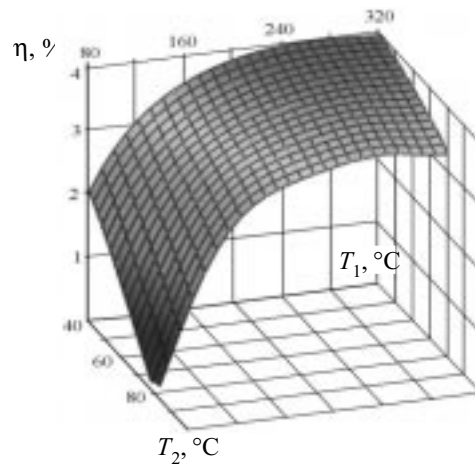


Рис. 2. Зависимость КПД термоэлектрического генератора от значений температуры горячей и холодной сторон термоэлектрической батареи

Из рис. 2 видно, что при  $T_1 = 280^\circ\text{C}$  и  $T_2 = 40^\circ\text{C}$  максимальное значение КПД термоэлектрического генератора может достигать 4%. При этом максимальная электрическая мощность составляет 151 Вт при  $Q = 3767$  Вт. (Минимальный расход топлива составляет 295 г/ч.)

#### Алгоритм расчета

Общая методика расчета термоэлектрической системы генерирования тепловой и электрической энергии должна учитывать:

- генерирование тепла или общий тепловой поток от источника тепла;
- способ подведения тепла к термоэлектрическим модулям;
- способ отвода тепла от термоэлектрических модулей и его дальнейшее использование (например для обогрева помещений);
- потери тепла с продуктами сгорания, которые отводятся в окружающую среду;
- потери тепла на элементах конструкции источника тепла и термопреобразователя;
- генерирование максимальной исходной электрической мощности с учетом затрат электрической энергии на принудительную циркуляцию теплоносителя.

В основу алгоритма расчета и оптимизации термоэлектрического генератора положена система уравнений теплового баланса, которая отвечает выбранной модели:

$$\begin{cases} Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 + Q_3; \\ Q_1 = Q_4 - Q_2; \\ Q_1 = P + Q_4; \\ Q_4 = Q_5; \\ Q_4 = Q_6 + Q_4, \end{cases} \quad (12)$$

где  $Q_4$  — потери тепла в системе "холодная сторона ТЭБ — воздушно-жидкостный радиатор".

Примем, что  $T_1 \leq 320^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C} < T_2 < 80^\circ\text{C}$ , температура горячего радиатора  $T_1$  равна температуре горячей стороны ТЭБ.

Основные исходные данные для расчета ТЭГ:

- температура окружающей среды  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ;
- теплотворная способность топлива  $G = 10,95$  ккал/г;
- эффективная степень черноты системы "источник тепла — горячий радиатор"  $\varepsilon = 0,3$ ;
- площадь поверхности горячего радиатора, покрытая изоляцией,  $S = 0,14$  м<sup>2</sup>;
- толщина слоя изоляции  $L = 27$  мм;
- теплопроводность изоляционного материала  $\lambda_{\text{и}} = 0,1$  Вт/(м·К).

Дополнительно должны быть заданы:

- расход топлива  $g$ ;
- коэффициент конвективного теплообмена горячего радиатора  $\alpha_w$ ;
- площадь теплопринимающей поверхности горячего радиатора  $S_{wr}$ ;
- коэффициент теплообмена между поверхностью холодного жидкостного радиатора и циркуляционной водой  $\alpha_c$ ;
- эффективный коэффициент теплоотдачи для воздушно-жидкостного радиатора в условиях свободной конвекции  $\alpha_{\text{эф}}$ ;
- площадь теплопринимающей поверхности холодного жидкостного радиатора  $S_{wp}$ ;
- площадь поверхности холодного воздушно-жидкостного радиатора  $S_p$ ;
- электрическая мощность, необходимая для работы циркуляционного насоса,  $P_p$ .

Такие исходные данные полностью определяют систему подвода и отвода тепла в термоэлектрическом генераторе, т. е. система уравнений (12) позволяет однозначно определить значения  $T_1, T_2, T_3, T_4$  и  $T_5$ .

Температура горячих газов на входе в горячий радиатор определяется по формуле

$$T_g = \frac{A}{B}, \quad (13)$$

где

$$A = 0,97 \cdot G \cdot 1,163 + T_0 \cdot (3 \cdot c_{p1} + 17,25 \cdot c_{p0}(T_g) - 3,624c_{p4}) - 1,615[\lambda'(T_g) + c_{p3}(T_g) \cdot (100 - T_0)];$$

$$B = 3 \cdot c_{p1} + 17,25 \cdot c_{p0}(T_g) - 3,624c_{p4} + 1,615c_{p2}(T_g),$$

все остальные обозначения такие же, как и в (4).

Средняя температура горячих газов в системе "источник тепла — горячий радиатор" определяется как

$$T_G = (T_g + T_5)/2.$$

Для полноты решения задачи система должна быть дополнена уравнениями для определения исходной электрической мощности ТЭБ

$$P = \eta Q = \eta' Q_1 \quad (14)$$

и электрической мощности термогенератора  $P_B$  с учетом мощности, необходимой для работы циркуляционного насоса  $P_p$ :

$$P_B = P - P_p. \quad (15)$$

### Результаты расчета ТЭГ

Описанный выше алгоритм и приведенные исходные данные легли в основу разработки компьютерной программы расчета термоэлектрического генератора тепловой и электрической энергии с оптимальными характеристиками.

Главная задача сводится к определению условий максимизации КПД, т. е. получения максимальной электрической мощности при минимальном расходе топлива. Определим  $\eta$  как функцию  $T_1$  и  $T_2$  и найдем ее максимум.

Поскольку  $T_1$  и  $T_2$  в значительной мере определяют расходом топлива  $g$ , т. е. тепловой мощностью источника тепла  $Q$ , были исследованы зависимости КПД, общей электрической мощности термогенератора и расхода топлива от отношения  $T_1/T_2$ . Температуры изменяли в пределах:  $250^\circ\text{C} < T_1 < 320^\circ\text{C}$ ;  $55^\circ\text{C} < T_2 < 75^\circ\text{C}$ .

Из рис. 3 видно, что максимум КПД 3,65% термогенератора достигается при  $T_1/T_2 = 3,9$ , при этом общая электрическая мощность составляет 127 Вт.

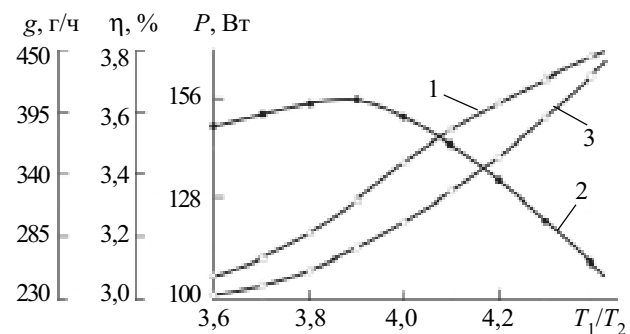


Рис. 3. Зависимость мощности (1), КПД (2), расхода топлива (3) от соотношения температур горячей и холодной сторон ТЭБ

Разработанная программа решения системы уравнений теплового баланса (12) позволила рассчитать зависимости  $\alpha_c, \Delta T$  и  $\eta_p$  от расхода воды в холодном контуре ( $\Delta T = T_4 - T_3$ ,  $\eta_p$  — КПД термогенератора с учетом мощности, необходимой для работы циркуляционного насоса).

Из рис. 4 видно, что зависимость  $\eta_p(g_B)$  имеет экстремальный характер, т. е. рациональным диапазоном значений расхода воды для выбранной модели ТЭГ является 300—400 л/ч. В результате расчетов при  $g_B = 350$  л/ч получены значения  $\eta = 3,7\%$ ,  $P = 129$  Вт.

Электрическая мощность, КПД термогенератора и тепловой КПД устройства в целом существенно зависят от температуры холодной стороны термоэлемента.

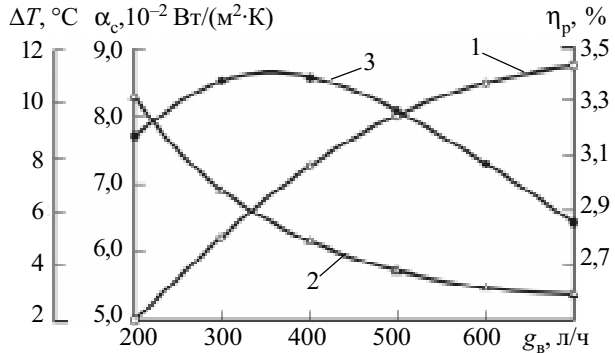


Рис. 4. Зависимости  $\alpha_w$  (1),  $\Delta T$  (2),  $\eta_p$  (3) от расхода воды в холодном контуре

реи. При эксплуатации ТЭГ для обеспечения необходимого теплового режима в помещении температура батареи для рассеяния тепла будет колебаться от 40 до 80°C. Из рис. 5 видно, что в таком случае электрическая мощность ТЭГ будет изменяться в пределах 118,7—142,6 Вт, а КПД — от 3,4 до 4,1%.

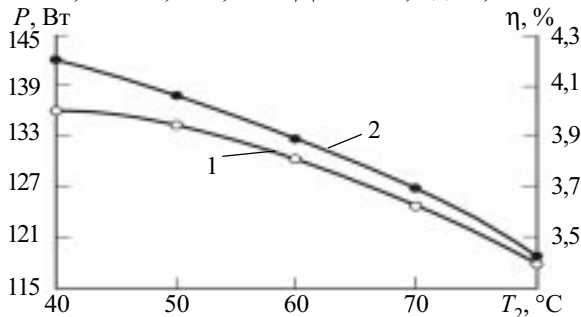


Рис. 5. Зависимость КПД (1) и электрической мощности (2) ТЭГ от температуры холодной стороны ТЭБ

Дальнейшие расчеты проводили для температуры  $T_2=65^\circ\text{C}$  как наиболее целесообразной с точки зрения практической эксплуатации систем отопления.

Один из путей повышения КПД термогенератора — это снижение температуры  $T_5$  продуктов сгорания. В системе с конвективным теплообменом этого достигают увеличением поверхности теплообмена горячего радиатора. КПД источника тепла при этом [9, с. 199]

$$\eta_T = \frac{T_g c_p (T_g) - T_1 c_p (T_1)}{T_g c_p (T_g) - T_0 c_p (T_0)}, \quad (17)$$

где  $c_p(T)$  — теплоемкость продуктов сгорания при соответствующей температуре.

Максимум КПД будет при условии  $d\eta/dT_1=0$ . Решение этого уравнения дает оптимальное значение температуры теплопринимающей поверхности горячего радиатора, которая составляет  $T_1=285^\circ\text{C}$ . При этом  $T_5=T_1$ . Количество топлива, которое необходимо для осуществления такого режима, составляет  $g=275$  г/ч.

Зависимости  $\eta_E$ ,  $\eta_T$  и  $\eta$  от  $T_1$  приведены на рис. 6 ( $\eta_E$  — КПД термоэлектробатареи).

Как видно из рисунка, максимальные значения КПД составляют: для термогенератора  $\eta=3,85\%$ , для ТЭБ  $\eta_E=5,2\%$ , для источника тепла  $\eta_T=74\%$ .

С целью получения максимальной электрической мощности при фиксированном общем количестве тепла ( $Q=\text{const}$ ) необходимо найти такое соотношение коэффициентов теплообмена  $\alpha_w$  и  $\alpha_c$ , при котором дости-

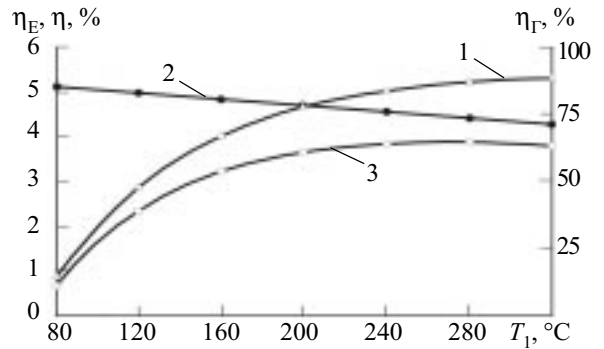


Рис. 6. Зависимости  $\eta_E$  (1),  $\eta_T$  (2) и  $\eta$  (3) от  $T_1$

гается максимальный КПД термогенератора. Расчеты показали, что для этого значения коэффициентов теплообмена должны находиться в следующих пределах:  $\alpha_w=4,5\dots 6,0$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $\alpha_c=650\dots 850$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). КПД ТЭГ при этом составляет 4,5%, электрическая мощность — 156 Вт, а тепловой КПД  $\eta_T$  достигает 89%.

\*\*\*

Таким образом, разработана аналитическая модель термоэлектрического генератора тепла и электричества на газовом топливе с водяным охлаждением. Она позволяет оптимизировать условия работы термогенератора с учетом его функционального назначения. Получено, что КПД термогенератора выбранной конструкции может достигать 4,5%, а тепловой КПД устройства в целом — 89%.

Построенная модель может быть использована для дальнейших разработок термогенераторов на органическом топливе, включая моделирование различных конфигураций теплообменных систем.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Bell L. E. Alternate thermoelectric thermodynamic cycles with improved power generation efficiencies / 22nd International Conference on Thermoelectrics.— France.— 2003.— P. 558—562.
2. Diller R. W., Chang Y. Experimental results confirming improved performance of systems using thermal isolation / Proceedings 21st International Conference on Thermoelectrics.— Long Beach, USA.— 2002.— P. 558—562.
3. Mathiprakasham B., Sutikno T., Beeson J. Analytical model for predicting the performance of thermoelectric generators // 14th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion.— Arlington, USA.— 1982.— P. 61—66.
4. Diller R. W., Bell L. E. Experimental results confirming improved efficiency power generation systems with alternate thermodynamic cycles / 22nd International Conference on Thermoelectrics.— France.— 2003.— P. 571—573.
5. Matsuura K., Rowe D.M., Koumoto K. Design optimization for a large scale, low temperature thermoelectric generation / 11th International Conference on Thermoelectrics.— Arlington, USA.— 1992.— P. 10—16.
6. Crane D. T. Modeling high-power density thermoelectric assemblies which use thermal isolation / 23rd International Conference on Thermoelectrics.— Adelaide, Australia.— 2004.— P. 86—92.
7. Клименко В. Н. Проблемы когенерационных технологий в Украине // Промышленная теплотехника.— 2001.— Т. 23, № 4.— С. 106—110.
8. Михайловский В. Я. Термоэлектрический генератор тепловой и электрической энергии // Термоэлектричество.— 2004.— № 2.— С. 81—87.
9. Котырло Г. К., Лобунец Ю. Н. Расчет и конструирование термоэлектрических генераторов и тепловых насосов.— Киев: Наукова думка, 1980.

И. А. ИВАНЧЕНКО, В. И. САНТОНИЙ, Л. М. БУДИАНСКАЯ

Украина, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова  
E-mail: deep\_night@rambler.ru

Дата поступления в редакцию  
24.10 2004 г. — 10.02 2005 г.

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

## ДИСТАНЦИОННЫЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ДАТЧИК С РАСТРОВОЙ РЕШЕТКОЙ

*Координатный метод в дистанционном оптико-электронном датчике увеличил точность измерения расстояния, а растровая решетка добавила функцию измерения скорости движения.*

Точность измерений дальности дистанционным оптико-электронным датчиком по амплитуде отраженного сигнала определяется статистическим диапазоном нескольких параметров — таких как коэффициент отражения поверхности объекта, нестабильность состояния среды распространения излучения и пр. Если диапазон изменений не описан, то погрешность измерения, определяемая только разбросом коэффициента отражения (0,04...0,89 для естественных и искусственных поверхностей) может быть значительной [1, с. 52]. Поэтому амплитудный метод дальнометрии применяется в системах, не требующих высокой точности измерений (охранных, слежения и т. п.). Априорная неопределенность условий работы такого дистанционного датчика делает весьма актуальной проблему повышения точности дистанционной дальнометрии.

Во многих случаях важно измерение скорости движения. Оценку скорости можно производить по измерениям дальности путем дифференцирования координат положения. Однако предпочтительно выявить возможности прямого измерения скорости, поскольку при определении скорости через дифференцирование во многих случаях увеличиваются погрешности от помех [2].

Целью настоящей работы является исследование применимости в дистанционных оптико-электронных датчиках координатных методов для решения задач уменьшения погрешности измерения дистанции и растровых методов анализа движущегося изображения для расширения функциональных возможностей датчика путем добавления функции измерения скорости сближения с отражателем.

Дистанционный оптико-электронный датчик (ОЭД) представляет собой отражательный оптрон с открытым оптическим каналом. Принцип измерения дальности в нем основан на проекционно-геометрических соотношениях в системе "излучатель-отражатель-приемник". Предлагаемый датчик относится к числу устройств, использующих базовый метод измерения расстояния до объекта по положению светового пятна на поверхности фотоприемного элемента [3, с. 139].

Световой поток на входе фотоприемника  $\Phi$  подчиняется закону обратных квадратов расстояний  $l$  [4, с. 90]:

$$\Phi = \tau_c^{2l} \tau_o \rho L A_{\text{вх}} A_2 / l^2, \quad (1)$$

где  $\tau_c$  и  $\tau_o$  — коэффициент пропускания среды и оптических систем, соответственно;

$\rho$  — коэффициент отражения поверхности;

$L$  — яркость излучателя;

$A_{\text{вх}}$  — площадь входной апертуры приемника;

$A_2$  — площадь светового пятна на отражательной поверхности.

При амплитудном методе регистрации дальности относительная погрешность ее измерения, связанная с разбросом  $\rho$ , определяется как [1, с. 49]

$$\Delta l = \frac{l_\phi \left[ (\rho_{\text{max}} / \rho_{\text{min}})^{1/2} - 1 \right]}{2}, \quad (2)$$

где  $l_\phi$  — фиксированная дальность;

$\rho_{\text{max}}, \rho_{\text{min}}$  — максимальное и минимальное значения коэффициента отражения поверхности.

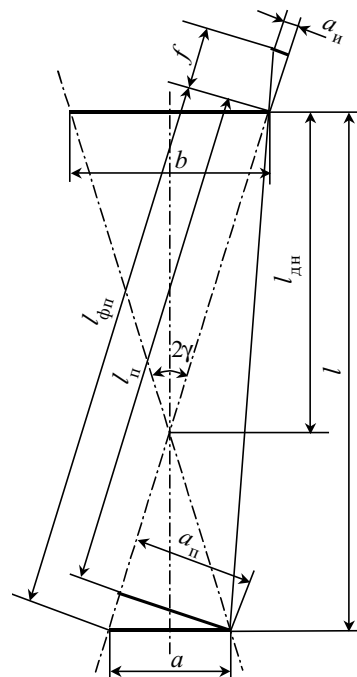


Рис. 1. Оптико-геометрическая модель базового датчика:

$b$  — измерительная база;  $l_{\text{дн}}$  — дальность настройки;  $l_{\phi\text{н}}$  — удаленность фотоприемника;  $l$  — удаленность проекции светового пятна;  $2\gamma$  — угол пересечения оптических осей излучателя и фотоприемника;  $f$  — фокусное расстояние приемного объектива;  $a$  — расстояние между осями излучателя и фотоприемника на отражательной поверхности;  $a_n$  — проекция светового пятна в пространстве предметов;  $a_n$  — координата центра светового пятна в фокальной плоскости приемного объектива

В характерном для естественных и искусственных поверхностей диапазоне  $\Delta\rho=0,04\dots 0,89$  относительная погрешность достигает величины  $\Delta l=1,858 l_{\phi}$ .

Оптико-геометрическая модель ОЭД приведена на рис. 1. Основой ее является базовый метод, при котором с изменением дистанции происходит линейное смещение сфокусированного светового пятна по поверхности приемника. При этом траектория перемещения фокального пятна лежит в одной плоскости и практически параллельна базовой линии при малых ( $<5^\circ$ ) углах пересечения оптических осей излучателя и приемника, а направление его смещения радиальное (при сближении — от центральной оси датчика).

Перемещение изображения исследуемой поверхности имеет место при ее сканировании, а в отсутствие сканирующих устройств объясняется процессом самосканирования [5], характерным, например, для радиолокационных станций бокового обзора, применяемых в движущихся летательных аппаратах [2]. Анализ перемещения изображения, связанного с движением ОЭД относительно поверхности, позволит ввести в алгоритм его работы дополнительную функцию измерения скорости.

Зависимость координаты центра  $a_{\text{и}}$  светового пятна на фоточувствительной площадке приемника от дистанции  $l$  до объекта и других оптико-геометрических параметров ОЭД, обозначенных на рис. 1, имеет вид [6]

$$a_{\text{и}} = \frac{bf(l-l_{\text{дн}})}{l \cdot l_{\text{дн}} - b \cdot \text{tg}\gamma(l-l_{\text{дн}})} \quad (3)$$

Поскольку в соответствии с выражением (3) измеряемая дальность  $l$  определяется координатой центра  $a_{\text{и}}$  фокального светового пятна на чувствительной поверхности фотоприемника, то, в отличие от амплитудного метода, здесь абсолютная погрешность измерений дальности  $\Delta l$  приблизительно равна  $\Delta a_{\text{и}}$  — размерам фокального пятна, зависящим от аберрационных свойств оптической системы фотоприемника. В системах с высокой степенью коллимации световых потоков размеры кружка рассеяния не превышают  $10^{-3}$  мм [7], что можно считать пределом точности координатного метода. Это значит, что при измерении даже малых дистанций (0...10 м) достижима относительная погрешность менее 1%. То есть в координатном методе точность регистрации дальности обеспечивается за счет выбора оптической схемы датчика, а к амплитуде сигнала предъявляется лишь требование обеспечения уровня обнаружения сигнала.

Расчетная зависимость координаты изображения  $a_{\text{и}}$  от дальности  $l$  для макета датчика с  $b=75$  мм,  $l_{\text{дн}}=70$  см,  $f=50$  мм приведена на рис. 2 (кривая 1). Изменение графика  $a_{\text{и}}(l)$  с изменением одного из расчетных параметров показано на кривых 2 ( $l_{\text{дн}}=60$  см), 3 ( $b=85$  мм) и 4 ( $f=40$  мм).

Из уравнения (1) и данных рис. 2 следует, что при величине  $l=l_{\text{дн}}$  значение  $a_{\text{и}}=0$ , что соответствует совмещению центра изображения с фокусом объектива. Длина траектории сканирования фокального пятна в диапазоне дистанций 20...100 см составляет от 13 до 16 мм для расчетных значений оптико-геометрических параметров макета ОЭД. С данным значе-

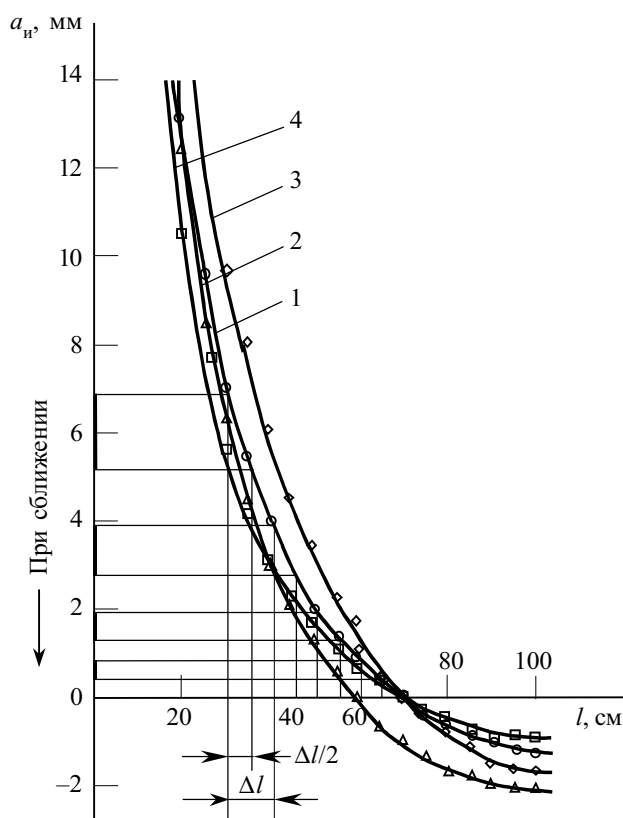


Рис. 2. Дистанционная зависимость координаты  $a_{\text{и}}$  центра светового пятна на площадке фотоприемника

нием соизмеримы линейные размеры фоточувствительных площадок фотодиодов типа ФД-7К, ФД-155К и фотоприемных линеек и матриц.

Очевидно, что скорость сканирования изображения нелинейна и увеличивается с уменьшением дистанции. При этом траектория сканирования несимметрична относительно оптической оси объектива приемника и смещена в радиальном направлении от оси симметрии ОЭД. Последнее необходимо учитывать при определении положения площадки фотоприемника, которое обеспечивало бы попадание на нее фокального пятна во всем диапазоне дистанций.

Аналогично системам со сканированием [8] в самосканирующей системе для модуляции сигнала пригоден модулирующий растр. Наложенный на площадку приемника растр, в зависимости от положения изображения, пропускает или задерживает отраженный световой поток, чему соответствует значение сигнала 1 или 0. Таким образом, производится импульсная модуляция сигнала.

Учитывая прямолинейность сканирования изображения в базовом ОЭД, импульсную модуляцию производит растровая решетка щелевого типа, расположенная в фокальной плоскости объектива приемника. Длительность импульса и частота производимой решеткой модуляции определяется ее строением и скоростью движения ОЭД.

Расчет структуры решетки может производиться аналитически в соответствии с уравнением (1) или графически по зависимости  $a_{\text{и}}(l)$  (рис. 2).

Методика графического расчета такова.

Если скорость движения ОЭД постоянна, то импульсную модуляцию с постоянной частотой реализует растровая решетка, производящая цикл "пропускание-затенение" за равные интервалы дистанции  $\Delta l$ . Разбив диапазон дистанций 30...70 см на интервалы  $\Delta l=10$  см и  $\Delta l/2=5$  см, а также выбрав положение щели от начала отсчета, определяем интервалы  $a_n$ , соответствующие интервалам дистанций 30...35 см, ..., 60...65 см. Для кривой 1 (рис. 2), например, интервалы  $a_n$ , определяющие ширину щели, составляют 1,7; 1,0; 0,7; 0,5 мм, соответственно. Щелевая решетка с данной переменной шириной щели характеризуется переменным периодом 3,0; 1,8; 1,3; 1,1 мм.

Очевидно, что решетка с постоянным периодом и шириной щели осуществит неравномерную импульсную модуляцию.

Импульсный сигнал, сформированный при помощи растровой решетки, характеризуется периодом  $T=\Delta l/v$  и частотой  $\tau=v/\Delta l$ , где  $v$  — скорость движения ОЭД. Из этого следует, что априорные данные о соотношении между структурой решетки и дистанцией в совокупности с измеренной частотой модуляции позволяют определить скорость движения датчика. В частности, для нашего примера при  $\Delta l=10$  см и измеренной частоте модуляции  $\tau=1...50$  Гц скорость движения составляет от 0,1 до 5,0 м/с.

Дистанционная характеристика  $\Phi(l)$  ОЭД, имеющая вид уравнения (1), дополняется функцией коэффициента пропускания  $\tau_0$  приемного объектива, изменяемого растровой решеткой следующим образом [8, с. 205]:

$$\Phi_0 = \begin{cases} \Phi_0(\text{при } l \leq \Delta l/2) \\ 0 (\text{при } \Delta l/2 \leq l \leq \Delta l) \end{cases} \quad (4)$$

Создан макет ОЭД на основе оптопары "лазер ЛГ-78—фотодиод ФД-7К", способный измерять как расстояние до объекта, так и относительную скорость в диапазоне дальностей 30—70 см. Дистанционные характеристики макета ОЭД с растровой решеткой расчетной структуры приведены на рис. 3.

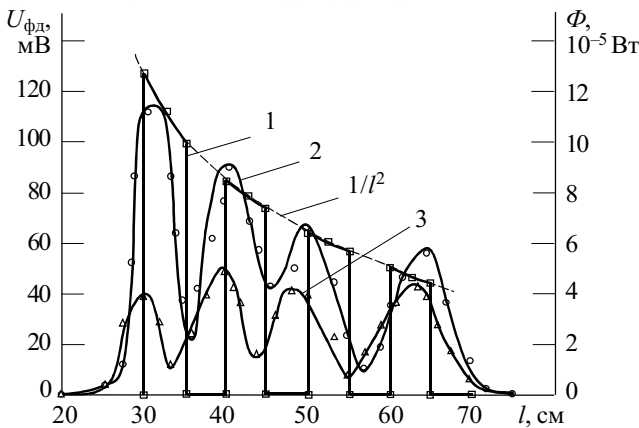


Рис. 3. Дистанционные характеристики ОЭД с растровой решеткой

Расчетная дистанционная характеристика  $\Phi(l)$  ОЭД (рис. 3, кривая 1) получена при оптико-геометрических параметрах макета и структуре растровой решетки, соответствующих тому же варианту, что и для кривой 1 на рис. 2. Для расчета принялись:  $\rho=0,85$ ; мощность излучателя  $P=2 \cdot 10^{-3}$  Вт; угол расходимости лазерного пучка  $2\alpha=3 \cdot 10^{-3}$  рад при диаметре  $d_{\text{вх}}=2,5 \cdot 10^{-3}$  м. Значения  $\Phi$  в диапазоне дистанций  $l=30...70$  см получены по формуле (1) с учетом значений  $\tau_0$  из уравнения (4) и приведены в таблице.

Экспериментальная дистанционная зависимость сигнала фотоприемника  $U_{\text{фд}}(l)$  (рис. 3, кривая 2), измеренная для данного макета ОЭД, как и расчетная, ограничивается функцией вида  $1/l^2$ , характерной для устройств данного типа. Очевидно, что применение растровой решетки преобразует непрерывную функцию  $f(1/l^2)$  в последовательность импульсов, количество, периодичность и дистанционное расположение которых определяются структурой решетки.

Однако импульсы расчетной и экспериментальной характеристик ОЭД значительно отличаются по форме и глубине модуляции. Причина расхождения кроется в зависимости точности метода от соотношения между размерами и формой изображения и щели растровой решетки [9].

В нашем случае использования сферических оптических элементов изображение имеет форму круга, диаметр которого  $d_n$  изменяется в зависимости от  $l$  [1, с. 54] следующим образом:

$$d_n = (d_{\text{вх}} + 2l \cdot \text{tg}\alpha) \frac{f}{l}, \quad (5)$$

где  $d_{\text{вх}}$  — диаметр входного зрачка фотоприемника.

При прохождении через щелевой растр круглого изображения форма прямоугольных импульсов на экспериментальной кривой 2 рис. 2 искажается до треугольной, а амплитуда импульсов возрастает с уменьшением расстояния.

Путем изменения строения решетки получен пакет импульсов постоянной амплитуды. В соответствии с уравнением (1) постоянно амплитуды импульса обеспечивается при условии

$$A_{\text{вх}}/l^2 = \text{const}, \quad (6)$$

где  $A_{\text{вх}}$  — в общем случае площадь входного зрачка фотоприемника, а в частности — площадь фотоприемника, ограниченная щелью раstra.

Поскольку ширина щели определяет длительность импульса и, следовательно, частоту модуляции, то выполнение условия (6) обеспечивается подбором длины щели. На рис. 3 (кривая 3) показана экспериментальная дистанционная характеристика макета ОЭД с растровой решеткой, нормированной по длине щели. Она представляет собой пакет импульсов с разбросом максимума амплитуды не более 20%.

$L$ , мм	300	300	325	350	350	400	400	425	450	450	500	500	525	550	550	600	600	625	650	650	700
$\tau$	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0
$\Phi$ , $10^{-5}$ Вт	0	12,8	11,4	10,3	0	0	8,56	7,89	7,32	0	0	6,40	6,02	5,69	0	0	5,14	4,90	5,69	0	0

По аналогии может быть создан растр, формирующий пакет с опорным импульсом, что открывает возможности импульсно-кодовой модуляции сигнала.

Таким образом, переход в дистанционном оптико-электронном датчике к координатному методу измерения позволил уменьшить погрешность измерения расстояния, а введение растровой решетки — дополнить функциональные возможности ОЭД измерением скорости движения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Мусьяков М. П., Миценко И. Д. Оптико-электронные системы ближней дальнометрии.— М.: Радио и связь, 1991.
2. Пестряков В. Б., Кузнецов В. Д. Радиотехнические системы.— М.: Радио и связь, 1985.
3. Ишанин Г. Г., Панков Э. Д., Андреев А. Л., Польщиков Г. В. Источники и приемники излучения.— СПб: Политехника, 1991.

4. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов.— М.: Сов. радио, 1980.

5. Будиянская Л. М., Сантоний В. И., Иванченко И. А. Метод самосканирования для измерения диаграммы направленности оптико-электронных устройств//Тр. Одес. политехн. ун-та.— 2000.— Вып. 2.— С. 168—172.

6. Черешанский В. А., Иванченко И. А., Будиянская Л. М. и др. Оптико-электронный дальномер для робототехники / Тез. докл. VIII Всесоюз. н.-т. конф. «Измерительные информационные системы».— Ташкент.— 1987.— Ч. III, с. 10.

7. Сакин И. Л. Инженерная оптика.— Л.: Машиностроение, 1976.

8. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов.— Л.: Машиностроение, 1983.

9. Куджури М. Устройство измерения расстояния и высоты в реальном времени// ТИИЭР.— 1984.— Т. 72, вып. 12.— С. 178—179.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



6-я специализированная выставка  
**ИЗДЕЛИЯ И ТЕХНОЛОГИИ  
 ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ.  
 КОНВЕРСИЯ ОПК**

**18–21 октября 2005 г. Москва, ВВЦ**







- Высокие технологии оборонного комплекса и гражданского сектора экономики
- Модели и технологии оборонного комплекса, перспективные для использования в гражданском секторе экономики
- Конверсионная продукция
- Коммерциализация технологий
- Инвестиционные проекты

**ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА :**

- конференция по актуальным вопросам коммерциализации технологий двойного назначения
- семинары и круглые столы для специалистов
- конкурс на лучшее инновационное изделие и дизайн
- презентации участников выставки

**ДИРЕКЦИЯ ВЫСТАВКИ :**  
 Тел.: (495) 311-4803, факс: (495) 311-4814  
 E-mail: info@expoconexpo.ru, expo@expoconexpo.ru  
 www.expoconexpo.ru

Д. ф.-м. н. А. В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ, к. ф.-м. н. С. Н. НЕСМЕЛОВ,  
д. т. н. Н. А. КУЛЬЧИЦКИЙ

Россия, г. Томск, Сибирский физико-технический институт;  
г. Москва, МГИРЭА  
E-mail: vav@elefot.tsu.ru

Дата поступления в редакцию  
26.01 2005 г.

Оппонент д. т. н. Р. В. КОНАКОВА  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## ЕМКОСТНЫЕ СВОЙСТВА МДП-СТРУКТУР HgCdTe/ SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

*Экспериментальные исследования показали, что использование двухслойного диэлектрика SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> перспективно для пассивации поверхности матричных HgCdTe-фотодиодов для инфракрасного диапазона.*

Узкозонный твердый раствор Hg<sub>x</sub>Cd<sub>1-x</sub>Te широко применяется для создания высокочувствительных инфракрасных детекторов, действующих в спектральных диапазонах окон прозрачности атмосферы 3—5 и 8—12 мкм [1, 2]. При изготовлении матрицы фотодиодов одной из главных проблем является пассивация поверхности HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ HgCdTe), с высокими параметрами границы раздела "полупроводник—диэлектрик" [2]. Диэлектрическое покрытие, используемое для пассивации, должно удовлетворять ряду достаточно жестких условий: низкая температура синтеза (не более 100°C), низкая поверхностная плотность встроенного заряда, хорошие адгезионные свойства, стабильность во времени и при термообработках.

В качестве основного диэлектрического покрытия, удовлетворяющего данным требованиям, применяется низкотемпературный диоксид кремния (температура синтеза 100°C). Однако низкотемпературный SiO<sub>2</sub> активно взаимодействует с атмосферной влагой, в результате чего в объеме пленки накапливается положительный заряд до величины 10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup> в течение нескольких недель. Для устранения влияния атмосферной влаги предложено использовать второй диэлектрик—плазмохимический нитрид кремния (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), который наносится на предварительно осажденный слой SiO<sub>2</sub>.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований вольт-фарадных характеристик (ВФХ) МДП-структур на основе МЛЭ HgCdTe.

### Образцы и методика экспериментов

Пленки гетероэпитаксиального HgCdTe выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs. При выращивании эпитаксиальных пленок HgCdTe вблизи поверхности создавались варизонные слои толщиной 0,5 мкм с экспоненциаль-

ным повышением компонентного состава CdTe ( $x_{\text{CdTe}}$ ) от 0,219—0,231 (в объеме) до 0,45 (у поверхности). Для части образцов (серии 2, 4, см. таблицу) этот приповерхностный широкозонный слой удалялся путем травления в растворе Br<sub>2</sub>-HBr, а для других образцов диэлектрики наносилились поверх варизонного слоя (серии 1, 3, 5, 6).

### Исходные параметры МДП-структур

Номер серии	Тип МДП-структуры	$x_{\text{CdTe}}$	Наличие варизонного слоя	$n(p)$ , см <sup>-3</sup>	$\mu$ , см <sup>2</sup> /В·с
1	<i>p</i> -HgCdTe/SiO <sub>2</sub> /Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,227	Есть	7·10 <sup>15</sup>	400
2	<i>p</i> -HgCdTe/SiO <sub>2</sub> /Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,227	Нет	7·10 <sup>15</sup>	400
3	<i>n</i> -HgCdTe/SiO <sub>2</sub> /Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,231	Есть	3,5·10 <sup>14</sup>	69000
4	<i>n</i> -HgCdTe/SiO <sub>2</sub> /Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,231	Нет	3,5·10 <sup>14</sup>	69000
5	<i>p</i> -HgCdTe/АОП	0,219	Есть	7,2·10 <sup>15</sup>	490
6	<i>n</i> -HgCdTe/АОП	0,222	Есть	1,8·10 <sup>14</sup>	78000

Исследовались МДП-структуры с анодно-окисной пленкой (АОП) в качестве диэлектрика, а также с двухслойным диэлектриком (SiO<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) при различных параметрах эпитаксиальной пленки HgCdTe. Толщина SiO<sub>2</sub> составляла 70 нм, толщина Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> — 30 нм. На поверхности диэлектрика формировалась матрица полевых электродов (элементов матрицы) путем напыления индия через специальные маски.

Некоторые исходные параметры (состав в рабочем слое, концентрации  $n(p)$  и подвижности  $\mu$  основных носителей при 77 К) МДП-структур различных серий приведены в таблице.

ВФХ МДП-структур измерялись на автоматизированной установке [3] в диапазоне частот тестового сигнала 1 кГц—2 МГц при изменении напряжения смещения со скоростью 20 мВ/с из области отрицательных напряжений в область положительных (прямая развертка) и наоборот (обратная развертка). Точность измерения емкости составляла 1%.

Для исключения дефектообразующей операции распайки структур была создана охлаждаемая жидким азотом измерительная камера, позволяющая измерять характеристики структур при использовании управляемого микрометрическими винтами тонкого (60 мкм) вольфрамового зонда. Элемент выбирается визуально при помощи микроскопа, установленного над двойным лейкосапфировым окном. Для исключения влия-

Авторы благодарят сотрудников ИФП СО РАН Ю. Г. Сидорова, В. С. Варавина, Н. Н. Михайлова, В. В. Васильева, Т. И. Захарьяш, Ю. П. Машукова за изготовление экспериментальных образцов.

ния засветки на измерения ВФХ окно после опускания зонда перекрывалось охлаждаемой заслонкой.

Расчет идеальных ВФХ, необходимый для определения параметров МДП-структур, проводился с учетом эффектов вырождения и непараболичности зоны проводимости в HgCdTe по модели, описанной в [4]. Для построения идеальных ВФХ МДП-структур на основе варизонного HgCdTe осуществлялось численное решение уравнения Пуассона для неоднородного полупроводника методом стрельбы.

**Экспериментальные результаты**

1) ВФХ *p*-HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/In.

На рис. 1 приведены ВФХ для МДП-структур 1-й и 2-й серий при разных частотах и направлениях развертки напряжения. Как видно из рисунка, ВФХ МДП-структур имеют низкочастотный вид при частотах тестового сигнала 1 и 5 кГц и вид, промежуточный между высокочастотным и низкочастотным, в диапазоне частот 200—1000 кГц.

Расчет идеальных низкочастотных ВФХ позволил установить, что модель, учитывающая непараболичность зоны проводимости и использующая статистику Ферми–Дирака, хорошо описывает экспериментальные ВФХ. На идеальных ВФХ наблюдается, ана-

логично экспериментальным характеристикам, различие емкостей в обогащении и сильной инверсии. Интересной особенностью ВФХ МДП-структур HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> является наличие гистерезиса ВФХ в области слабой инверсии и отсутствие заметных различий ВФХ при прямой и обратной развертке в обеднении — слабом обогащении. Для МДП-структур на основе HgCdTe с варизонным слоем (1-я серия) глубина провала ВФХ больше, чем для структур на основе HgCdTe без варизонного слоя (2-я серия), что объясняется уменьшением концентрации неосновных носителей при увеличении компонентного состава CdTe вблизи поверхности. Значительное уменьшение емкости в обогащении объясняется влиянием сопротивления объема эпитаксиальной пленки на измеряемую емкость при использовании параллельной схемы замещения.

Следует отметить, что влияние сопротивления объема на измеряемые дифференциальную емкость и проводимость МДП-структур на основе эпитаксиального HgCdTe может проявляться в виде максимумов на ВФХ в области слабого обогащения. Сопротивление объема эпитаксиальной пленки может быть найдено по результатам измерений емкости и дифференциальной проводимости МДП-структуры в обогащении на высоких частотах, что позволяет при помощи метода эквивалентных схем рассчитать ВФХ при исключении влияния сопротивления объема.

Напряжение плоских зон для структур 1-й серии составляет –0,44 В при прямом ходе развертки и –0,38 В при обратном ходе развертки. Выдержка структуры при напряжениях амплитудой 10 В обеих полярностей в течение 10 мин не приводит к заметному изменению напряжения плоских зон. Плотность суммарного эффективного заряда на границе раздела "диэлектрик—полупроводник" (обусловленного суммарным влиянием разности работ выхода из металла и полупроводника, фиксированным и подвижным зарядом в диэлектрике, а также зарядом поверхностных состояний) составляет  $1,58 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup> при прямой и  $1,37 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup> при обратной развертке напряжения.

Для МДП-структур 2-й серии напряжение плоских зон при прямой и обратной развертке составляет –0,72 В, что соответствует плотности эффективного приведенного заряда  $2,5 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>. Подача положительного напряжения смещения приводит к появлению индуцированного отрицательного заряда величиной около  $0,9 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>.

2) ВФХ *n*-HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/In.

На рис. 2 приведены ВФХ МДП-структур *n*-HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 3-й и 4-й серий. Как следует из рис. 2, а, для МДП-структур на основе HgCdTe с варизонным слоем (3-я серия) типичен гистерезис в режиме обеднения и отсутствие гистерезиса в инверсии; частотная дисперсия незначительна. Глубина провала ВФХ для МДП-структур с варизонным слоем больше, чем для МДП-структур без варизонного слоя. Для образца без варизонного слоя (4-я серия) наблюдается увеличение глубины провала при увеличении частоты тестового сигнала, что может быть обусловлено влиянием на измеряемую емкость ем-

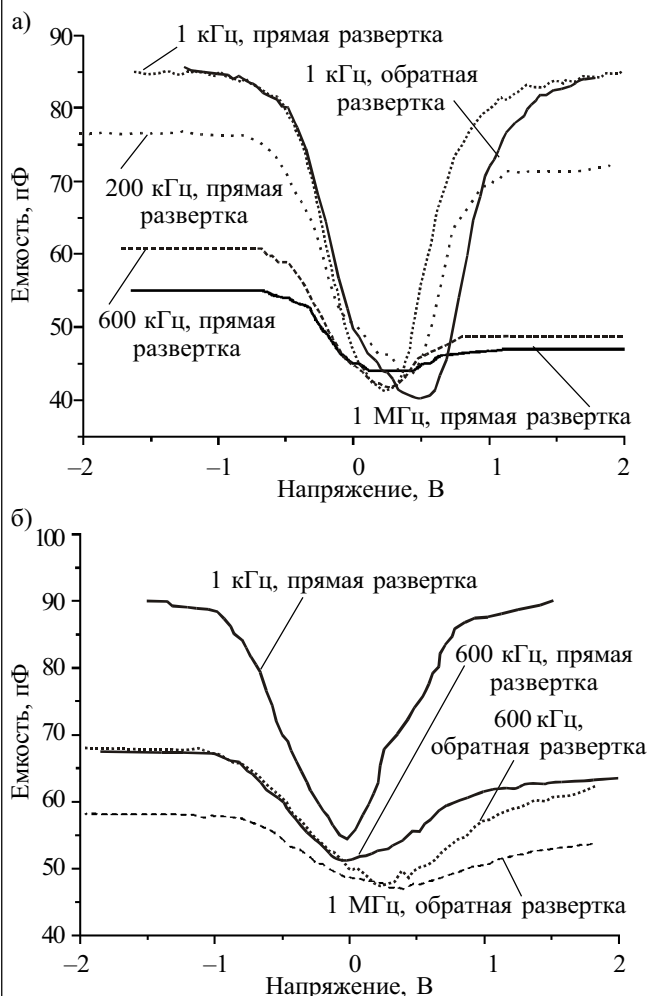


Рис. 1. ВФХ МДП-структур *p*-HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 1-й серии (а) и 2-й серии (б) при разных частотах и направлениях развертки

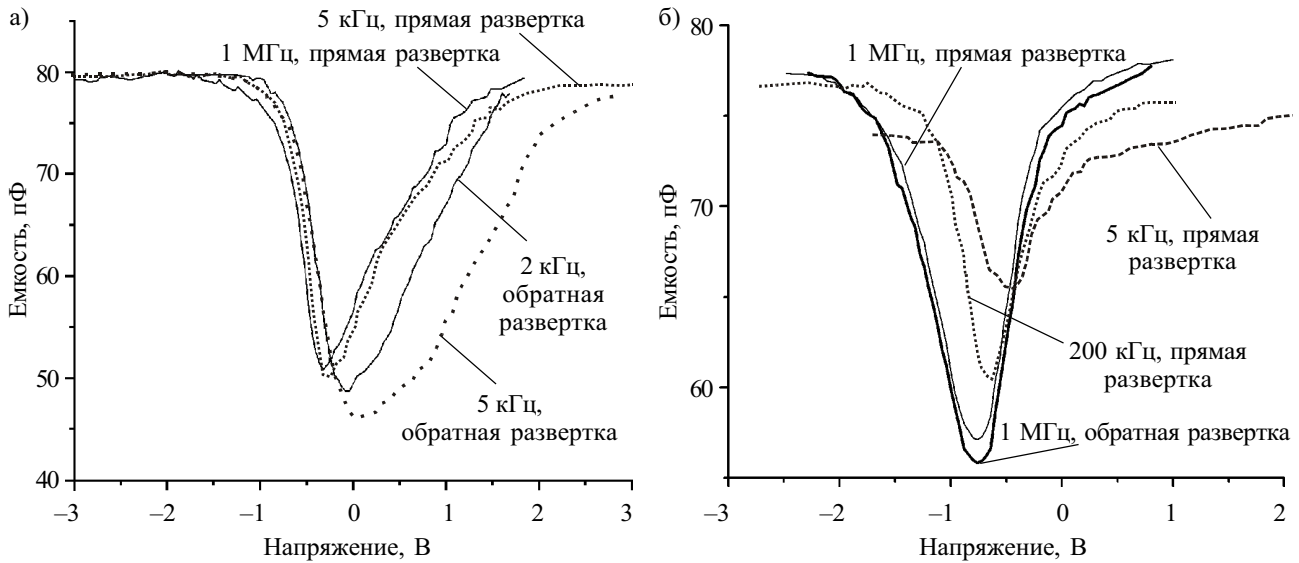


Рис. 2. ВФХ МДП-структур  $n\text{-HgCdTe/SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  3-й серии (а) и 4-й серии (б) при разных частотах и направлениях развертки

кости поверхностных состояний на низких частотах. Для структур данной серии типичен низкочастотный вид ВФХ при частотах тестового сигнала до 1 МГц. Отсутствие заметной частотной дисперсии емкости в обогащении связано с более высокой проводимостью пленки ( $4 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ ).

Интересной особенностью, наблюдавшейся для большого числа образцов, является большой гистерезис ВФХ МДП-структур  $n\text{-HgCdTe/SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  с приповерхностными широкозонными слоями (по сравнению с МДП-структурами без варизонных слоев). Также для всех структур с двухслойным диэлектриком ( $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ ) отмечено наличие заметного гистерезиса в области положительных (относительно минимума ВФХ) напряжений, что позволяет предположить, что причиной гистерезиса является инжекция электронов из приповерхностного слоя полупроводника в диэлектрик.

Для структур 3-й серии напряжение плоских зон составляет 0,42 В при прямой развертке напряжения и 1,53 В при обратной развертке, а для структур 4-й серии — 0,48 В. Величина плотности отрицательного эффективного заряда составляет для структур 3-й серии  $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/м}^2$  и  $4,8 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/м}^2$ , а для МДП-структуры 4-й серии типичен положительный заряд с плотностью  $1,44 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/м}^2$ .

3) ВФХ  $p$ - и  $n\text{-HgCdTe/AOP/In}$ .

С целью сравнения характеристик МДП-структур с различными диэлектриками были проведены исследования ВФХ структур  $\text{HgCdTe/AOP}$  при разных типах проводимости варизонного полупроводника.

На рис. 3 приведены экспериментальные ВФХ для МДП-структур на основе  $\text{HgCdTe}$   $p$ - и  $n$ -типов проводимости. Большие значения емкости диэлектрика для структур с АОП, обусловленные большой диэлектрической проницаемостью, определяют важную роль влияния сопротивления объема пленки на формирование электрических характеристик. Частотная дисперсия емкости в обогащении и сильной инверсии ярко выражена при проводимостях объема  $0,63 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$  (рис. 3, а) и  $2,6 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$  (рис. 3, б).

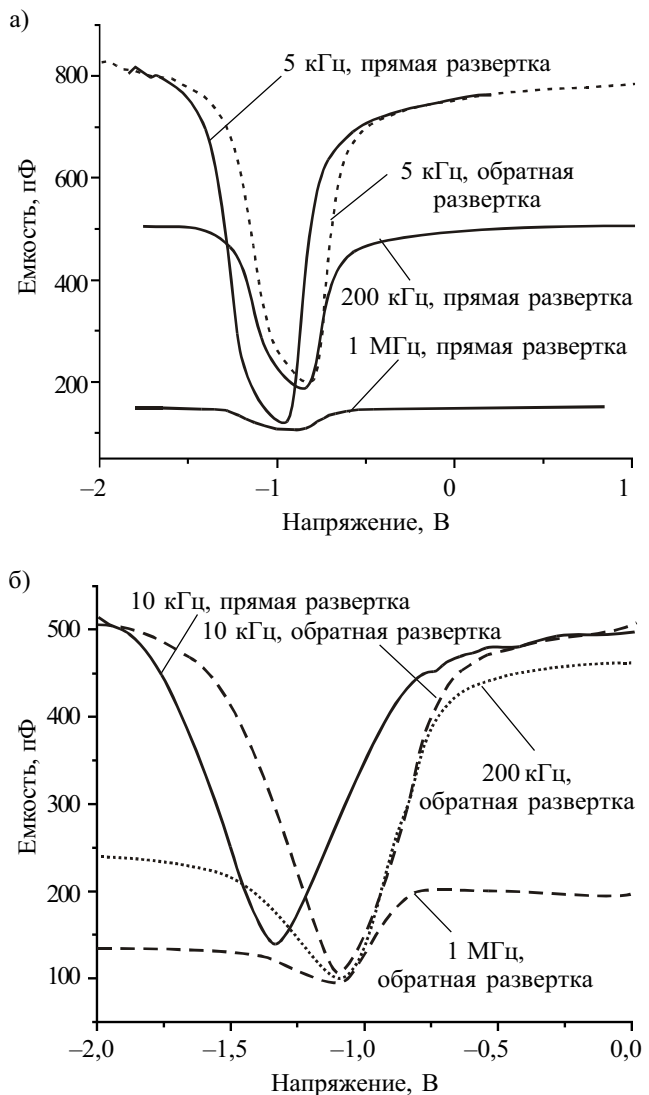


Рис. 3. ВФХ МДП-структур  $p\text{-HgCdTe/AOP/In}$  5-й серии (а) и 6-й серии (б) на разных частотах

Наличие максимума в области слабого обогащения на ВФХ МДП-структур  $n$ -HgCdTe/АОП связано с немонотонной зависимостью измеряемой емкости от емкости области пространственного заряда при значительном сопротивлении объема эпитаксиальной пленки. Напряжение плоских зон на низких частотах для МДП-структур 5-й серии при прямой и обратной развертке составляет соответственно  $-1,25$  и  $-1,1$  В, эффективный приведенный заряд равен  $4 \cdot 10^{-3}$  и  $3,5 \cdot 10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup>, соответственно. Гистерезис проявляется для структур 5-й серии и в инверсии, и в обеднении, величина эффективного подвижного заряда составляет  $5 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>.

Для МДП-структур 6-й серии при подаче напряжения до  $-2$  В при прямой развертке напряжение плоских зон составляет  $-1,38$  В, при обратной —  $-1,08$  В, что соответствует плотностям заряда  $2,8 \cdot 10^{-3}$  и  $2,2 \cdot 10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup>, соответственно. Плотность подвижного заряда для МДП-структур 6-й серии составляет  $6 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>.

В исходном состоянии напряжение плоских зон для МДП-структур HgCdTe/АОП составляет около  $-0,5$  В, что соответствует плотности приведенного к границе раздела заряда  $10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup>. После подачи отрицательного напряжения, соответствующего инверсии, характеристики МДП-структур сдвигаются в область отрицательных напряжений, что свидетельствует о накоплении в АОП положительного заряда. Напряжение плоских зон МДП-структур HgCdTe/АОП зависит от того, какой амплитуды отрицательное напряжение прикладывалось к данной структуре. Для МДП-структур  $n$ -HgCdTe/АОП при нулевом смещении реализуется режим обогащения, для МДП-структур  $p$ -HgCdTe/АОП реализуется режим инверсии. В отличие от структур с двухслойным диэлектриком, в данном случае гистерезис ВФХ наблюдается во всей области напряжений, соответствующих модуляции ВФХ.

#### Обсуждение результатов эксперимента

Таким образом, экспериментально исследованы ВФХ МДП-структур  $p(n)$ -HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и  $p(n)$ -HgCdTe/АОП, в том числе с приповерхностными варизонными слоями. Показано, что сопротивление объема эпитаксиальной пленки существенно влияет на измеряемую емкость МДП-структур  $p$ -HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>,  $n$ -HgCdTe/АОП и  $p$ -HgCdTe/АОП при концентрации основных носителей в пленке  $10^{14}$ — $10^{15}$  см<sup>-3</sup>.

МДП-структуры с анодным оксидом обладают большой емкостью диэлектрика ( $600$ — $700$  пФ), большей модуляцией емкости на низких частотах ( $300$ — $500$  пФ), частотной дисперсией емкости в обогащении. Подача отрицательного напряжения амплитудой в несколько вольт часто приводит к пробое АОП. В исходном состоянии напряжение плоских зон для МДП-структур HgCdTe/АОП составляет около  $-0,5$  В, что соответствует плотности приведенного к границе раздела заряда около  $10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup>. После подачи отрицательного напряжения, соответствующего инверсии, характеристики МДП-структур сдвигаются в область отрицательных напряжений, что свидетельствует о накоплении в АОП положительного заряда (до  $4 \cdot 10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup> при

подаче напряжения от  $-2$  В до  $2$  В). Напряжение плоских зон МДП-структур HgCdTe/АОП зависит от того, какой амплитуды отрицательное напряжение прикладывалось к данной структуре. Для МДП-структур HgCdTe/АОП при нулевом смещении реализуется режим обогащения.

Для МДП-структур с анодным оксидом типичен гистерезис ВФХ при напряжениях, соответствующих режимам обогащения, обеднения, инверсии, и плотность подвижного заряда составляет около  $5 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup> при изменениях напряжения от  $-2$  В до  $2$  В.

МДП-структуры с двухслойным диэлектриком (SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) обладают малой емкостью диэлектрика ( $70$ — $90$  пФ), что связано с меньшей, чем в АОП, диэлектрической проницаемостью SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, гистерезисом в области положительных (относительно напряжения плоских зон) напряжений. Подача напряжений в диапазоне  $-10$  В... $10$  В не приводит к пробое диэлектрика, а также к накоплению фиксированного заряда в диэлектрике. Напряжение плоских зон для МДП-структур на основе HgCdTe с варизонными слоями при прямой развертке напряжения не превышает по модулю  $0,4$  В, что соответствует плотности эффективного заряда около  $1,4 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>.

Для МДП-структур с двухслойным диэлектриком на основе HgCdTe без варизонных слоев плотность эффективного заряда может достигать  $5 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>. Плотность подвижного заряда для МДП-структур HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> может достигать  $3,5 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup> для случая наличия варизонных слоев, а для МДП-структур на основе однородного полупроводника электронного типа проводимости плотность подвижного заряда существенно меньше. При нулевом смещении для МДП-структур HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> типична реализация режимов слабого обогащения, обеднения или слабой инверсии в зависимости от типа проводимости полупроводника и наличия варизонных слоев.

#### Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о перспективности использования двухслойного диэлектрика SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> для целей пассивации поверхности матричных фотоприемников на основе HgCdTe из-за высокой электрической прочности, стабильности и возможностей минимизации фиксированного и подвижного зарядов в этом диэлектрическом покрытии.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Рогальский А. Инфракрасные детекторы.— Новосибирск: Наука, 2003.
2. Овсюк В. Н., Курьшев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона.— Новосибирск: Наука, 2001.
3. Войцеховский А. В., Давыдов В. Н. Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников.— Томск: Радио и связь, 1990.
4. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Кульчицкий Н. А. Емкостные свойства МДП-структур HgCdTe/SiO<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>// Мат-лы 10-й Междунар. науч.-техн. конф. «Высокие технологии в промышленности России».— Москва.— 2004.— С. 141—147.

К. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА, Э. Н. ЯКУБОВ

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

Дата поступления в редакцию  
05.05 2005 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН  
(ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

## ДЕТЕКТОРЫ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА НА ОСНОВЕ СТРУКТУР Au-nSi-Al, Au-nSi

*Получены перспективные для детектирования оптических сигналов двухбарьерные структуры и поверхностно-барьерные структуры с модифицированными охранными высокоомными слоями с перекрытием металла.*

Кремниевые поверхностно-барьерные структуры, изготовленные путем напыления сплошных поверхностно-барьерных контактных областей (Au), широко используются в качестве детекторов ионизирующего излучения. При этом они работают в запирающем режиме при обратных смещениях, обеспечивающих обеднение области поверхностного барьера вплоть до 20—30 мкм.

В известных детекторных структурах зачастую появляются дополнительные токи утечки, ухудшающие пороговые характеристики структуры. Одним из способов уменьшения токов утечки является создание охранного кольца, которое представляет собой диффузионную область с типом проводимости, противоположным типу проводимости активной области. К недостаткам таких структур относится большое время восстановления и большая паразитная емкость за счет диффузионного p-n-перехода [1, с. 310—315].

В принципе детекторы ядерного излучения не отличаются от фотоприемников, т. е. при попадании ионизирующего излучения в область объемного заряда образуются неравновесные носители. Обеспечение эффективности разделения генерированных носителей и оптического сигнала путем модифицирования детекторной структуры позволит детектировать оптические сигналы. Это и является целью настоящей работы.

Для решения задачи нами были изготовлены двухбарьерные и поверхностно-барьерные структуры со своеобразными модифицированными охранными высокоомными слоями с перекрытием металла. Своеобразие заключается в том, что так называемое охранное кольцо представляет собой диэлектрический

слой оксида кремния в виде окружности, обрамляющей верхний потенциальный барьер с высокоомным тонким промежуточным слоем (рис. 1).

Двухбарьерная Au-nSi-Al-структура получена путем напыления полупрозрачного слоя из Au толщиной порядка 50 Å и тыльного полупрозрачного слоя из Al (50 Å). Данная структура является частным случаем трехбарьерной фотодиодной структуры [2] и обладает преимуществами по сравнению с обычными в части фоточувствительности и коммуникационности при стыковке с электронными схемами.

Поверхностно-барьерные Au-nSi-структуры с модифицированными охранными высокоомными слоями с перекрытием металла также имеют некоторые преимущества по темновым токам и фоточувствительности. Модернизация структур на основе Al-n-n<sup>+</sup>-Si-Al с барьером Шоттки в работе [3] осуществлена диффузией из твердотельного источника в сформированных на свободной поверхности кремния окнах SiO<sub>2</sub> при импульсном лазерном облучении.

Нами Au-nSi-структуры изготовлены путем отжига напыленного в окошко из оксида кремния Au при 700°C в потоке водорода, а также с последующим повторным напылением Au для создания барьера. Тыльный омический контакт получен вжиганием Al при 680°C в потоке водорода.

### Двухбарьерные Au-nSi-Al-структуры

Двухбарьерные Au-nSi-Al-структуры изготовлены на основе пластин кремния n-типа проводимости с концентрацией носителей  $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  толщиной 400 мкм и площадью 1,8 см<sup>2</sup>. Со стороны фотоприемной поверхности из Au потенциальный барьер равен  $\phi=0,8 \text{ эВ}$ , а с тыльной стороны, где Al, —  $\phi=0,6 \text{ эВ}$  [4, с. 188—194]. Эквивалентная схема Au-nSi-Al-структуры состоит из двух встречновключенных барьеров.

В любом из направлений от приложенного напряжения реализуется фотодиодный режим. Вольт-амперная характеристика является симметричной по отношению к центральной оси. При освещении Au-nSi-Al-структуры видимым светом с максимумом излучения 0,55 мкм в обоих направлениях появляется фототок, ход кривой которого повторяет обратную кривую, причем чем больше интенсивность освещения, тем больше фототок (рис. 2). При этом фоточувствительность достигает 0,7 А/Вт. Прямая и обратная ветви представляют собой характеристики двух встречновключенных Шоттки-переходов, один из которых всегда включен в запираемом направлении.

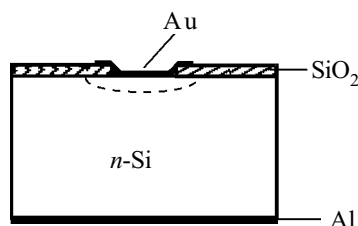


Рис. 1. Геометрия поверхностно-барьерной модифицированной структуры

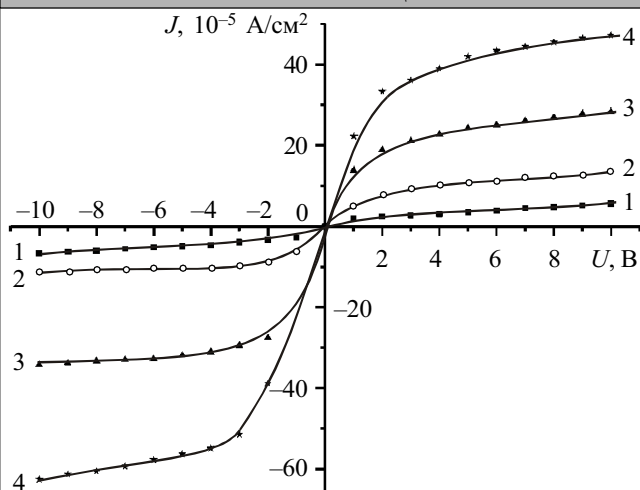


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика двухбарьерной Au-nSi-Al-структуры при различной освещенности: 1 — темновая; 2 —  $10^3$  лк; 3 —  $3 \cdot 10^3$  лк; 4 —  $6 \cdot 10^3$  лк

По мере увеличения приложенного обратного напряжения по отношению к барьеру Au-nSi вместе с его высотой возрастает и поле, а в противоположном конце, наоборот, переход nSi-Al входит в режим прямого смещения. Эффект изменения высоты барьера проявляется также с увеличением интенсивности освещения за счет увеличения концентрации генерированных светом носителей. Таким образом, получается семейство характеристик при различной освещенности (кривые 2—4).

Как показали исследования спектральных характеристик двухбарьерных Au-nSi-Al-структур в фотодиодном режиме (рис. 3), максимальная фоточувствительность при комнатной температуре в них достигается в коротковолновой области спектра (0,5 мкм), затем, уменьшаясь по закону, близкому к квадратичному, простирается до 1,2 мкм. Здесь отметим, что величина чувствительности в данной области спектра будет увеличиваться с повышением напряжения, приложенного в обратном направлении к освещаемому переходу.

Фоточувствительность в коротковолновой области почти на порядок больше, чем в видимой области спектра, т. е. данная двухбарьерная структура может

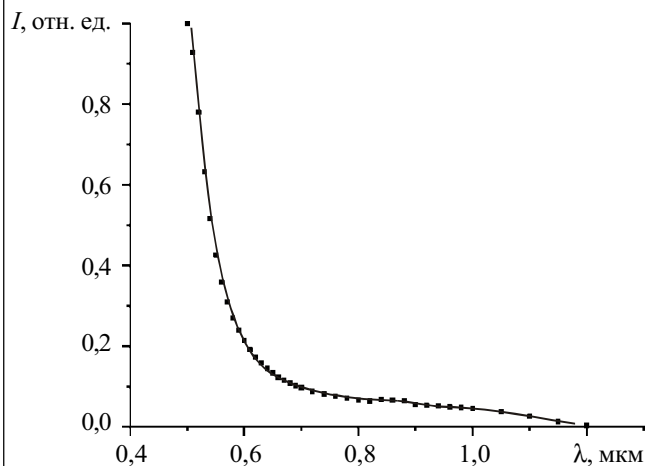


Рис. 3. Спектральная характеристика поверхностно-барьерной Au-nSi-Al-структуры

выполнять роль коротковолнового фотодетектора. Высокая фоточувствительность в коротковолновой области спектра свидетельствует об отсутствии дефектов на границе перехода "металл—полупроводник".

### Au-nSi-структуры с модернизированными охранными высокоомными слоями с перекрытием металла

Модernизированные образцы изготовлены на основе монокристаллического кремния *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением 1 кОм. Диаметр исходного кристалла составляет 24 мм при толщине 300 мкм. Омические и выпрямляющие контакты нанесены на обе поверхности в виде малых окружностей. Диаметр контакта, расположенного в центре кристалла, составляет 6—8 мм, и структура представляет собой диод с перекрытием металла, в котором оксидный слой окружает контактную область.

Исследования вольт-емкостных характеристик (рис. 4) показали, что на начальном участке имеется маленькое плато, которое в дальнейшем продолжается в обычном виде  $C^2 \sim U$ , т. е. по квадратичному закону.

Наличие плато вызывается постоянством зависимости емкости от напряжения за счет наличия поверхностного тонкого высокоомного слоя. В области напряжений от 0 до 2 В толщина слоя объемного заряда  $W$  (см. рис. 5) имеет постоянное значение (14,8 мкм),

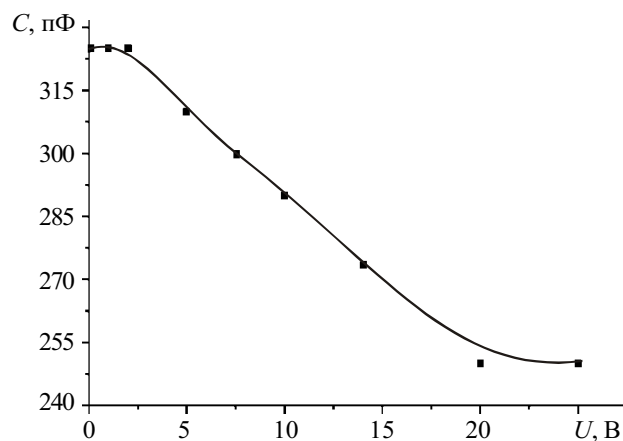


Рис. 4. Вольт-емкостная характеристика Au-nSi-структуры в запирающем режиме

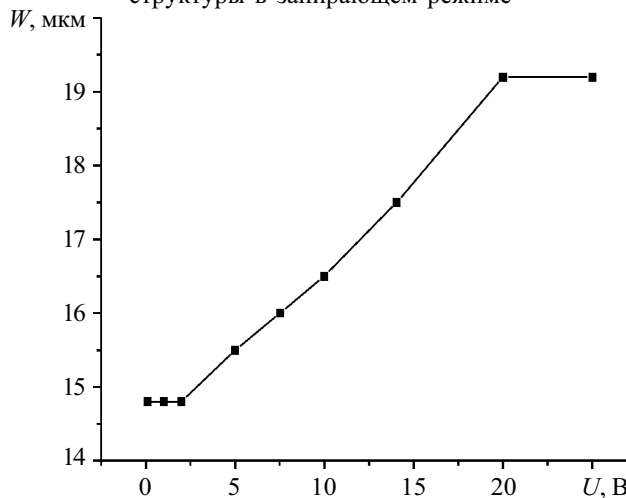


Рис. 5. Зависимость толщины слоя объемного заряда Au-nSi-структуры от запирающего напряжения

далее, по мере увеличения приложенного напряжения до 20 В, она увеличивается линейно и при достижении 20 В вновь становится постоянной (19,2 мкм).

Неизменность толщины слоя обеднения на начальном участке можно объяснить пониженной концентрацией носителей  $N$  на границе с металлом. В частности, как показано в **таблице**, концентрация носителей в диапазоне до 2 В увеличивается в 3,5 раза, далее имеет место более равномерный рост, а при напряжении 20 В опять наблюдается значительное увеличение концентрации носителей.

$U, \text{В}$	0	1	2	5	7,54	10	14	20	25
$N, 10^{12} \text{ см}^{-3}$	4,19	9,3	14,6	27,3	33,4	44,5	54,2	63,7	79

Таким образом, по расчетным данным, концентрация носителей в активной области последовательно возрастает. Потенциальный барьер, равный 0,8 эВ (по данным [4] и определенный из зависимости корня квадратного из фототока от энергии) — единственный и создан на основе Au. Все напряжение, приложенное извне, падает на потенциальном барьере фотоприемной поверхности. Исследуемая структура представляет собой полупроводник с одним выпрямляющим потенциальным барьером с тонким высокоомным поверхностным слоем.

При приложении прямого напряжения (плюс к Au) контактная разность потенциалов уменьшается и переход "металл—полупроводник" смещается в прямом направлении, в результате (**рис. 6**) имеем первый квадрант вольт-амперной характеристики. При приложении обратного напряжения (минус к Au) к исходной контактной разности потенциалов добавляется приложенное извне напряжение, и переход "металл—полупроводник" будет смещаться в обратном направлении. При этом возрастает поле в потенциальном барьере, а толщина слоя объемного заряда увеличивается (см. **рис. 5**).

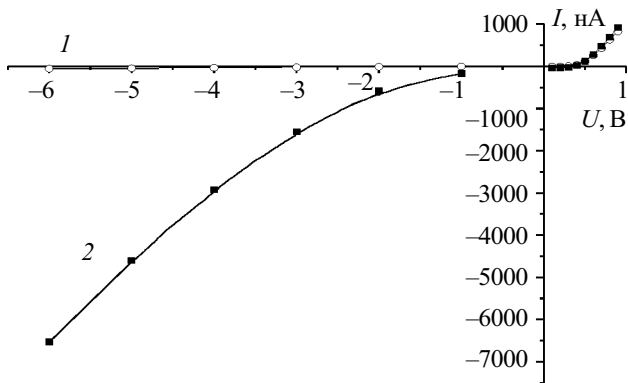


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика Au-nSi-структуры: 1 — темновая; 2 — при освещении 1000 лк

Вольт-амперная характеристика исследуемой Au-nSi-структуры с охранным кольцом (**рис. 6**) описывается зависимостью ( $q$  — заряд электрона,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура,  $n$  — безразмерный коэффициент показателя экспоненты)

$$I = \exp \frac{qU}{nkT},$$

состоящей из двух участков. На первом участке  $n_1=4,98$ , на втором участке  $n_2=8,0$ . Данные показате-

ли свидетельствуют о высоких значениях протекающего тока.

Как показано в работе [5], наличие высокоомного промежуточного слоя позволяет управлять высотой потенциального барьера и токопереносом. При наличии высокоомного промежуточного слоя в кремниевых диодных структурах с барьером Шоттки из Pd показатель степени оказался равным 3. В нашем случае этот показатель равен 4,98 и 8,0, что может быть связано не только с промежуточным слоем, но и с влиянием примесных уровней золота, расположенных посередине запрещенной зоны кремния.

Обратная ветвь ВАХ описывается степенной зависимостью  $I \approx U^\gamma$  с показателем степени при комнатной температуре  $\gamma_1=0,59$  и  $\gamma_2=0,88$ .

Данная структура при освещении видимым светом (**рис. 6**,  $\lambda \approx 0,55$  мкм) ведет себя как фотодиод. При подсветке изменение тока в прямой ветви незначительно, а в обратной ветви фототок увеличивается нелинейно с ростом приложенного напряжения. Наблюдаемый вид зависимости свидетельствует о наличии внутреннего фотоэлектрического усиления [7, с. 192—195].

В темноте обратный ток с ростом напряжения практически не возрастает, однако при внешних воздействиях (освещении) с ростом напряжения начинает резко возрастать. Ход наблюдаемой кривой можно объяснить полным падением приложенного напряжения в потенциальном барьере, при этом темп роста поля опережает темп увеличения толщины слоя объемного заряда. В результате имеем увеличение фототока с увеличением напряжения. Чем больше напряжение, тем больше носителей заряда генерируется.

Спектральный оптический диапазон данной структуры (**рис. 7**) является широким. Начинаясь в области 0,4 мкм, fotocувствительность достигает максимума при 0,5 мкм и далее сохраняется на уровне 60% до 1,0 мкм с понижением до минимума при 1,2 мкм. Наблюдаемую зависимость можно объяснить наличием расположенного близко к поверхности более высокоомного тонкого слоя.

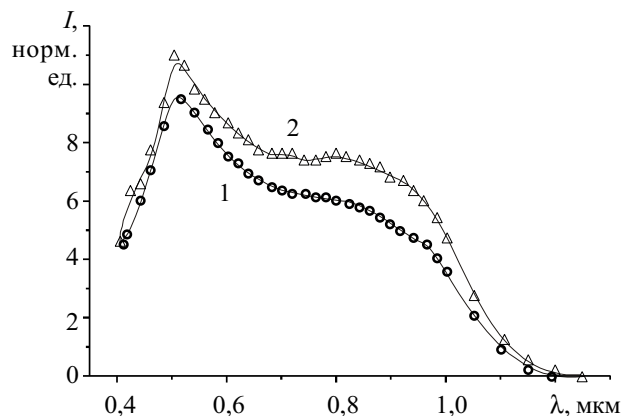


Рис. 7. Спектральная fotocувствительность Au-nSi-структуры: 1 —  $U=1,0$  В; 2 —  $U=5,0$  В

Расширение спектрального диапазона в длинноволновой области спектра связано с глубоким примесным уровнем, расположенным посередине запрещенной зоны в приповерхностной области крем-

ния. Эти уровни при приложении обратного напряжения являются ионизированными. Так, по мере увеличения рабочего напряжения от 1 до 5 В фототок увеличивается. Характерным является то, что фототок в диапазоне  $\lambda=0,92...1,2$  мкм увеличивается синхронно с напряжением.

Таким образом, как световые токи, так и спектральные характеристики модифицированной Au-nSi-структуры с охранными высокоомными слоями с перекрытием металла управляются приложенным напряжением. Создание в приповерхностной области активного слоя из более высокоомного слоя, наряду с расширением спектрального диапазона, повышает фоточувствительность.

**Заключение**

Получены Au-nSi-Al-структуры с встречновключенными выпрямляющими переходами и Au-nSi-структуры с охранными высокоомными слоями с перекрытием металла. Высокая фоточувствительность в коротковолновой области спектра (0,5—0,6 мкм) обеспечивается высоким полем под барьером благодаря отсутствию дефектов на границе перехода "металл—полупроводник".

В Au-nSi-структуре с охранным высокоомным слоем с перекрытием металла образование тянущего поля для генерированных светом носителей заряда за счет диффузионного распределения носителей позволяет получить высокую фоточувствительность в диапазоне спектра от 0,92 до 1,2 мкм.

Полученные структуры представляют интерес для детектирования оптических сигналов.

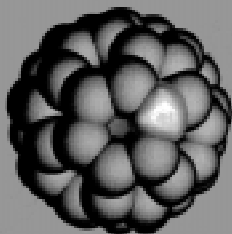
**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1.— М. Мир, 1984.
2. Каримов А. В. Фотоэлектрическое усиление в трехбарьерной структуре // Лазерная техника и оптоэлектроника.— 1993.— № 3.— С. 83—85.
3. Воробец Г. И., Воробец М. М., Стребжев В. Н. и др. Исследование физических механизмов лазерной коррекции и стабилизации параметров структур Al-n<sup>+</sup>-Si-Al с барьером Шоттки // ФТП.— 2004.— Т. 38, вып. 6.— С. 690—692.
4. Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы металл—полупроводник.— М.: Мир, 1975.
5. Слободчиков С. В., Салихов Х. М., Руссу Е. В., Малинин Ю. Г. Гашение тока светом в диодных структурах p-Si-n<sup>+</sup>-ZnO-n-ZnO-Pd // ФТП.— 2001.— Т. 35, вып. 4.— С. 479—481.
6. Аут И., Генцов Д., Герман К. Фотоэлектрические явления.— М.: Мир, 1980.

**ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ**

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА НАНО-ТЕХНОЛОГИЙ И МАТЕРИАЛОВ**

1-3 ноября 2005 года



**NTMEX - 2005**

Москва. Новый Арбат, 36  
здание Правительства Москвы

ООО "Компания МММ ПРОФ"  
107140, г. Москва, ул. В. Красносельская, д.2/1, стр.1  
Тел./факс: (095) 502-19-38, 775-17-20, 502-19-37  
E-mail: mikropof@mail.ru www.mikmexpro.ru

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ**

- |  |   |
|--|---|
| ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ<br>ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА НАНОМАТЕРИАЛОВ | НАДРОН И ОРГАНИКАЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ<br>НА ОСНОВЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ |
| НАНОМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ<br>КОМПОНЕНТОВ И МИКРОСИСТЕМ               | НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ                                |
| УСЛУГИ В ОБЛАСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ                              | ПРИМЕНЕНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ<br>ГОРОДСКОГО КОЗЯЙСТВА   |

**ОРГАНИЗАТОРЫ**

Департамент науки и промышленной политики города Москвы  
Московский комитет по науке и технологиям

Московский комитет по науке и технологиям  
121069, г. Москва, Борокостебловский пер., д.б, стр.3  
Тел.: (095) 202-76-91, 201-23-86.  
Факс: (095) 201-30-95 e-mail: pas@mika.ru

**НОВЫЕ КНИГИ**



**Каганов В. И. Радиотехнические цепи и сигналы.— М.: Высшая школа, 2004.— 25 л.**

Изложен материал по всем разделам вузовской программы одноименного курса. Рассмотрены основы теории по передаче и приему сообщений с помощью радиосигналов, по спектральной теории сигналов и их генерированию, усилению, преобразованию, модуляции, детектированию, демодуляции и обработке. Изложена теория радиоэлектронных линейных, нелинейных и параметрических цепей аналогового и цифрового типов. Приведены 77 программ на основе универсального математического пакета программ «Mathcad» по всем разделам дисциплины, позволяющих с помощью компьютера анализировать и рассчитывать радиотехнические цепи и сигналы.

**НОВЫЕ КНИГИ**

Д. т. н. Е. Н. ПИСЬМЕННЫЙ, к. т. н. В. А. РОГАЧЕВ,  
А. В. БАРАНЮК, Е. В. ЦВЯЩЕНКО

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

Дата поступления в редакцию  
15.04 2005 г.

Оппонент к. т. н. А. О. КОСТИКОВ  
(Ин-т проблем машиностроения  
им. А. Н. Подгорного, г. Харьков)

## ТЕПЛОТВОДЯЩАЯ ПОВЕРХНОСТЬ С ПЛАСТИНЧАТО-ПРОСЕЧНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ ПРИ НИЗКОСКОРОСТНОМ ОБДУВЕ

*Приведены результаты экспериментального исследования и сравнительный анализ тепловой эффективности поверхностей в зависимости от их геометрических характеристик и направления обдува.*

Стремительные темпы развития электронно-вычислительной техники выдвигают на первое место вопросы обеспечения надежной ее работы. Конкурирующие между собой фирмы — производители микропроцессоров стремятся увеличить частоту ядра процессора, внутренний и внешний кэш и т. д. за счет увеличения плотности компоновки полупроводниковых элементов в кристалле микрочипов, что приводит к росту удельной тепловой мощности рассеяния. При этом увеличивается перегрев теплонагруженных элементов, ухудшается тепловой режим работы системы в целом.

В настоящее время широко применяются системы воздушного охлаждения микропроцессоров “кулерного” типа, сочетающие оребренную теплоотдающую поверхность и малогабаритный осевой вентилятор [1, 2]. При этом тепловая эффективность такой системы, как правило, определяется тепловой эффективностью оребренной поверхности [3].

В настоящей статье приведены результаты исследования системы охлаждения кулерного типа, содержащей новую высокоэффективную теплоотдающую поверхность с пластинчато-просечными ребрами (рис. 1).

Исследование тепловых режимов выполнено для паяных медных оребренных поверхностей при различных направлениях обдува ребер низконапорным осевым вентилятором (рис. 2). Основные геометрические характеристики теплоотдающих поверхностей приведены в таблице. Поверхности №№ 1—7 имеют различные значения относительной глубины просечки ребер  $h_p/h$  и угла поворота  $\varphi$  разрезанных частей ребер (“лепестков”) относительно набегающего потока.

Поверхность № 8 представляет собой обычную пластинчато-ребристую поверхность, служащую базовой для сравнения тепловых характеристик.

Для обдува использован вентилятор BS601012H фирмы Vi-Sonic Technology с габаритными размерами  $60 \times 60 \times 10$  мм и частотой вращения крыльчатки  $4500 \text{ мин}^{-1}$ , который закреплялся через теплоизолирующую прокладку непосредственно на оребрении.

Эксперименты выполнены в диапазоне рассеиваемой мощности  $Q=15...65$  Вт и температуры окружающей среды  $t_c=20...23^\circ\text{C}$ . Подвод теплоты к оребренной поверхности осуществлялся с помощью плотно прижатого к основанию тканого резистивного нагревателя, размеры которого совпадают с габаритными размерами основания. Толщина основания поверхностей  $\delta$  составляла 6 мм.

Измерение температурного поля основания осуществлялось медь-константановыми термопарами с диаметром проводов 0,08 мм, равномерно распределенными и зачеканенными в глухие отверстия на по-

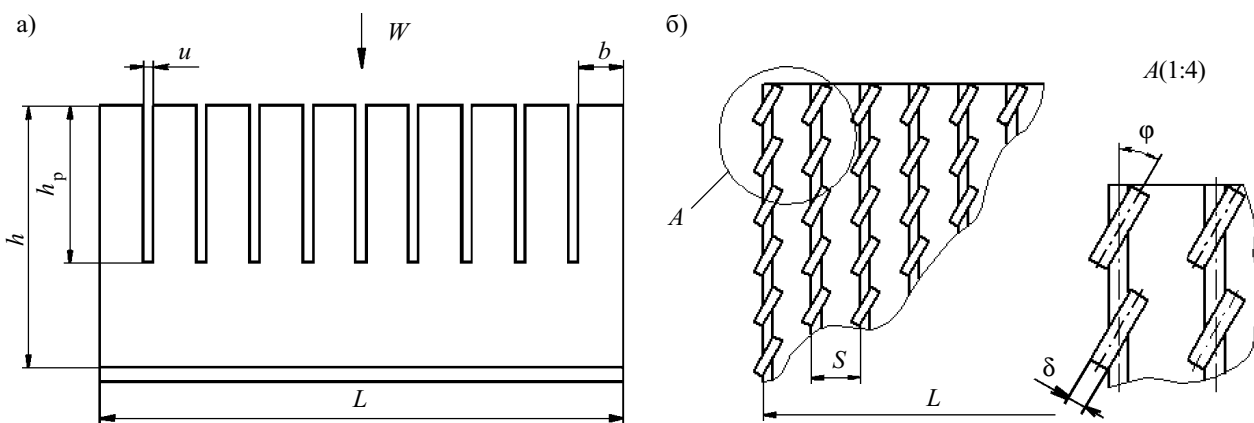


Рис. 1. Конструкция пластинчато-просечного ребра:  
а — вид сбоку; б — вид сверху

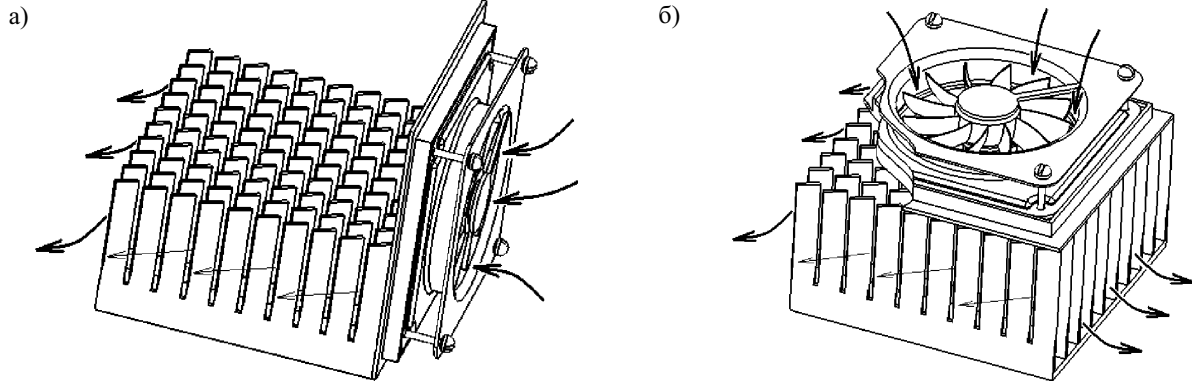


Рис. 2. Схема охлаждения с боковым (а) и верхним (б) расположением вентилятора

верхности основания. Показания термопар регистрировались цифровым многоканальным измерительным преобразователем типа Ш711/1 с выводом на цифропечатающее устройство. Питание электронагревателя осуществлялось переменным током через стабилизатор напряжения, а его мощность контролировалась ваттметром типа Д 529 класса точности 0,5. Температура окружающей среды измерялась лабораторным ртутным термометром с ценой деления шкалы 0,1 °С.

*Геометрические характеристики исследованных поверхностей*

Параметр	Номер поверхности							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$L \times L$ , мм	70×70							
$h$ , мм	35							
$S$ , мм	6,9							
$\delta$ , мм	1,4							
$h_p$ , мм	14	21	28	21	28	21	28	—
$u$ , мм	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	—
$b$ , мм	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	—
$z$	11							
$z_p$	10	10	10	10	10	10	10	—
$\phi$ , °	0	0	0	30	30	45	45	—
$h_p/h$	0,4	0,6	0,8	0,6	0,8	0,6	0,8	—
$F$ , мм <sup>2</sup>	60332							

Здесь  $L$  — линейный размер основания;  $h$  — высота ребра;  $S$  — шаг между ребрами;  $\delta$  — толщина ребра;  $h_p$  — глубина просечки ребра;  $u$  — ширина разрезки;  $b$  — ширина лепестка;  $z$  — количество ребер;  $z_p$  — количество лепестков;  $F$  — площадь теплоотдающей поверхности.

Средняя температура поверхности основания  $t_{осн}$  рассчитывалась путем усреднения значений температуры  $t_i$ , измеренных на участках площадью  $F_i$  по всей поверхности основания:

$$t_{осн} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (1)$$

Средний перегрев (температурный напор) основания вычислялся по соотношению

$$\Delta t = t_{осн} - t_c \quad (2)$$

Рассеиваемая теплота  $Q$  определялась как разность между электрической мощностью, подведенной к нагревателю, и тепловыми потерями (путем теплопроводности) через стенку теплоизолирующей подставки, на которой крепилась исследуемая поверхность.

По результатам экспериментов установлено, что тепловые потери в диапазоне изменения режимных параметров составляли 3...7% от подведенной мощности. Потери теплоты по термоэлектродным проводам оценивались как пренебрежимо малые и при обработке экспериментальных данных не учитывались. Максимальная относительная среднеквадратичная погрешность определения температурного напора  $\Delta t$  для рассматриваемых уровней рассеиваемой мощности не превышала 5%.

Тепловые характеристики исследованных поверхностей при верхнем и боковом обдуве воздухом представлены в виде зависимостей  $\Delta t = f(Q)$  на рис. 3. Из анализа экспериментальных данных следует, что наиболее эффективны поверхности № 4 и № 5, у которых  $\phi = 30^\circ$ .

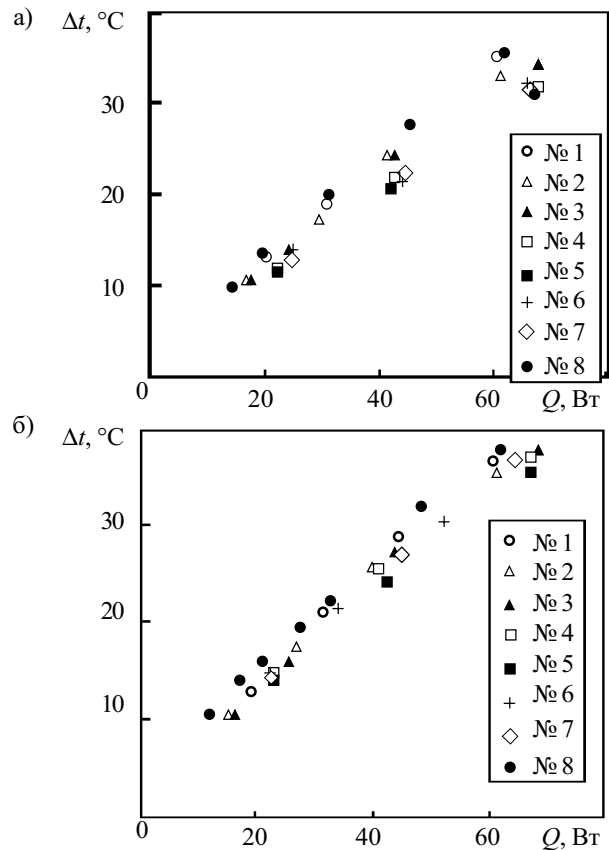


Рис. 3. Тепловые характеристики поверхностей при верхнем (а) и боковом (б) обдуве

Поверхности №№ 1—3, где поворот лепестков отсутствует ( $\varphi=0^\circ$ ), имеют тепловую эффективность в среднем на 20—25% ниже, чем поверхности №№ 4—7. Это объясняется наличием поперечной составляющей скорости омывания лепестков, повернутых относительно набегающего потока в поверхностях №№ 4—7, т. к. при поперечном омывании пластины интенсивность теплообмена выше, чем при продольном.

При незначительных мощностях рассеяния ( $Q < 20$  Вт) и температурах перегрева ( $\Delta t < 12^\circ\text{C}$ ) в границах экспериментальных погрешностей наблюдается сближение значений тепловой эффективности всех исследуемых поверхностей независимо от геометрических характеристик и формы оребрения.

При боковом обдуве наблюдается меньшее расхождение массива данных по сравнению с верхним обдувом, но самую лучшую тепловую эффективность в обоих случаях сохраняют поверхности № 4 и № 5.

Из анализа экспериментальных данных следует, что независимо от конструктивно-геометрических характеристик оребрения верхний обдув поверхностей на 20—30% эффективнее, чем боковой.

По-видимому, при верхнем подводе охлаждающего воздуха обеспечивается интенсивный теплообмен (за счет небольшой толщины пограничного слоя на ребрах и основании) и турбулизация потока. При боковом направлении обдува происходит продольное омывание ребер и основания с постепенным нарастанием пограничного слоя на них. Это приводит к ухудшению теплоотвода поверхностью в целом несмотря на существование отрывных течений на лепестках ребер, интенсифицирующих теплообмен.

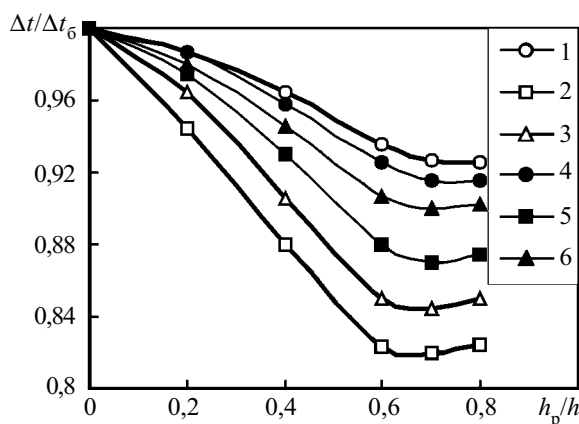


Рис. 4. Влияние глубины резетки  $h_p/h$  на относительный перегрев  $\Delta t/\Delta t_6$  при различных значениях  $\varphi$  верхний обдув: 1 —  $0^\circ$ ; 2 —  $30^\circ$ ; 3 —  $45^\circ$ ; боковой обдув: 4 —  $0^\circ$ ; 5 —  $30^\circ$ ; 6 —  $45^\circ$

С целью выявления влияния основных геометрических характеристик ребер на тепловую эффективность и установления их оптимальных значений экспериментальные данные обобщены и приведены на рис. 4 и 5 в виде графических зависимостей  $\Delta t/\Delta t_6 = f(h_p/h; \varphi)$  при  $Q=60$  Вт, ( $\Delta t_6$  — температура перегрева базовой поверхности № 8).

Приведенные на рис. 4 экспериментальные кривые носят экстремальный характер и с ростом параметра  $h_p/h$  расслаиваются. Из рисунка видно, что оптимальная относительная глубина просечки ребер находится в диапазоне 0,6—0,7 и не зависит от направления обдува и угла поворота лепестков  $\varphi$ .

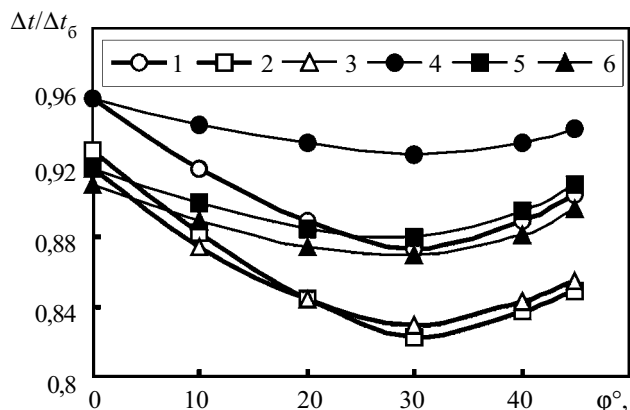


Рис. 5. Влияние угла поворота лепестков  $\varphi$  на относительный перегрев  $\Delta t/\Delta t_6$  при различных значениях  $h_p/h$  верхний обдув: 1 —  $h_p/h=0,4$ ; 2 —  $0,6$ ; 3 —  $0,8$ ; боковой обдув: 4 —  $h_p/h=0,4$ ; 5 —  $0,6$ ; 6 —  $0,8$

Наименьшие значения относительной температуры перегрева наблюдаются у поверхностей с  $\varphi=30^\circ$ , т. е. №№ 4, 5 при верхнем обдуве (кривая 2). Независимо от направления обдува у поверхностей №№ 1—3 с  $\varphi=0^\circ$  (кривые 1, 4) относительная температура перегрева самая высокая, т. е. их абсолютная температура близка к температуре базовой поверхности № 8.

Для всех приведенных на рис. 5 зависимостей  $\Delta t/\Delta t_6 = f(\varphi)$  экстремум соответствует углу  $\varphi=30^\circ$ . Наименьшую относительную температуру перегрева имеет поверхность № 4 с  $h_p/h=0,6$  при верхнем обдуве (кривая 2). Самый большой относительный перегрев наблюдается для поверхности с  $h_p/h=0,4$  при боковом обдуве (кривая 4). С увеличением угла поворота лепестков ( $\varphi > 30^\circ$ ) независимо от направления обдува и глубины просечки ребер тепловые показатели поверхностей ухудшаются и их температура перегрева повышается.

\*\*\*

Таким образом, применение просечки ребер на относительную глубину  $h_p/h=0,6...0,7$  с поворотом лепестков на угол  $\varphi=30^\circ$  приводит к повышению тепловой эффективности на 30—35% по сравнению с традиционной пластинчато-ребристой поверхностью. Исследования также показали, что верхний обдув поверхностей более эффективен, чем боковой.

Использование малогабаритных теплоотводящих поверхностей с предлагаемым просечным оребрением в системах низкоскоростного струйного обдува для различных теплонагруженных устройств может на 20—25% снизить их температуру перегрева.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Макаров С. Процессорные кулеры: летнее изобилие // Компьютерное обозрение.— 2001.— № 29.— С. 16—31.
2. Потапов М. Процессорные кулеры: не дай компьютеру “замерзнуть” // Домашний ПК.— 2002.— № 7.— С. 25—31.
3. Письменный Е. Н., Бурлей В. Д., Терех А. М. и др. Влияние резетки, поворотов и отгибки ребер на теплоаэродинамические характеристики поверхностей теплообмена // Пром. теплотехника.— 2003.— Т. 25, № 1.— С. 10—16.

Д. т. н. А. Ф. БЕЛЯНИН, д. ф.-м. н. М. И. САМОЙЛОВИЧ,  
к. х. н. К. А. КОВАЛЬСКИЙ, К. Ю. ПЕТУХОВ

Россия, г. Москва, ЦНИТИ “Техномаш”, Московский гос. ун-т  
им. М. В. Ломоносова  
E-mail: belyanin@technomash.ru

Дата поступления в редакцию  
29.04 2005 г.

Оппонент д. т. н. В. В. БАРАНОВ  
(БГУИР, г. Минск)

## ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК AlN И ZnO И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

*Показаны условия получения и эксплуатационные характеристики слоистых структур, включающих AlN, ZnO, алмаз и алмазоподобный углерод, для акусто- и эмиссионной электроники.*

Интерес к AlN и ZnO обусловлен их физическими, в частности, полупроводниковыми и пьезоэлектрическими свойствами [1—3]. В последнее десятилетие стало очевидным, что более эффективным является использование в технических устройствах не отдельных материалов, а слоистых структур. С использованием слоистых структур, содержащих слой AlN, созданы устройства эмиссионной электроники с низким порогом эмиссии [4]. Это связано с тем, что алмазоподобные материалы, к которым относится AlN, при определенных условиях обладают отрицательным электронным сродством. Использование слоистых структур алмаз/AlN (ZnO), где AlN или ZnO — слой пьезоэлектрика, позволяет повысить верхнюю границу частотного диапазона устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ). На слоистых структурах алмаз/ZnO изготовлены фильтры, линии задержки и другие устройства на ПАВ, работающие на частоте >2,5 ГГц [5].

Целью настоящей работы являлось получение пленок AlN и ZnO с контролируемым содержанием и строением кристаллических фаз, формирование многослойных структур, включающих эти пленки, и созда-

ние на их основе устройств электронной техники с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

### Формирование пленок

Пленки AlN и ZnO с заданными примесным составом, концентрацией и строением кристаллической фазы получали методом магнетронного распыления. Применялась специально разработанная установка. В установке использовались два магнетрона без эластомерных уплотнений (цельнометаллические магнетроны диаметром 138 мм, **рис. 1**). Магнетроны размещались внутри водоохлаждаемых патрубков, закрепленных на плите установки.

Для введения в формируемые пленки AlN и ZnO легирующей примеси использовали составные мишени (см. рис. 1) из основы (Al или Zn) и вставки из металла — источника примеси (Cu, Mo, Zn). Концентрация примеси ( $C_{пр}$ ) в пленках AlN (ZnO), полученных распылением составных мишеней, зависела от соотношения площадей Al (Zn) и пластины металла — источника примеси на поверхности мишени в области распыления ( $S_{Al(Zn)}$  и  $S_{мет}$ ), их коэффициентов распыления ( $K_{Al(Zn)}$  и  $K_{мет}$ ) и условий процесса осаждения (расположение подложки относительно мишени и др.):

$$C_{пр} = S_{мет} S_{мет} K_{мет} / S_{Al(Zn)} S_{Al(Zn)} K_{Al(Zn)}$$

где  $S_{Al(Zn)}$  и  $S_{мет}$  — площади профиля областей распыления Al (Zn) и пластины металла — источника примеси, измеренные по профилограммам ( $S_{Cu(Mo, Zn)}$ ).

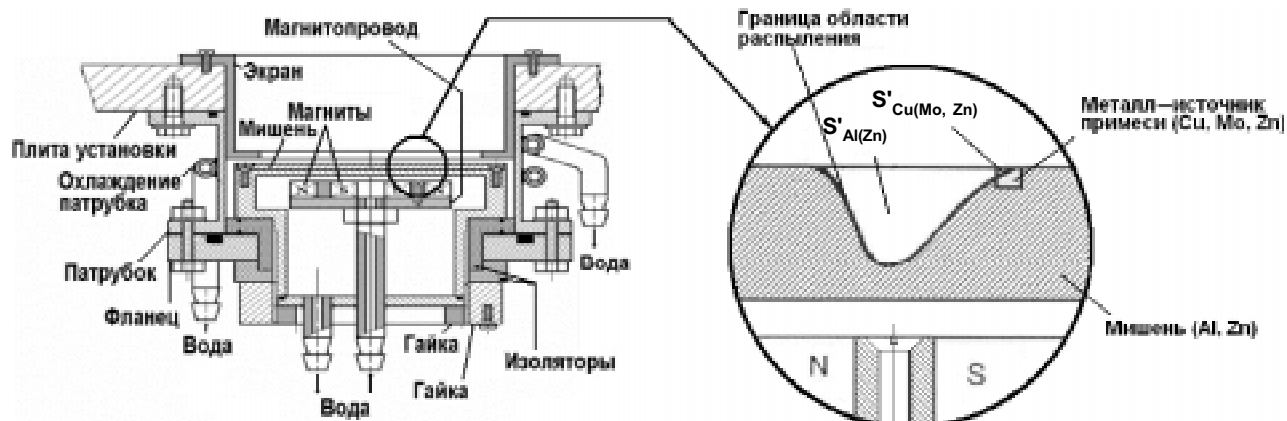


Рис. 1. Конструкция цельнометаллического магнетрона.  
На выделенном фрагменте представлен профиль области распыления составной мишени

Условия осаждения пленок при формировании слоистых структур методом ВЧ магнетронного распыления

Пленка	Материал мишени	Состав газа	Давление газа, Па	Мощность разряда, Вт	Электрическое смещение на подложкодержателе, В	Температура подложки, К	Скорость осаждения, мкм/ч
AlN (рентгеноаморфная фаза)	Al	Ar + 60 об.% N <sub>2</sub>	0,8	700	-50	473-573	0,4-0,5
AlN (кристаллическая фаза)	Al	Ar + 60 об.% N <sub>2</sub>	0,8	700	+45	473-573	1-1,3
AlN:Mo	Al + Mo (составная)	Ar + 60 об.% N <sub>2</sub>	0,6	600	30-40	293-573	1-1,4
ZnO	Zn	Ar + 50 об.% O <sub>2</sub>	0,8-1,2	200-350	20-40	373-573	0,7-1,2
ZnO:Cu	Zn + Cu (составная)	Ar + 50 об.% O <sub>2</sub>	0,6	250	20-30	293-573	1-1,2

Параметры процессов получения пленок AlN и ZnO представлены в табл. 1. Подложки в процессе формирования пленок были неподвижны относительно распыляемой мишени.

**Строение сформированных пленок**

Все полученные пленки были поликристаллические, текстурированные по <0001>. Для пленок ZnO разориентация зерен относительно оси <0001> текстуры составляла  $\sigma=0,7...4,6^\circ$ , отклонение оси текстуры относительно нормали к рабочей поверхности подложки <1,5°, степень кристалличности (концентрация кристаллической фазы в объеме пленки)  $J=60$  об.%.

У синтезированных пленок AlN  $\sigma=0,5...3^\circ$ , наклон оси текстуры <2°,  $J=95$  об.%.

Полученные пленки имели столбчатое (волоконистое) строение, при этом направление оси текстуры <0001> соответствует направлению волокон, образующих пленку (рис. 2, растровый CARL ZEISS LEO 1430 VP и просвечивающий JEM-200CX электронные микроскопы). Волокнистое строение скола и отсутствие следов огранки на ростовой поверхности указывают на нетангенциальный механизм роста пленок. Рост упорядоченных пленок пьезоэлектрических материалов на неориентирующих подложках в неравновесных условиях кристаллизации при использовании методов распыления называют ростом в условиях потери морфологической устойчивости [6].

Легирующая примесь входила как в рентгеноаморфную, так и в кристаллическую фазы пленок. Указанные фазы выявляются методом просвечивающей электронной микроскопии (рис. 3, а, б). Размер областей когерентного рассеяния рентгеновского излучения (ОКР) кристаллической фазы нелегированных пленок AlN составляет 35-63 нм, легированных — 20-50 нм. Пленки толщиной 10-30 нм образованы нанокристаллитами конической формы в виде пирамидок, основания которых имеют псевдогексагональную форму (рис. 3, а). Методом дифракционного контраста установлено, что нанокристаллиты AlN очень несовершенны. В них наблюда-

ются следы огранки на ростовой поверхности пленки AlN. Рост упорядоченных пленок пьезоэлектрических материалов на неориентирующих подложках в неравновесных условиях кристаллизации при использовании методов распыления называют ростом в условиях потери морфологической устойчивости [6].

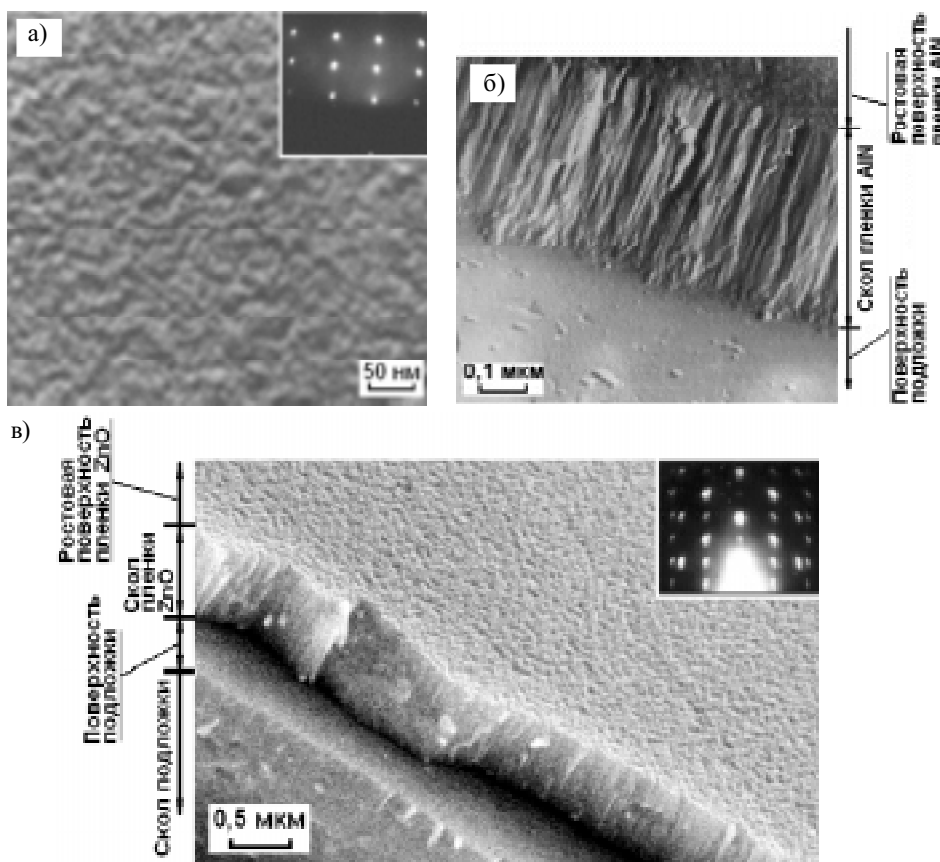


Рис. 2. Строение ростовых поверхностей и сколов пленок: а, б — AlN; в — ZnO. На вставках представлены электрограммы на отражение

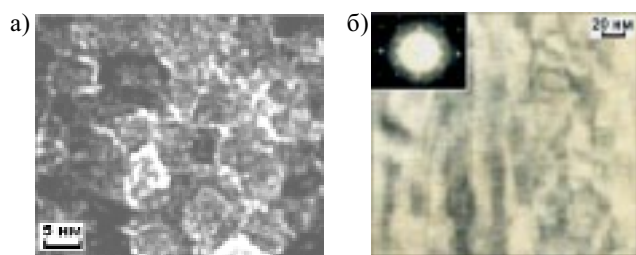


Рис. 3. Строение пленки AlN, сформированной ВЧ магнетронным распылением:

*a* — пленка толщиной 30 нм (светлые полосы — рентгеноаморфная фаза); *б* — отдельное волокно (кристаллическая фаза) пленки толщиной 3,6 мкм. На вставке — электронограмма на просвет

ется большое число плоскостных дефектов, в частности, возможны дефекты упаковки, двойники (рис. 3, *б*). Концентрацию примеси в легированных пленках определяли методом инверсионной вольтамперометрии (вольтамперометрическая система СВА-1БМ). Использование метода приводит к реальному снижению предела обнаружения на несколько порядков по сравнению с методами, используемыми в микроэлектронике.

С увеличением концентрации легирующей примеси степень кристалличности пленок AlN и ZnO уменьшается и при концентрации 2 ат.% не превышает 50 об.%. Легирующая примесь размещается в виде отдельных атомов как в кристаллической, так и в рентгеноаморфной фазах AlN (ZnO). Кроме того, примесь осаждается по границам волокон в виде включений металла и соответствующего нитрида или оксида, которые, по данным рентгеновской дифрактометрии, рентгеноаморфные (до концентрации примеси примерно 10 ат.%).

#### Применение пленок AlN и ZnO в электронной технике

**Ненакаливаемые катоды.** Эффект снижения порога эмиссии при нанесении на катод пленки диэлектрического материала был установлен у острых катодов из Si (нитевидных кристаллов высотой порядка 100 мкм с радиусом кривизны при вершине <25 нм, сформированных методом «пар—жидкость—кристалл») с покрытием из AlN толщиной 0,1—2 мкм [4, 7] (рис. 4). Измерение автоэмиссии острых катодов проводилось в вакуумной камере при давлении  $1,33 \cdot 10^{-6}$  Па.

Были исследованы эмиссионные свойства структур Si/алмаз(АУП) и Si/алмаз(АУП)/AlN(ZnO), в которых алмазные или алмазоподобные углеродные пленки (АУП) синтезировали различными методами (табл. 2).

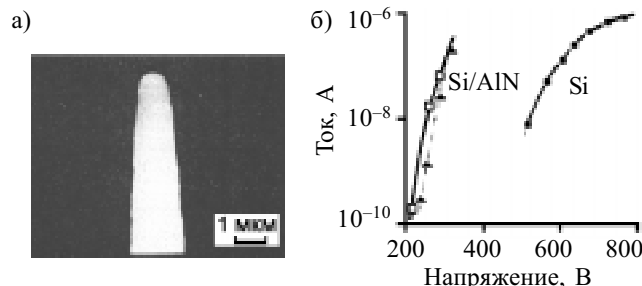


Рис. 4. *a* — электронно-микроскопический снимок острейшего катода из Si/AlN; *б* — вольт-амперные характеристики острых ненакаливаемых катодов из Si и Si/AlN (зазор между катодом и экраном  $\Delta=200$  мкм)

Измерение эмиссионных характеристик планарных катодов на основе слоистых структур проводилось в импульсном режиме на специально разработанной вакуумной установке при давлении  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па. Для оценки числа эмиссионных центров использовался экран, включающий структуру InSnOx/люминофор. Применяли люминофор на основе ZnS:Cu, Al (As).

У структуры Si/алмаз, в которой алмаз синтезировали методом нагретой нити, эмиссия не обнаружена. Поскольку на сколе алмазной пленки напряженность поля в силу геометрии ячейки значительно больше, чем на поверхности, то эмиссия была получена только со скола. Вольт-амперные характеристики представлены на рис. 5, *a*.

Для оценки эмиссионных свойств поверхности поликристаллического алмаза ребра были покрыты слоем изолирующего материала. При этом при полях  $\leq 30$  В/мкм эмиссия не обнаружена. Дальнейшее увеличение напряженности поля приводило к пробоям в зазоре между катодом и анодом (слой InSnOx). После осаждения пленки AlN толщиной  $\approx 10$  нм на поверхность поликристаллического алмаза, синтезированного методом нагретой нити, с поверхности слоистой структуры алмаз/AlN была получена эмиссия. При этом количество эмиссионных центров на поверхности подложки, подсчитанное по изображению на аноде, было около 100. Для пленок поликристаллического алмаза порог эмиссии составлял примерно 20 В/мкм. При полях более 30 В/мкм происходили пробои в зазоре с исчезновением эмитирующих центров.

Было установлено, что лучшие эмиссионные характеристики проявляются при использовании АУП. Для формирования АУП применялись методы тлеющего разряда, а также магнетронный разряд (см. табл. 2). Улучшение эмиссионных свойств катодов на основе АУП, сформированных на Si-подложках

Таблица 2

#### Параметры процессов осаждения и фазовый состав углеродных пленок

Метод	Рабочий газ	Давление газа, Па	Температура подложки, К	Скорость осаждения, мкм/ч	Состав пленки, об.%
Нагретая нить	1,5 об.% CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub>	$3 \cdot 10^3$	800—1300	0,2—2	Алмаз (>99%)
Дуговой разряд	1,5...4 об.% CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub>	$>10^3$	873—1473	До 40	Алмаз (до 99%)
Тлеющий разряд	1,5...4 об.% CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub>	$>10^3$	800—1300	$\approx 6$	АУП
Магнетронный разряд	Ag + H <sub>2</sub> ;				АУП
Высокая частота	Ag + C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	3,8...6	393...573	0,02...0,08	
Постоянный ток		1,0...7,5	473	0,1...0,16	

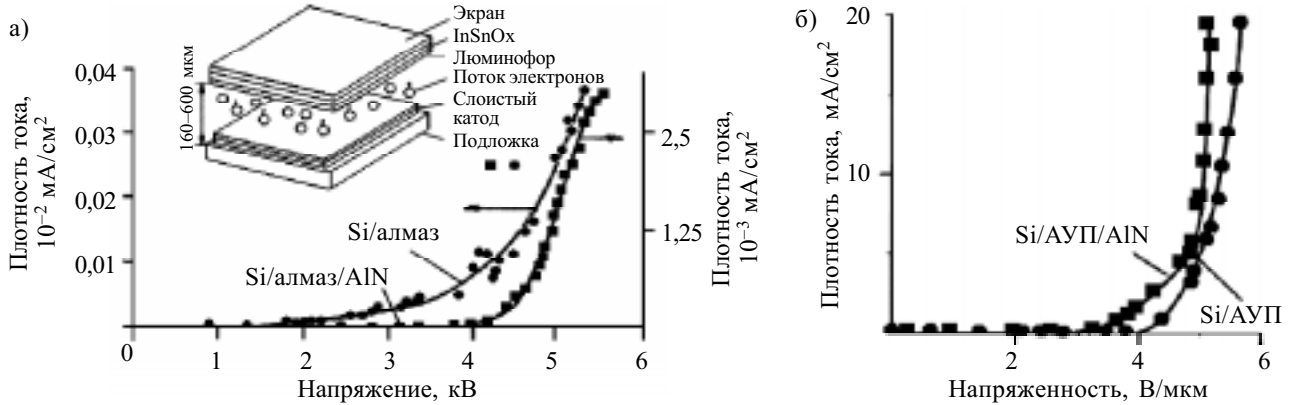


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики слоистых структур:  
*a* — Si/алмаз и Si/алмаз/AlN (на вставке показана схема измерения); *б* — Si/AUP и Si/AUP/AlN

Условия измерений ВАХ:

*a* —  $\Delta=160...200$  мкм, частота  $f=50$  Гц, длительность импульса  $\tau=20...25$  мкс; *б* —  $\Delta=500$  мкм,  $f=50$  Гц,  $\tau=20...30$  мкс

методом тлеющего разряда, достигалось за счет осаждения на его эмитирующую поверхность слоя AlN (слоистая структура Si/AUP/AlN).

Было обнаружено увеличение крутизны ВАХ структуры Si/AUP/AlN при плотности тока  $j > 5$  mA/cm<sup>2</sup> (рис. 5, б). Значение величины резкого увеличения крутизны ВАХ находилось в пределах  $2 \leq j \leq 7$  mA/cm<sup>2</sup>. Уменьшения порога эмиссии по сравнению с ненакаливаемым катодом на основе Si/AUP не обнаружено. Установленная высокая крутизна характеристики дает возможность применить эти катоды для приборов с управляющим напряжением  $\leq 200$  В при плотности тока  $10 < j < 20$  mA/cm<sup>2</sup>. Легирование пленок AlN не приводило к снижению порога эмиссии.

На легированных пленках AlN:Mo было установлено, что эмиссия электронов происходит с вершин глобул на поверхности пленки (вершины волокон кристаллической фазы) [8]. При некоторых условиях (положительное электрическое смещение на подложке-держателе, малая мощность разряда) формируются пленки, имеющие мелкозернистое строение с равносильными зернами (рис. 6, а). Число центров эмиссии от глобулярной поверхности пленок AlN, не имеющих волокнистого строения (рис. 6, б), снижается на несколько порядков, и центры эмиссии не связаны с вершинами глобул.

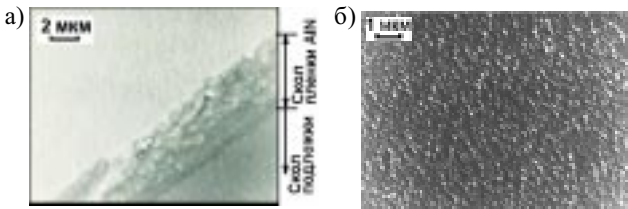


Рис. 6. Строение скола (*a*) и поверхности (*б*) мелкозернистой пленки AlN

Исследовалась возможность создания планарных ненакаливаемых катодов на основе слоистой структуры, содержащей пленки оксида цинка: Si/AUP/ZnO. Слой ZnO уменьшили эффективность эмиссии (рис. 7, а). Легирование пленок ZnO медью также не привело к улучшению эмиссионных свойств (рис. 7, б).

Строение неэмитирующей ростовой поверхности пленки алмаза (стадия двойникового) представлено

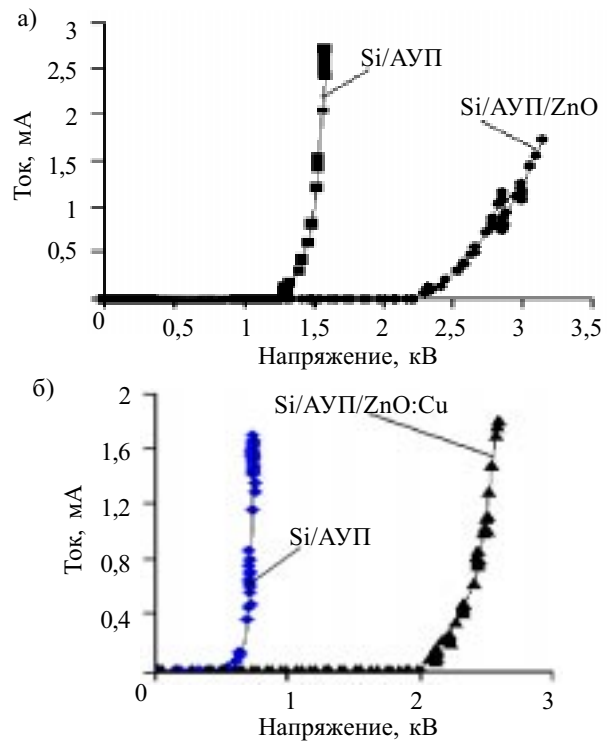


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики слоистых структур:  
*a* — Si/AUP и Si/AUP/ZnO; *б* — Si/AUP и Si/AUP/ZnO:Cu.

Условия измерений:  $\Delta=500$  мкм,  $f=50$  Гц,  $\tau=20...30$  мкс

на рис. 8, а (растровый электронный микроскоп TESLA BS-350). Шероховатость ростовой поверхности поликристаллических алмазных пленок в зависимости от их толщины (9–200 мкм) изменялась в пределах  $R_z=2...13$  мкм.

Наблюдаемые на сколах пленок алмаза зерна имеют пластинчатое строение независимо от стадий их формирования (рис. 8, б). Размер ОКР пленок алмаза, рассчитанный по рентгенограммам, соответствовал толщине пластин, образующих зерна и наблюдаемых с использованием электронного микроскопа. Эмиссия электронов со сколов алмазной пленки происходит только от границ пластин, формирующих зерна. При использовании АУП эмиссия с поверхности происходит по границам наноглобул, выявляемых



Рис. 8. Электронно-микроскопические снимки поверхности (а) и скола (б) слоя алмаза, выращенного на подложке из Si{111} (на вставке представлен скол отдельного зерна); в — атомно-силовая микроскопия поверхности слоя алмазоподобного углерода

атомно-силовой микроскопией (рис. 8, в, микроскоп Nanoscope 3), при этом шероховатость ростовой поверхности АУП толщиной до 3 мкм составляла  $R_z < 0,1$  мкм.

При применении литографических методов возможности получения центров эмиссии (острий) высокой плотности на поверхности большой площади достаточно ограничены. Увеличение плотности центров эмиссии (до  $2,5 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup> на площади  $>(20 \times 20)$  см<sup>2</sup> достигалась за счет использования опаловых матриц (ОМ) — наноструктур на основе кубических упаковок наносфер SiO<sub>2</sub> с размерами сфер от 200 до 400 нм, сформированных на подложках из различных материалов (до 10 слоев).

В качестве плоского ненакаливаемого катода (с острыми центрами эмиссии) устройств отображе-

ния информации в настоящей работе использовались слоистые структуры, включающие слой ОМ, а также AlN, ZnO, АУП и пленки металлов: ОМ/Ni(Ti)/АУП, ОМ/Ni(Ti)/АУП/AlN и др. Процесс формирования ОМ проводился с использованием специально разработанных методик [9].

При формировании многослойных ненакаливаемых катодов пленки Ni и Ti получали магнетронным на постоянном токе распылением мишеней из Ni или Ti в Ar-плазме при давлении 0,5—2 Па. Оптимальные условия осаждения пленок при формировании слоистых структур на основе опаловых матриц ОМ/AlN, ОМ/Ni/АУП и др. приведены в табл. 1 и 2.

В сформированных ненакаливаемых катодах на основе слоистых структур пленки Ni и Ti были рентгеноаморфны, тогда как в пленках AlN и ZnO содержалась поликристаллическая фаза (до 40 об.%). Технология формирования тонких пленок обеспечивала сохранность строения опаловой матрицы и эмиссионных свойств углеродной пленки. Применение для формирования АУП метода тлеющего разряда осложнено размягчением и плавлением опаловой матрицы при температурах  $>900$  К, необходимых для получения АУП с хорошими функциональными характеристиками.

Изготовленные структуры представляли подложку (ситалл СТ-50, плавный кварц С-5, Si и др.) с последовательно нанесенными на нее наноструктурами из 5—10 слоев правильных кубических упаковок SiO<sub>2</sub> и пленкой из алмазоподобного углерода, ZnO, AlN, Ni или слоистой структурой Ni(Ti) + АУП и др. Сплошная пленка АУП осаждалась толщиной до 2 мкм.

Изменение конфигурации (заострение) сфер SiO<sub>2</sub>, лежащих на поверхности, проводили нанесением на них слоев эмитирующего материала (алмазоподобный углерод, AlN), при этом могут быть использованы пассивные слои из металла или диэлектрика, на которые наносят эмитирующий слой.

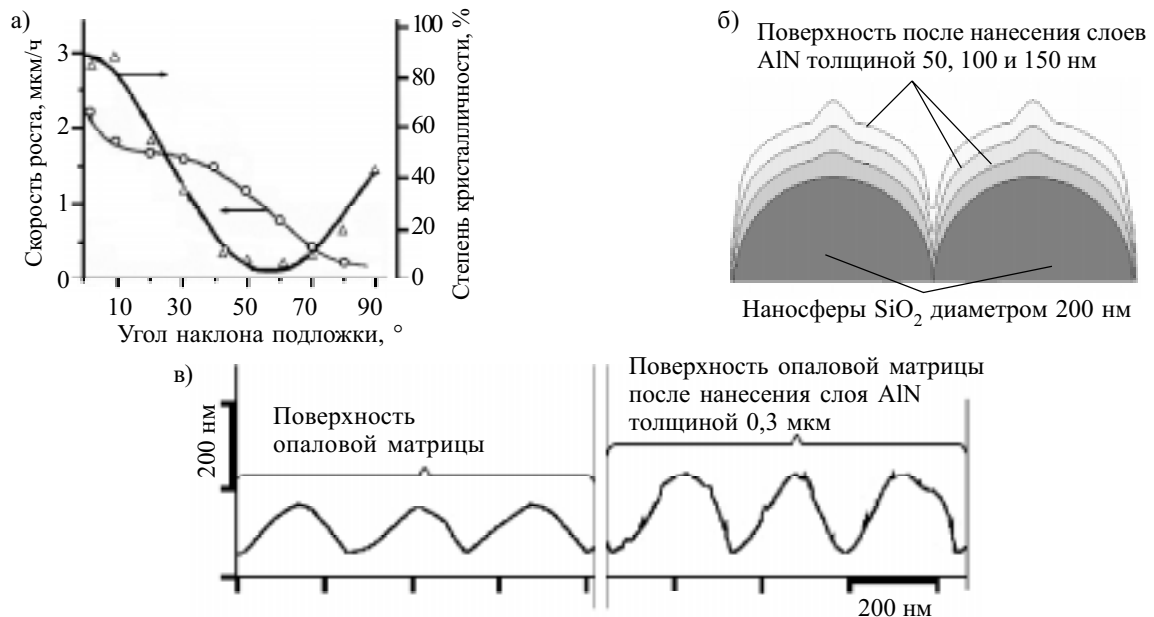


Рис. 9. а — влияние угла наклона подложки к поверхности мишени на скорость осаждения пленок AlN; б, в — изменение конфигурации поверхности наносфер SiO<sub>2</sub> опаловой матрицы после нанесения слоев AlN: компьютерная модель (б), профилограммы поверхности опаловой матрицы (в)

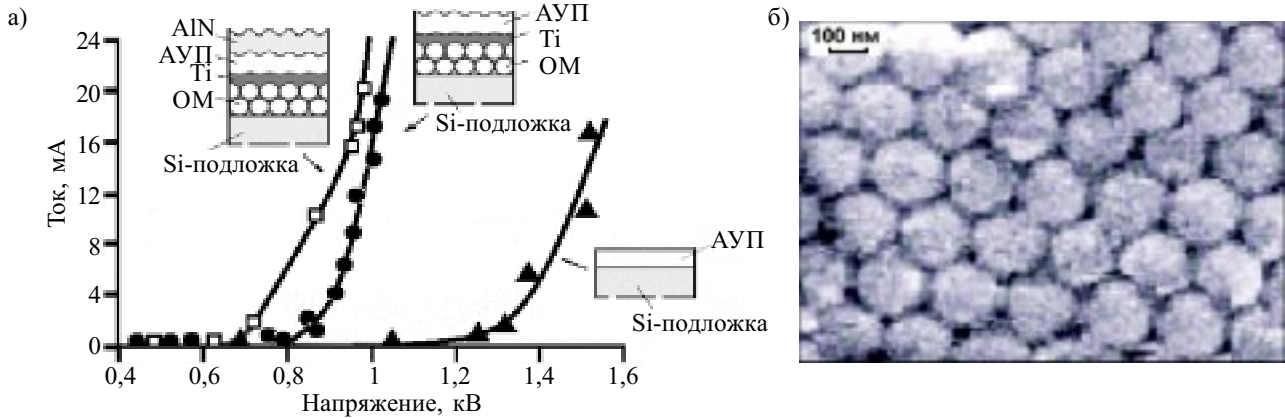


Рис. 10. *a* — вольт-амперные характеристики слоистых структур Si/AУП, Si/ОМ/АУП и Si/ОМ/АУП/AlN (условия измерений:  $\Delta=160...200$  мкм,  $f=50$  Гц,  $\tau=20...25$  мкс); *б* — строение поверхности верхнего слоя опаловой матрицы после осаждения двухслойной структуры: Ti (0,1 мкм) и АУП (0,3 мкм)

При использовании методов распыления эффект заострения связан с изменением скорости формирования участков пленки, расположенных под различными углами относительно источника распыления (рис. 9, *a*). В зависимости от толщины осажденного слоя меняется форма поверхности, получаемой при заострении сферы SiO<sub>2</sub> (рис. 9, *б, в*).

Были исследованы эмиссионные характеристики планарных ненакаливаемых катодов, включающих слой кубических упаковок наносфер SiO<sub>2</sub> диаметром 200±10 нм. На рис. 10, *a* представлены ВАХ слоистых структур Si/AУП, Si/ОМ/АУП и Si/ОМ/АУП/AlN, в которых 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 (рис. 10, *б*).

**Устройства на поверхностных акустических волнах.** Применение в СВЧ-устройствах на ПАВ (частота  $f > 1$  ГГц) монокристаллов SiO<sub>2</sub>, LiNbO<sub>3</sub> и других пьезоэлектрических материалов, а также многослойных структур ситалл/AlN (ZnO), плавный кварц/AlN (ZnO) и др., требует при формировании встречно-штыревых преобразователей (ВШП) реализации микронной и субмикронной фотолитографии — из-за невысокой скорости распространения ПАВ.

На рис. 11, *a* приведены достигнутые уровни частот устройств на ПАВ в зависимости от ширины электродов ВШП (*d*) при использовании в качестве звукопроводов монокристаллических пьезоэлектриков и слоистых структур. Наиболее перспективным материалом слоистого звукопровода является алмаз (скорость ПАВ  $V_R \approx 10$  км/с). В настоящее время имеются сведения только о трех сочетаниях алмаз/пьезоэлектрик, используемых для создания устройств на ПАВ: алмаз/ZnO, алмаз/AlN и алмаз/LiNbO<sub>3</sub> [7, 10]. При создании устройств на ПАВ СВЧ-диапазона (>1 ГГц) пара алмаз/AlN особенно перспективна, т. к. среди пьезоэлектриков AlN наиболее близок к алмазу по скорости ПАВ (у AlN  $V_R \approx 6$  км/с, у ZnO  $V_R \approx 3$  км/с). Ниобат лития (LiNbO<sub>3</sub>,  $V_R \approx 3$  км/с) в виде кристаллических упорядоченных пленок трудно получить технологически. Кроме того, пленки LiNbO<sub>3</sub> разлагаются при хранении на воздухе.

Для сравнительной оценки влияния изменения толщины пленки AlN и значений упругих постоянных выполнен расчет зависимости  $V_R$  от толщины пьезоэлектрической пленки  $kh$  ( $k=2\pi/\lambda$ , где  $\lambda$  — длина ПАВ) при изменении значений упругих постоянных пленки для ориентационного соотношения  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\{0001\}[\text{10}\bar{1}0]/\text{AlN}\{0001\}$ . На рис. 11, *б* представлена рассчитанная зависимость  $V_R(kh)$  для

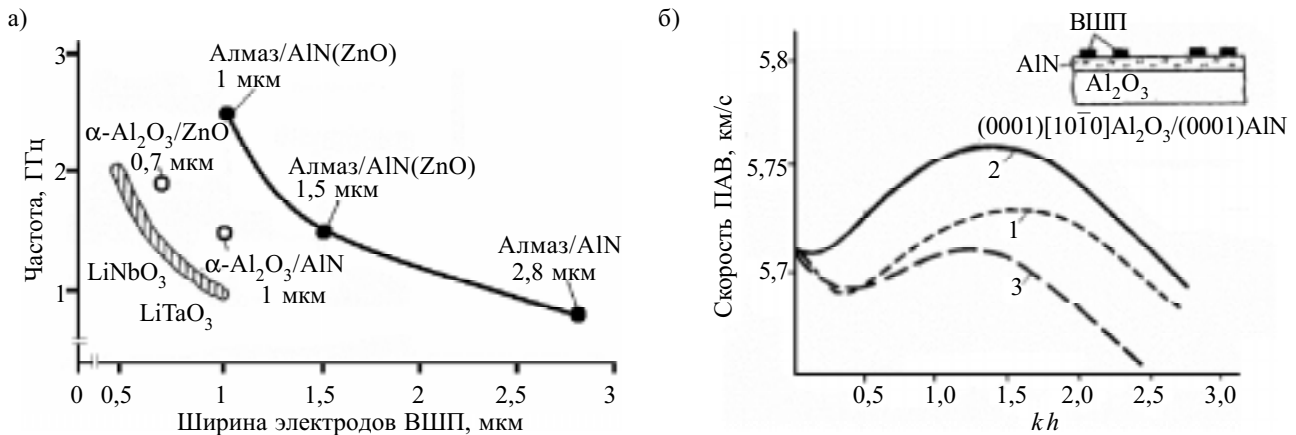


Рис. 11. *a* — зависимости рабочей частоты устройства на ПАВ от ширины электродов (*d*) ВШП для монокристаллических и слоистых звукопроводов; *б* — изменение фазовой скорости в зависимости от толщины пленки AlN

случая нулевых изменений упругих постоянных  $C_{22}$  и  $C_{33}$  (кривая 1), а также при их увеличении на 7% (кривая 2) и уменьшении на 7% (кривая 3).

Представленные зависимости показали, что изменение значений упругих постоянных пьезоэлектрика значительно сильнее влияет на скорость ПАВ, чем изменение толщины пленки. При относительной толщине пленки AlN порядка 1,0 и более измеренная экспериментально скорость ПАВ незначительно (<3%) отличается от расчетной, что свидетельствует о высоком качестве формируемых пленок AlN. (Под высоким качеством здесь следует понимать не степень текстурованности пленки, а близость значений упругих постоянных материала к их значениям, измеренным на образцах, выращенных эпитаксиально из паровой фазы, которые были взяты за исходные при проведении расчета скорости ПАВ.) Расхождение экспериментальной и теоретической зависимостей при малых толщинах пленки AlN объясняется малой степенью кристалличности пленки в начале ее роста.

Упругие свойства пьезоэлектрической пленки целиком определяются технологическим процессом ее формирования. От режимов процесса получения зависят также и значения пьезоэлектрических модулей,

определяемых наличием примесей, внутренних напряжений в пьезоэлектрической пленке и основном слое многослойного звукопровода.

Было исследовано влияние материала подложки и строения пьезоэлектрических пленок AlN слоистого звукопровода на рабочую частоту и вносимые потери ( $\gamma$ ) (несогласованный режим) линии задержки (табл. 3).

В слоистых структурах алмаз/AlN (ZnO) пленки AlN и ZnO были сильно текстурованы по <0001> ( $\sigma=0,5...3^\circ$  и  $\sigma=0,7...2^\circ$ , соответственно) (рис. 12 и 13). Применялись пленки AlN ( $V_R=5,67$  км/с, температурный коэффициент расширения  $\alpha=3,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , удельное электрическое сопротивление  $\rho > 10^{14}$  Ом·см) и ZnO ( $V_R \approx 3$  км/с,  $\alpha=4,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $\rho > 10^8$  Ом·см). Использованные для создания устройств на ПАВ пленки алмаза состояли из кристаллической (95...99 об.%) и рентгеноаморфной фаз, при этом кристаллическая фаза была сформирована аксиально текстурованными по <111> и <110> зернами. Размер ОКР пленок AlN составлял 35—63 нм, а ZnO — 11—35 нм. Для увеличения  $\rho$  пьезоэлектрических пленок ZnO их легировали медью до концентрации  $\approx 0,3$  ат.%. Акустическая волна движется по зернам алмаза, состоящим

Таблица 3

Влияние строения пленок AlN, сформированных на различных подложках, на рабочую частоту и вносимые потери линий задержки

Слоистый звукопровод	Параметры, характеризующие строение пленки AlN				Параметры линии задержки	
	J, %	Размер ОКР, нм	$\sigma, ^\circ$	Период решетки c, нм	$f, \text{ МГц}$	$\gamma, \text{ дБ}$
Поликор/AlN{0001}	34	38	2,6	0,4988	72,3	45
Si{100}/AlN{0001}	40	44	3,2	0,4860	63,8	—
Стекло К-8/AlN{0001}	59	63	2,2	0,4995	40,5	35
Ситалл СТ-50/AlN{0001}	51	44	2,4	0,4984	54,4	36
Ситалл СТ-38/AlN{0001}	28	45	2,3	0,4988	54,0	38
Gd <sub>3</sub> Ga <sub>5</sub> O <sub>12</sub> {111}/AlN{0001}	35	51	3,4	0,4987	41,6	40
Gd <sub>3</sub> Ga <sub>5</sub> O <sub>12</sub> /(Y, Bi) <sub>3</sub> (Fe, Ga) <sub>5</sub> O <sub>12</sub> /AlN{0001}	26	66	2,1	0,4991	42,0	40
$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> {0001}/AlN{0001}	95	58	0,9	0,4996	71,0	33
Si/алмаз/AlN{0001}	34	38	2,7	0,4988	114,6	46

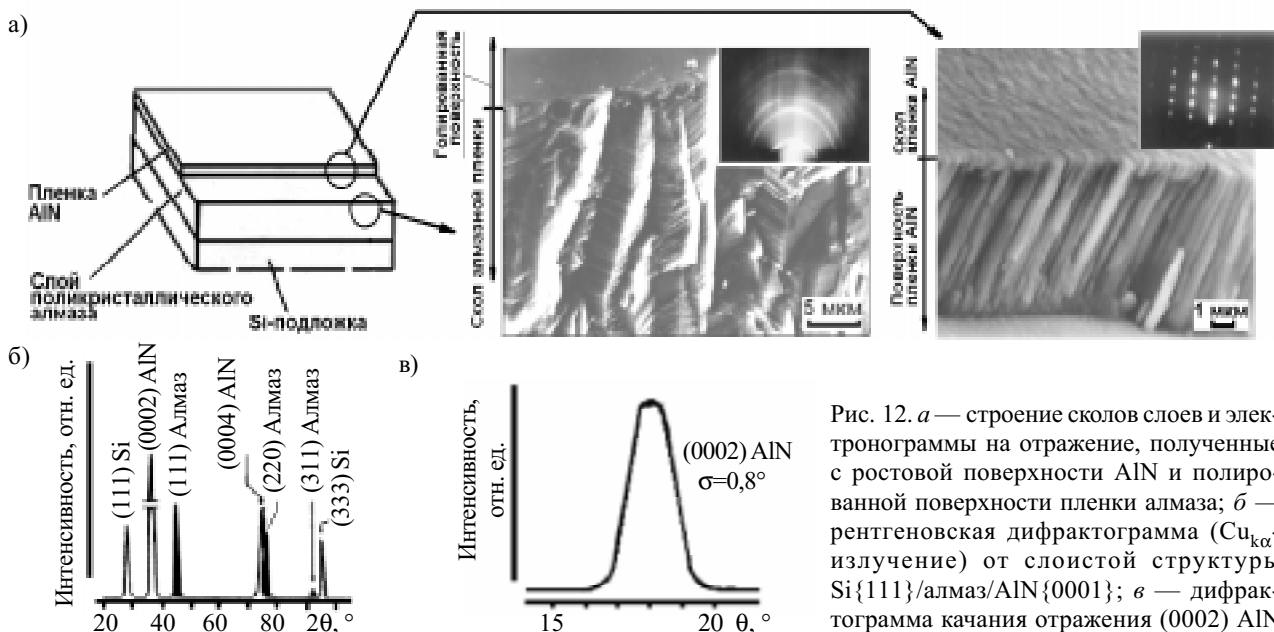


Рис. 12. а — строение сколов слоев и электронограммы на отражение, полученные с ростовой поверхности AlN и полированной поверхности пленки алмаза; б — рентгеновская дифрактограмма ( $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ -излучение) от слоистой структуры Si{111}/алмаз/AlN{0001}; в — дифрактограмма качания отражения (0002) AlN

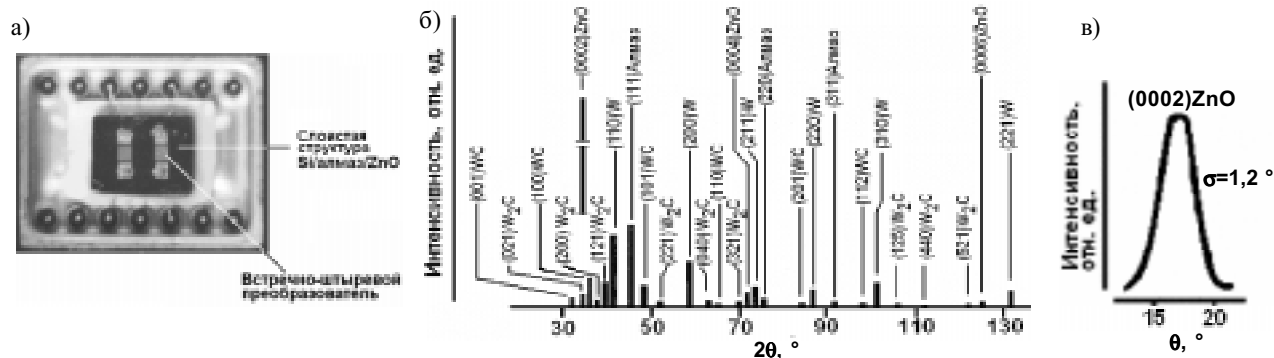


Рис. 13. а — линия задержки на ПАВ на слоистом звукопроводе Si/алмаз/ZnO; б — штрих-рентгенограмма ( $Cu_{K\alpha}$ -излучение) от слоистой структуры W/алмаз/ZnO{0001}; в — дифрактограмма качания отражения (0002) ZnO

из аксиально текстурированных пластин толщиной 50...100 нм, и монокристаллическим волокнам AlN или ZnO с поперечным размером 50...300 нм.

Отличительной особенностью слоистых звукопроводов является зависимость коэффициента электро-механической связи ( $k^2$ ) и  $V_R$  от толщины слоя пьезоэлектрика, скорости распространения ультразвука, упругих, диэлектрических, пьезоэлектрических констант и ориентационных соотношений отдельных слоев, а также от выбранных направлений распространения ПАВ и конструкции устройства [11]. При использовании конструкции W/алмаз/ZnO/ВШП (толщина слоя алмаза  $h_1=42$  мкм, толщина пьезоэлектрической пленки ZnO  $h=6$  мкм,  $d=40$  мкм, число пар электродов  $M=8,5$ )  $V_R=8,82$  км/с. Была исследована зависимость  $k^2$  от толщины пленки ZnO. При  $h/\lambda > 0,3$  значение  $k^2$  постоянно и примерно равно 1,1% (рис. 14).

Для создания фильтров на ПАВ применяли слоистые структуры Si(W)/алмаз/AlN(ZnO)/ВШП. Использовались беспористые пленки поликристаллического алмаза (размер ОКР 800—1000 нм) толщиной  $h_1=12...86$  мкм. Были изготовлены фильтры и линии

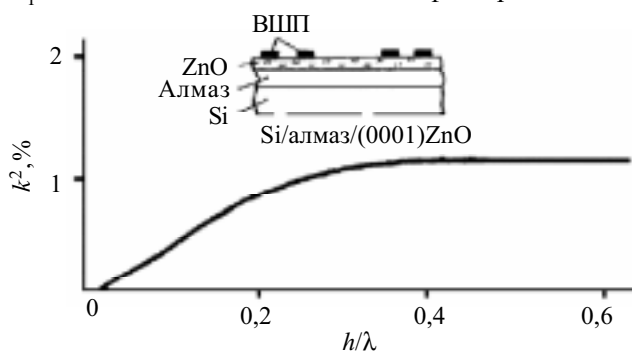


Рис. 14. Зависимость коэффициента электро-механической связи от толщины пленки ZnO для конструкции линии задержки Si/алмаз/ZnO/ВШП

Таблица 4  
Характеристики датчиков температуры на ПАВ

Подложка	Рабочая частота, МГц	Чувствительность, кГц/К	Температурный коэффициент частоты, 1/К
Стекло ВВС	40	2	$5 \cdot 10^{-5}$
	80	4	$5 \cdot 10^{-5}$
Ситалл СТ-50	41	0,5	$1,2 \cdot 10^{-5}$
	82	1	$1,2 \cdot 10^{-5}$

задержки на ПАВ, работающие на частотах 0,1146, 0,4435, 0,8149 и 1,5200 ГГц. Эквидистантные ВШП изготавливали из пленки Al толщиной порядка 0,2 мкм фотолитографией — методом контактной печати (для фильтров на частоты 0,1146, 0,4435 и 0,8149 ГГц) и методом проекционной фотолитографии (для фильтров на частоту 1,5200 ГГц).

На основе линий задержки на ПАВ со звукопроводом подложка/AlN созданы опытные образцы датчиков различных физических величин. Изменение параметров окружающей среды приводит к изменению частоты генератора, которое фиксируется преобразователем "частота—код" или частотомером. Характеристики изготовленных датчиков температуры представлены в табл. 4. Нелинейность температурного коэффициента частоты датчиков, выполненных на стеклянных подложках, была  $< 1\%$ .

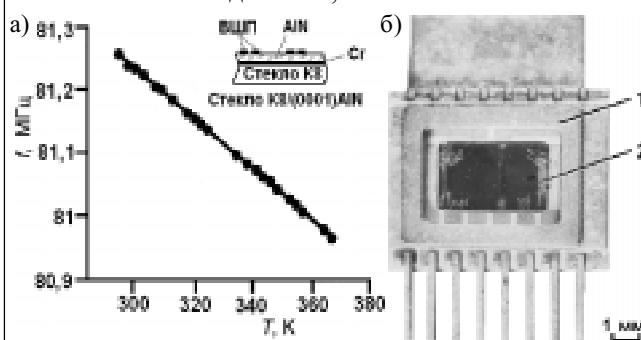


Рис. 15. а — зависимость частоты ПАВ-генератора от температуры; б — датчик температуры (1 — металлический корпус с кварцевым основанием; 2 — линия задержки на ПАВ)

Конструкция линии задержки представлена на вставке рис. 15, а. Использовали специально разработанный керамический корпус на основе  $Al_2O_3$ , работающий на частоте 500 МГц. Фотография линии задержки в корпусе показана на рис. 15, б.

**Закключение**

Разработаны оборудование и технологии магнетронного распыления, позволяющие формировать рентгеноаморфные и выращивать при низких температурах ( $< 600$  К) на неориентирующих подложках пленки AlN и ZnO с упорядоченным строением кристаллической фазы, по внутреннему строению близких к монокристаллу и обладающих воспроизводимыми характеристиками; легировать при выращива-

нии эти пленки различными примесями; изготавливать многослойные структуры с заданными функциональными характеристиками, необходимыми для создания устройств электронной техники.

Рассмотрено влияние на ВАХ фазового состава и строения слоев слоистых ненакаливаемых катодов. Нелегированные слои AlN позволяют уменьшить порог эмиссии острых Si-катодов и увеличить крутизну ВАХ планарных катодов на основе углеродных материалов.

Показана возможность использования слоистой структуры подложка/AlN (ZnO) (подложка — ситалл, сапфир, слой поликристаллического алмаза и др.) при изготовлении устройств на ПАВ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Benjamin M. C., Wang C., Davis R. F., Nemanish R. J. Observation of a negative electron affinity for heteroepitaxial AlN on a-(6H)-SiC(0001) // Appl. Phys. Lett.— 1994.— Vol. 64, N 24.— P. 3288—3290.

2. Ziman I. Electronic components conference to spotlight advances in materials // Electronics.— 1984.— Vol. 57, N 9.— P. 134—136.

3. Акустические кристаллы. Под ред. М. П. Шаскольской.— М.: Наука, 1982.

4. 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.

5. Shikata S., Nakahata H., Higaki K. et al. 2.5 GHz SAW bandpass filter using polycrystalline diamond / In: Advances in New Diamond Science and Technology.— Tokyo: MYU, 1994.— P. 697—700.

6. Чернов А. А. Теория устойчивости гранных форм роста кристаллов // Кристаллография.— 1971.— Т. 16, вып. 4.— С. 842—863.

7. Belyanin A. F., Bouilov L. L., Zhirmov V. V. et al. Application of aluminum nitride films for electronic devices // Diamond and Related Materials.— 1999.— Vol. 8.— P. 369—372.

8. Белянин А. Ф., Пащенко П. В., Солдатов Е. С. и др. Исследование автоэмиссионных свойств сильнолегированных пленок AlN // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники.— 1998.— Вып. 6—7.— С. 235—236.

9. Самойлович М. И., Клещева С. М., Белянин А. Ф., Житковский В. Д. Трехмерные нанокомпозиты на основе упорядоченных упаковок наносфер кремнезема. Части 1—3 // Микросистемная техника.— 2004.— № 6—8.

10. Ishihara M., Nakamura T., Kokai F., Koga Y. Preparation of AlN and LiNbO<sub>3</sub> thin films on diamond substrates by sputtering method // Diamond and Related Materials.— 2002.— N 11.— P. 408—412.

11. Поверхностные акустические волны / Под ред. А. Олинера.— М.: Мир, 1981.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

**СВІТ 2005**  
ЕЛЕКТРОНІКИ

Украина, Киев  
9-12 ноября 2005

**Мир  
на кончиках пальцев**

8-я международная специализированная выставка  
электронных компонентов и комплектующих  
«Мир электроники 2005»

Генеральный  
информационный спонсор  
**ЭЛЕКТРОННЫЕ  
КОМПОНЕНТЫ**  
Украина

[www.presto.kiev.ua](http://www.presto.kiev.ua)

Организатор выставки — ООО «PrestoExpo»  
03062, Украина, г. Киев, ул. Чистяковская, 2, оф. 11  
тел./факс: +38 (044) 449-94-76, 443-73-50  
e-mail: [info@presto.kiev.ua](mailto:info@presto.kiev.ua) [www.presto.kiev.ua](http://www.presto.kiev.ua)

Д. т. н. Л. П. АНУФРИЕВ, д. т. н. В. В. БАРАНОВ,  
Я. А. СОЛОВЬЕВ, М. В. ТАРАСИКОВ

Республика Беларусь, г. Минск, Завод «Транзистор»,  
Белорусский гос. университет информатики  
и радиоэлектроники  
E-mail: vvb@bsuir.unibel.by

Дата поступления в редакцию  
14.04 2005 г.

Оппонент д. ф.-м. н. Г. В. КУЗНЕЦОВ  
(КНУ им. Тараса Шевченко, г. Киев)

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛЕНОК СИЛИЦИДА ПАЛЛАДИЯ ДЛЯ МОЩНЫХ ДИОДОВ ШОТТКИ

*Термическое испарение палладия в высоком вакууме позволяет получать слои Pd<sub>2</sub>Si непосредственно в процессе напыления без последующей термообработки.*

Диоды Шоттки — перспективный класс полупроводниковых приборов, которые ввиду более высокого быстродействия и малых падений напряжения при прямом смещении обладают преимуществами перед диодами, имеющими *p-n*-переходы, и это делает их привлекательными в качестве элементной базы силовой электроники.

В качестве барьеров Шоттки интерес представляют силициды металлов платиновой группы, имеющие большую высоту потенциального барьера к кремнию [1, с. 305], что обуславливает низкие токи утечки и снижает температурную зависимость электрических параметров приборов.

Известен ряд способов получения силицидов: твердофазное взаимодействие предварительно нанесенного на кремний металла при термическом воздействии; совместное распыление металлической и кремниевой мишеней либо распыление составной или спрессованной многокомпонентной мишени; химическое осаждение из газовой фазы [2, с. 108—119].

Первый из указанных способов позволяет сформировать самосовмещенные контакты. Кроме того, дан-

ный способ позволяет сделать диод Шоттки менее чувствительным к загрязнению поверхности контактов перед нанесением пленки металла, поскольку переход "кремний—силицид" (силицид — материал с преимущественно металлическим типом связи) образуется не на самой поверхности подложки, а на некоторой глубине [2, с. 99].

Целью настоящей работы является разработка технологии получения пленок силицида палладия твердофазной реакцией пленки металлического палладия с кремниевой подложкой для создания мощных диодов Шоттки.

Пленки палладия толщиной 0,1 мкм наносились на подложки монокристаллического кремния КЭФ 0,5 (111) после их обработки в 2%-ном водном растворе плавиковой кислоты. Нанесение пленок производилось резистивным испарением высокочистого палладия из вольфрамового испарителя при давлении  $6 \cdot 10^{-4}$  Па и температуре 200°C на установке вакуумного напыления УВН РЭ.Э-60. Затем осуществлялся отжиг структур при температуре 450°C в течение 20 мин. Исследовались пленки при помощи рентгеновского дифрактометра ДРОН-2, а также Оже-электронного спектрометра РН-660 (Perkin Elmer, США).

Рентгеноструктурный анализ неотожженных пленок идентифицировал до 40% кристаллической фазы Pd<sub>2</sub>Si гексагональной структуры с текстурой в плоскости (002), а также рефлексы чистого палладия.

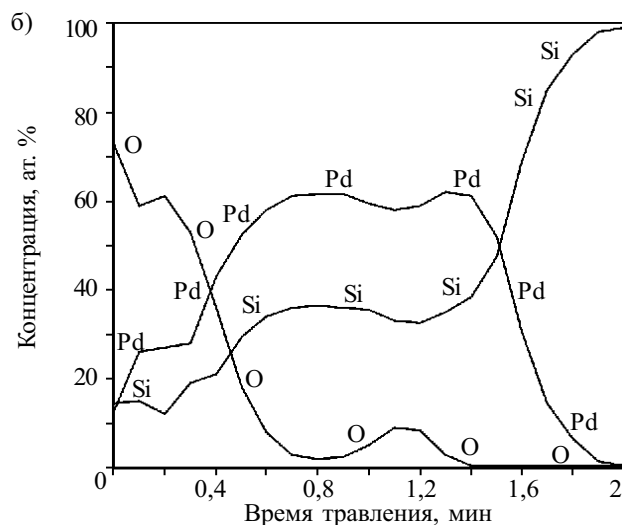
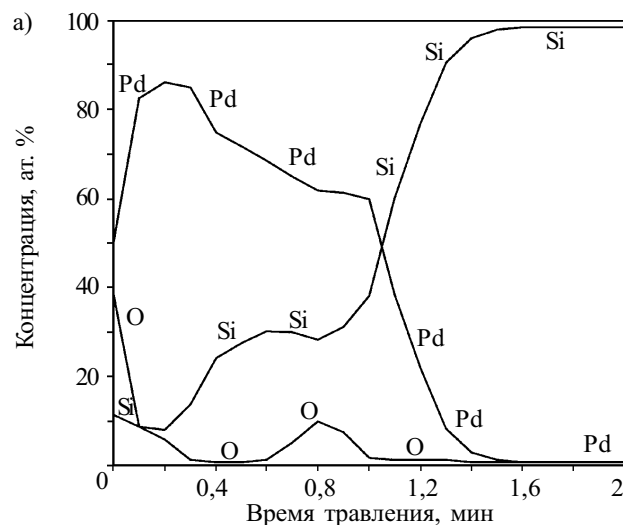


Рис. 1. Профиль распределения элементов по глубине структуры Pd/Si:

а — после нанесения; б — после отжига

После отжига установлено 100% кристаллической фазы Pd<sub>2</sub>Si.

Оже-электронная спектроскопия неотожженных образцов показала наличие переходного слоя силицида палладия Pd<sub>2</sub>Si, о чем свидетельствует соответствующая «полка» на профиле распределения элементов по глубине структуры Pd/Si (рис. 1, а). После отжига весь металлический палладий переходит в силицидную фазу (рис. 1, б).

Из рис. 1 также видно присутствие кислорода вблизи границы раздела Pd/Si, что обусловлено наличием тонкого слоя естественного диоксида кремния на поверхности кремниевой подложки перед нанесением палладия.

Сравнительный анализ показывает, что после отжига увеличивается содержание кислорода в приповерхностном слое из-за окисления кремния, оказавшегося на поверхности после реакции силицидообразования. Слой SiO<sub>2</sub> на поверхности Pd<sub>2</sub>Si делает проблематичным в дальнейшем формирование надежного контакта со слоем молибдена.

Пленки палладия наносились также на эпитаксиальные структуры 8,5 КЭФ 2,4 /КЭМ 0,003 (111) с р-охранным кольцом. Площадь контакта "палладий-кремний", заключенная внутри охранного кольца, составляла 8,6·10<sup>-6</sup> м<sup>2</sup>. После формирования структуры диода Шоттки (рис. 2) производилась сборка кристаллов в корпус ТО-220 с последующими исследованиями вольт-амперных характеристик (ВАХ).

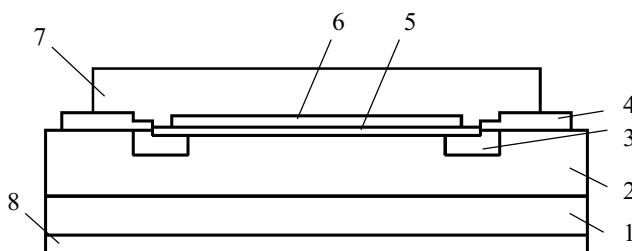


Рис. 2. Структура диода Шоттки:

1 — Si-подложка; 2 — эпитаксиальный слой n-типа; 3 — охранное кольцо; 4 — слой SiO<sub>2</sub>; 5 — слой силицида палладия; 6 — слой молибдена p-типа; 7 — слой сплава "алюминий—кремний"; 8 — непланарная металлизация титан/никель/серебро

Поскольку переходный слой силицида палладия был сформирован непосредственно в процессе осаждения, для обеспечения контакта Mo/Pd<sub>2</sub>Si непрореагировавший палладий удалялся в растворе "царской водки" непосредственно перед нанесением слоя молибдена.

Высота барьера Шоттки на сформированных диодных структурах составила 0,72—0,74 В, что хорошо согласуется с известными данными [1, с. 305].

На рис. 3 приведены результаты измерения ВАХ диодных структур при различных значениях температуры. Как видно из рис. 3, а, уровень обратного тока при рабочем напряжении 100 В изменяется от 10 мкА при комнатной температуре до 200 мА при температуре 175°С. Таким образом, верхний температурный диапазон эксплуатации сформированных

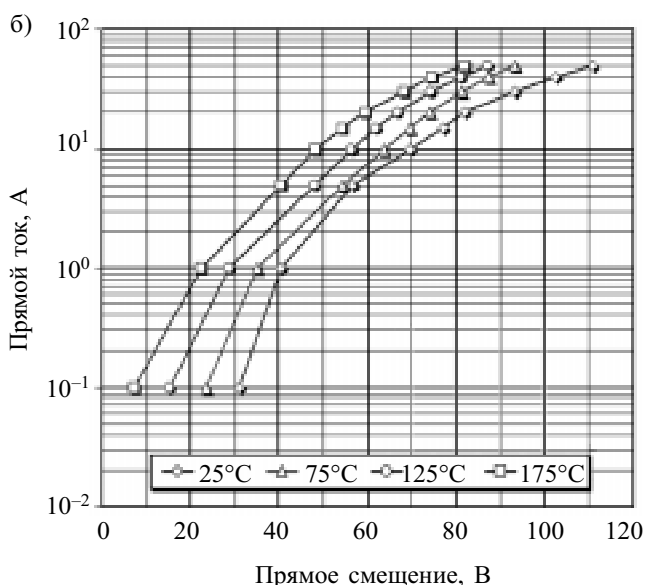
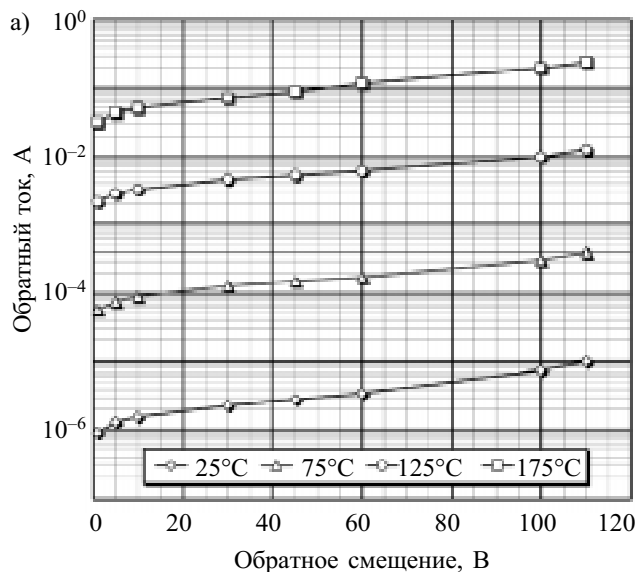


Рис. 3. ВАХ выпрямляющих контактов Pd<sub>2</sub>Si/Si при различных значениях температуры:

а — обратная ветвь; б — прямая ветвь

диодных структур составляет 150°С. Величина падения напряжения при номинальном прямом токе 25 А составила 0,88—0,94 В. Полученные электрические параметры находятся на одном уровне с аналогом 30СТQ100 фирмы International Rectifier.

\*\*\*

Таким образом, термическое испарение палладия в высоком вакууме позволяет получать переходные слои Pd<sub>2</sub>Si, пригодные для формирования барьерных электродов мощных диодов Шоттки, непосредственно в процессе напыления без применения последующей термообработки.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: Кн. 1.— М.: Мир.—1984.
2. Мюрарка Ш. Силициды для СБИС.— М.: Мир, 1986.

А. Ю. ЛИПИНСКИЙ, А. Н. РУДЯКОВА, к. ф.-м. н. В. Г. ПИЦЮГА

Украина, Донецкий национальный университет  
E-mail: lipinski@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
27.04 2005 г.

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

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕСЫ С ЦИФРОАНАЛОГОВЫМ КАНАЛОМ КОМПЕНСАЦИИ

*Предлагаемая система автоматизации процесса непрерывного точного взвешивания дает высокую точность измерений при сравнительной простоте измерительной установки.*

При экспериментальном исследовании физических свойств сегнетоэлектриков возникает необходимость в непрерывной регистрации массы кристаллов.

Методы точного взвешивания получили достаточно широкое распространение при исследовании магнитной восприимчивости слабомагнитных веществ. Большинство из них обычно основано на измерении механической силы, которая действует на образец, помещенный в неоднородное магнитное поле [1]. К числу методов, обладающих высокой чувствительностью, относятся маятниковые и крутильные весы, а также рычажные весы с электромагнитной компенсацией. Все они дают возможность измерять силу порядка  $10^{-7}$  Н.

Маятниковые и крутильные весы отличаются достаточно сложной конструкцией, требуют частой настройки и калибровки, что в условиях длительного эксперимента делает практически невозможным их использование. В случае рычажных весов электромагнитную компенсацию изменения массы удобно использовать для ввода экспериментальных данных в управляющую ЭВМ. При этом алгоритм измерения заключается в постоянной компенсации отклонения подвижной системы весов от нулевого положения изменением силы тока в компенсирующей катушке.

Система автоматизации, рассматриваемая в данной работе, может применяться в любой установке, которая производит измерения нулевым методом и имеет электромагнитный компенсатор, что создает необходимые условия для реализации на этой основе автоматической цифровой системы слежения.

В основе преобразователя "масса—напряжение" лежит система электронных весов с электромагнитной компенсацией, предложенная Д. И. Волковым и Л. А. Пшеничкиным [1, с. 91—98]. Структурная схема установки приведена на **рис. 1**.

На оси электродинамической системы, состоящей из постоянного магнита 1 и подвижной катушки 2, жестко закреплена стрелка-коромысло 3. На одном конце коромысла на вольфрамовой нити 4 закреплен исследуемый образец 5, на другом — противовес 9.

На коромысле, в месте его закрепления с осью электродинамической системы, установлено зеркало 7, ниже которого расположены источник света 8 и дифференциальный фоторезистор 6. Луч света от источника 8, отражаясь от зеркала, попадает на фоторезистор. В зависимости от угла наклона коромысла изменяется положение светового пятна на поверхности дифференциального фоторезистора, в результате чего область пониженного сопротивления смещается от нулевого положения, и потенциал среднего вывода фоторезистора тоже становится отличным от нуля.

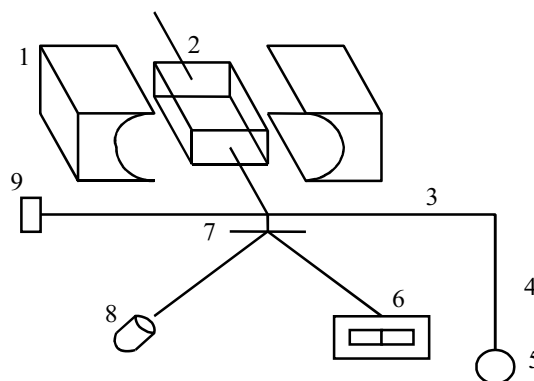


Рис. 1. Структурная схема преобразователя

Измерение массы осуществляется нулевым методом. Для этого через компенсационную катушку электродинамической системы пропускается постоянный ток силой до 200 мА, при этом магнитное поле катушки взаимодействует с полем постоянного магнита. Изменяя силу тока в катушке, возвращают подвижную систему в нулевое положение. Нулевое положение коромысла весов отмечают по равенству сопротивлений плеч дифференциального фоторезистора. Масса измеряемого образца определяется по силе тока в компенсационной катушке.

На **рис. 2** приведена функциональная схема устройства согласования электромеханической части весов с управляющей ЭВМ, в задачу которой входит формирование компенсирующего тока и преобразование сигнала разбаланса от дифференциального фоторезистора в цифровой код.

Устройство согласования включает в себя следующие основные узлы:

— цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), преобразующий цифровой код от управляющей ЭВМ в токозадающий аналоговый сигнал;

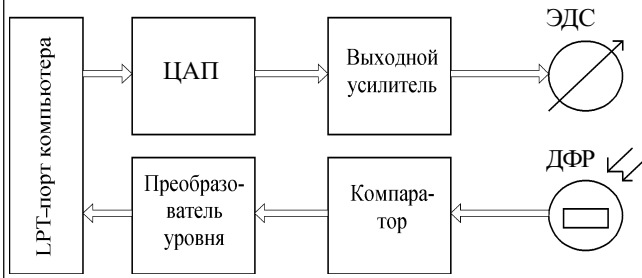


Рис. 2. Функциональная схема устройства согласования

— выходной усилитель, согласующий слаботочный выход ЦАП с низким входным сопротивлением компенсирующих катушек электродинамической системы ЭДС;

— компаратор, служащий для преобразования изменения сопротивления дифференциального фоторезистора (ДФР) в двоичный сигнал (высокий или низкий уровень);

— преобразователь уровня, осуществляющий преобразование уровней сигнала с выхода компаратора к ТТЛ-уровням.

На рис. 3 приведена принципиальная электрическая схема устройства согласования.

ЦАП реализован на микросхеме К572ПА1А [2]. На выходе ЦАП установлен преобразователь тока в напряжение на операционном усилителе IC2 К140УД7, работающем в режиме суммирования токов и служащем для преобразования выходного тока ЦАП в напряжение. Между преобразователем "ток—напряжение" и компенсационной катушкой L1 электродинамической системы установлен эмиттерный повторитель на транзисторе VT1. Резистор R19 ограничивает максимальный ток через катушку L1. На операционных усилителях IC3, IC4 собран компаратор-преобразователь, сравнивающий напряжение на среднем выводе дифференциального фоторезистора с опорным напряжением, снимаемым с делителя R4, R5, R17. Резистор R17 устанавливает ширину области, которая определяется как баланс весов. Необходимость включения этого резистора в схему обусловлена дискретностью значений компенсирующего напряжения. Преобразование сигнала с выхода компаратора к уровню ТТЛ осуществляется триггером Шмидта, реализованным на элементах 2И–НЕ микросхемы К155ЛА3. Диоды VD1, VD2 служат для защиты входа триггера Шмидта от напряжения обратной полярности.

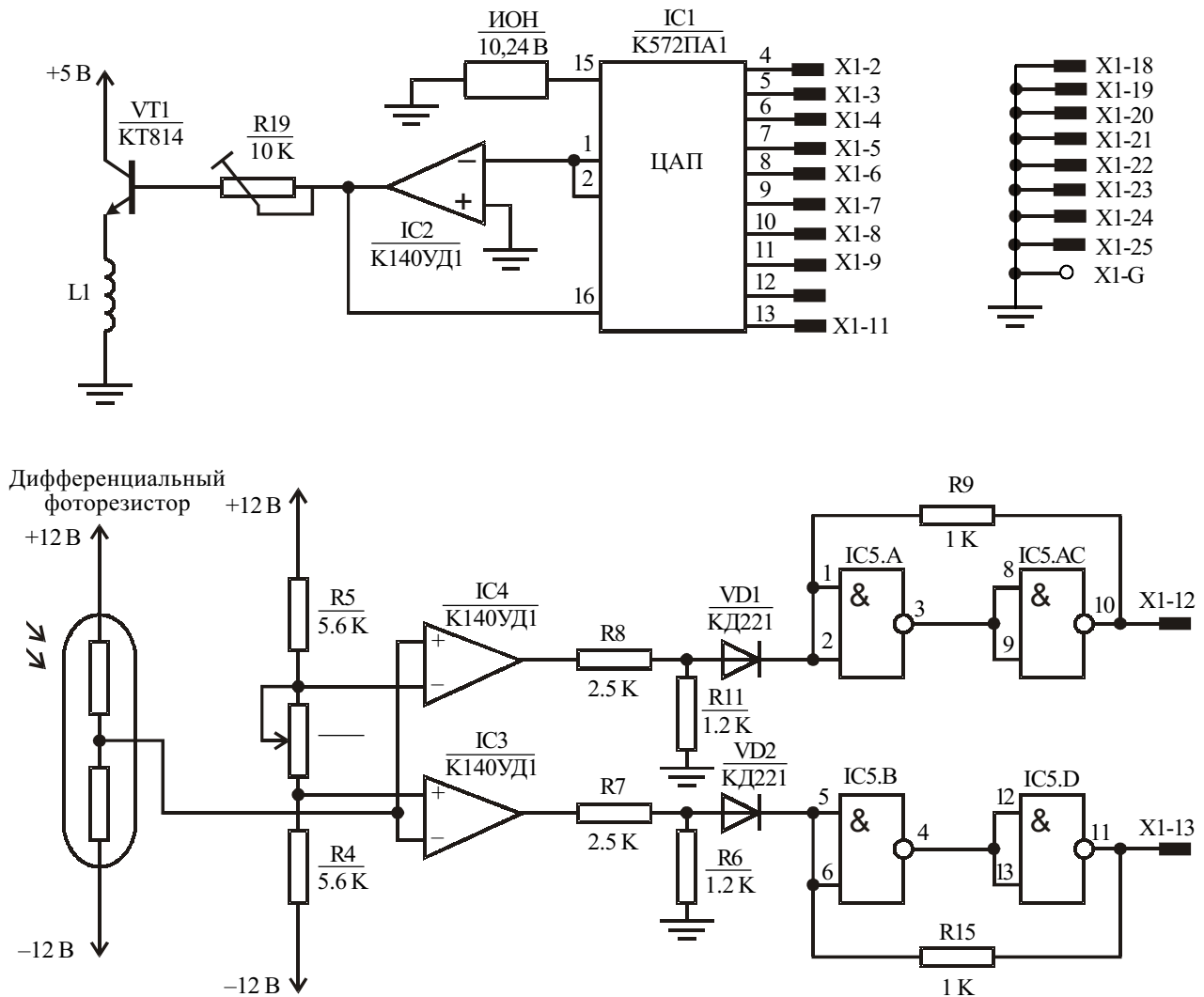


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема устройства согласования

Диапазон измерения массы определяется двумя основными факторами: чувствительностью электродинамической системы фотоэлектронного преобразователя и диапазоном изменения выходного напряжения цифроаналогового преобразователя. Последний можно изменять резистором R19. В рассматриваемом случае резистор подобран так, что диапазон измеряемой массы равен 0,1 мг. Пример калибровочного графика приведен на **рис. 4**.

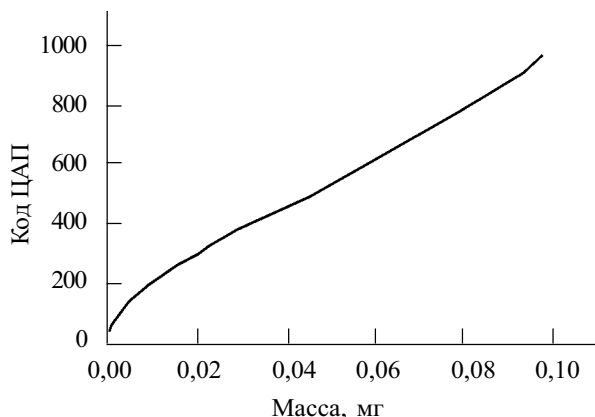


Рис. 4. Калибровочный график

Погрешность измерения массы складывается:

- из погрешности калибровки (для калибровки применялись разновесы с точностью 0,006 мг);
- из погрешности, связанной с дискретностью компенсационного сигнала (при использовании десятиразрядного ЦАП дискретность шага по массе составляет 0,0001 мг);
- из погрешности, связанной с трением в местах закрепления оси коромысла при измерении малых изменений массы.

Влияние силы трения можно уменьшить путем измерения массы методом последовательных приближений к точке равновесия с двух сторон. В результате получим два значения массы  $M_{\max}$  и  $M_{\min}$ , истинное значение которой находится как их среднее арифметическое.

Таким образом, систематическая погрешность весов составляет 0,006 мг. Основную погрешность вносят калибровочные разновесы, что связано с отсутствием высокоточных разновесов массой в долях миллиграмма.

Как видно из рис. 4, начиная с 0,02 мг, т. е. с момента, когда измерения отвечают заданной точности, зависимость между кодом, записываемым в ЦАП, и массой измеряемых образцов практически линейная.

\*\*\*

Преимущество применения предложенного метода автоматизации процесса непрерывного точного взвешивания заключается в сравнительной простоте измерительной установки, т. к. фотоэлектронный преобразователь — это конструктивно законченный узел, не требующий доработки; наладка электронной схемы также не составляет труда. Применение нулевого метода не только повышает точность определения момента баланса весов, но и позволяет упростить обработку получаемой информации. Применение ЭВМ в качестве системы управления делает возможным использование интерполяционных методов обработки потока результатов измерений.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Черчерников В. И. Магнитные измерения. — М.: Изд-во МГУ, 1963.
2. Федорков Б. Г., Телец В. А. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение. — М.: Энергоатомиздат, 1990.

#### ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



### V Международная научно-техническая конференция "Электроника и информатика — 2005"

В Московском государственном институте электронной техники (техническом университете) **23 — 25 ноября 2005 г.** проводится V Международная научно-техническая конференция "Электроника и информатика — 2005", посвященная 40-летию МИЭТ.

#### Научные направления работы конференции

- |   |   |
|---|---|
| 1. Нанотехнология в электронике.                        | 6. Информационные технологии.                           |
| 2. Микро- и наносистемная техника.                      | 7. Информационно-управляющие системы и комплексы.       |
| 3. Материалы микро-, опто- и нанoeлектроники.           | 8. Телекоммуникационные системы и связь.                |
| 4. Проектирование и технология электронных компонентов. | 9. Биомедицинская электроника.                          |
| 5. Опто- и акустоэлектроника.                           | 10. Менеджмент и маркетинг в электронике и информатике. |

**Адрес Оргкомитета:** 124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 5,  
Московский государственный институт электронной техники (МИЭТ), ОНТИ.  
Телефон: (095) 532-98-30, факс: (095) 530-54-29  
<http://www.miet.ru> (раздел "Конференции и семинары")

О. В. СОЛОВЬЕВ, к. т. н. Б. П. МАСЕНКО, И. А. ХЛОПЕНОВА

Украина, Херсонский национальный технический университет  
E-mail: khlopynova@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
25.04 2005 г.

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

## СПОСОБ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ

*Путем изготовления электродов состава  $\text{SiO}_2\text{:Zn}$  и их плавления получены кристаллы кремния со степенью чистоты 99,993 мас. %.*

Основным материалом при производстве фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) солнечной энергии и многих других полупроводниковых приборов является кремний.

В 2001 г. мировое производство кремния «солнечного» класса (СК) составило 24000 тонн. К 2010 г. только в Европе ожидается дефицит этого материала около 5000 тонн. Это связано прежде всего с широким развитием фотоэнергетики, а также с реализацией в развитых странах известных программ — «Миллион солнечных крыш» в США, «Сто тысяч солнечных крыш» в Германии и Японии, которые предусматривают дальнейшее увеличение крупнотоннажного производства этого полупроводникового материала.

Кремний называют «нефтью» XXI столетия. Однако его высокая себестоимость является существенным препятствием в широкомасштабном промышленном применении. На сегодняшний день ряд причин сдерживает развитие фотоэнергетики в Украине, одна из них — отсутствие разведанных источников исходного сырья — чистых кварцитов и кремнеземов.

В настоящее время используются различные технологии для получения кремния [1], например, восстановление летучих соединений Si-H-Cl,  $\text{SiH}_4$ , двуокиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ) и очистка металлургического кремния.

Наиболее экономичным способом производства кремния, несомненно, является карботермическое восстановление двуокиси кремния в дуговой электропечи [2]. Однако получаемое сырье имеет высокий уровень примесей, что, очевидно, является результатом использования неочищенных исходных материалов, в основном углерода (древесный уголь, кокс), и загрязнения в процессе производства, а именно от футеровки печи, электродов, оборудования для шуровки и выпуска плавки. Чтобы получаемый «солнечный» кремний можно было использовать для производства ФЭП с КПД около 13%, необходимо, чтобы концентрации в нем отдельных электроактивных примесей были меньше миллионных частей, т. к. такие элементы как бор, фосфор, кислород и углерод оказывают наибольшее отрицательное влияние на эффективность фотопреобразователей.

Для получения кремния нами разработан способ его электродугового восстановления из двуокиси кремния [3]. Исходным сырьем может служить как синтетический кварц, так и диоксид кремния в виде белой золы, полученный в процессе двухстадийного пиролиза из рисовой шелухи [4].

В качестве восстановителя может быть использован металл, который должен соответствовать следующим требованиям:

- иметь достаточно высокую электропроводность;
- не смешиваться с кремнием и не образовывать с ним устойчивых соединений;
- обладать высокой реакционной способностью;
- иметь высокую степень чистоты;
- обладать доступной ценой.

Всем вышеперечисленным требованиям наиболее соответствует цинк.

Методика электродугового восстановления кремния из диоксида кремния включала приготовление шихты состава  $\text{SiO}_2\text{:Zn}$ , изготовление электродов данного состава, непосредственно восстановление кремния в кварцевом реакторе от источника питания электродугового генератора дуги переменного тока, промывка полученного материала химическими методами и его анализ.

Первый технологический этап — приготовление шихты  $\text{SiO}_2\text{:Zn}$  и изготовление электродов данного состава — включал в себя следующие технологические операции и приемы [5, 6]: механическое измельчение цинка, отжиг металла-восстановителя, рассев исходных компонентов, смешивание, прессование, спекание.

Отжиг цинка проводили с целью повышения пластичности и прессуемости, главным образом за счет восстановления остаточных окислов. Частицы размером 40—50 мкм отжигали в восстановительной среде водорода при температуре  $(0,4...0,6)T_{\text{пл}}$ , где  $T_{\text{пл}}$  — температура плавления металла.

Рассев осуществляли для уравнивания частиц исходных компонентов по массе, используя сита с размерами ячейки 60 мкм, помещенные в кожух вентиляционной системы.

Смешивание  $\text{SiO}_2$  и цинка производили с использованием шаровой мельницы с таким расчетом, чтобы содержание восстановителя было на 20—30% больше стехиометрической величины.

Прессование проводили при помощи матрицы-пуансона двухстороннего сжатия с размерами брикет-

тов 4×4×40 мм на гидравлическом прессе при давлении 1000—1500 кгс/см<sup>2</sup>.

Масса полученных заготовок составляет 2 г.

Следующей технологической операцией изготовления электродов являлось спекание, которое производили при температуре  $(0,7—0,9)T_{пл}$  в токе водорода.

Применение атмосферы водорода продиктовано необходимостью предохранения спекаемых материалов от окисления в процессе термической обработки. Удаление газов при спекании и восстановление окислов привели к улучшению поверхности контакта между частицами.

Изготовленные электроды обладали следующими свойствами: высокой электро- и теплопроводностью, необходимой механической прочностью как при комнатной, так и при высоких температурах, стабильностью в ходе восстановления.

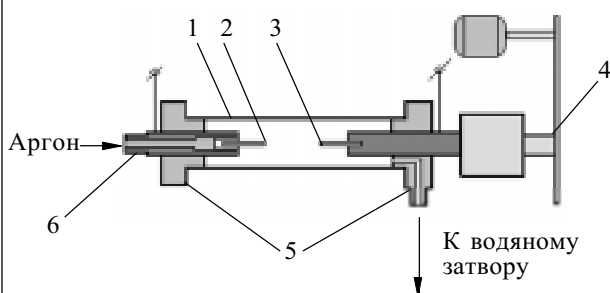
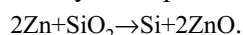


Рис. 1. Электродуговая установка для восстановления кремния из SiO<sub>2</sub>:

1 — кварцевый реактор; 2 — неподвижный электрод; 3 — подвижный электрод; 4 — регулировочный механизм; 5 — тефлоновые затворы; 6 — штуцер

На рис. 1 представлен реактор, с помощью которого получали кремний по реакции



Процесс осуществляли следующим образом. Полученные электроды 2 и 3 устанавливали в зажимах, один из которых подвижен и оснащен регулирующим механизмом 4. Включив высокочастотный генератор дуги переменного тока, медленно сводили электроды 2 и 3 с помощью регулировочного механизма 4 до возникновения дуги между ними. После этого установку переводили на автоматический режим для установления устойчивого процесса восстановления. Одновременно осуществляли подачу аргона в реактор и отвод отработанных побочных газообразных продуктов реакции через отверстия в тефлоновых затворах 5, которые вмонтированы в реактор 1. По мере выработки рабочей части электродов генератор дуги

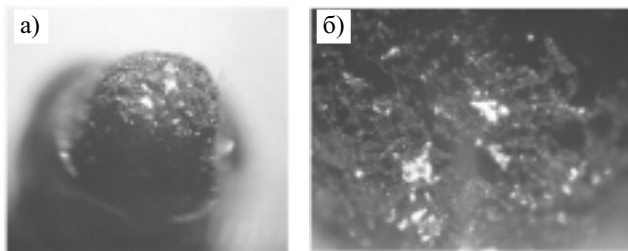


Рис. 2. Кристалл кремния:

а — увеличение ×10; б — увеличение ×17,5

отключали. Восстановленный кремний собирался в виде капель на стенках реактора, изображенных на рис. 2.

Заключительным этапом получения кремния являлась химическая промывка полученного материала в кислотах. Обработка в азотной кислоте позволила очистить его от непрореагировавшего цинка, а промывка в плавиковой кислоте — от остатков SiO<sub>2</sub>.

В результате электродугового восстановления кремния из SiO<sub>2</sub> полученный материал после химической обработки имел вид кристаллов размером около 50 мкм со степенью чистоты 99,993 мас. %.

Технологическая схема изготовления электродов состава SiO<sub>2</sub>:Zn обеспечивает максимально высокий процент выхода кремния. Как показали результаты исследования и использования электродов, мелкодисперсная структура компонентов, смешивание восстановителя с диоксидом кремния, полученного из рисовой шелухи, и оптимальная технология их изготовления повышает выход восстанавливаемого кремния на 15—20% по сравнению с электродами, изготовленными из мелкодисперсного синтетического кварца.

Учитывая различные технологические потребности при дальнейшем использовании восстанавливаемого материала, можно получать кристаллы большей величины, вплоть до каплевидных образований, снижая вольт-амперные характеристики установки.

При последующем выращивании монокристаллических слитков по методу Чохральского происходит очистка кремния от примесей, и выращенные слитки с удельным сопротивлением 0,25—0,20 Ом·см в дальнейшем пригодны для изготовления фотоэлектрических преобразователей.

\*\*\*

Предложенный способ позволяет получать кремний со степенью чистоты 99,993 мас. % и обеспечивает его производство по цене 10—15 \$/кг за счет уменьшения загрязнений при использовании исходного сырья, снижения энергозатрат и габаритов установки, а также сокращения стадий очистки. При последующей кристаллизационной очистке выращиванием слитка из расплава можно повысить уровень чистоты продукта до 99,999 мас. %.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Технология полупроводникового кремния / Под ред. Э. С. Фалькевич.— М.: Металлургия, 1992.
2. Aulich H. A., Grabmaier J. G. Solar-grade silicon prepared by advanced carbothermic reduction of silica // Siemens Forschungs und Entwicklungs.— 1986.— Bd 15, N. 4.— S. 157—210.
3. Деклар. пат. 20040503388 Украины. Способ получения кремния / М. В. Повстяной, О. В. Соловьёв, Б. П. Масенко, И. А. Хлопенова.— 2005.— Бюл. № 3.
4. Марончук И. Е., Масенко Б. П., Повстяной М. В. и др. Получение кремния электродным восстановлением продуктов пиролиза рисовой шелухи // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2003.— № 1.— С. 42—43.
5. Кипарисов С. С., Либенсон Г. А. Порошковая металлургия.— М.: Металлургия, 1972.
6. Деклар. пат. 20041008446 Украины. Способ изготовления электродов для электродугового восстановления кремния из диоксида кремния / М. В. Повстяной, О. В. Соловьёв, И. А. Хлопенова.— 2005.— Бюл. № 7.

Д. ф.-м. н. Ш. Д. КУРМАШЕВ, к. ф.-м. н. Н. Н. САДОВА,  
Т. И. ЛАВРЕНОВА, Т. Н. БУГАЕВА

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

Дата поступления в редакцию  
24.01—18.05 2005 г.  
Оппонент О. Я. МРУЗ  
(НПП "Карат", г. Львов)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОЛСТОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР "RuO<sub>2</sub>—СТЕКЛО"

*Гомогенность порошков исходных материалов позволяет получить резистивные элементы с воспроизводимыми электрофизическими параметрами и высокой прочностью сцепления с подложкой.*

Структуры "RuO<sub>2</sub>—стекло—керамика" обычно применяются в качестве резистивных элементов гибридных интегральных схем и представляют собой сложную систему, формирующуюся в процессе вжигания из смеси тонкоизмельченного электропроводного оксида металла и частиц стекла, диспергированных в органическом связующем. Эти структуры широко используются для создания современной электронной аппаратуры различного назначения, к параметрам которой предъявляют жесткие требования. Поэтому изучение электрофизических характеристик, их воспроизводимость при формировании таких структур приобретает особое значение.

Существует ряд работ, посвященных изучению зависимости параметров структур "RuO<sub>2</sub>—стекло—подложка" от различных факторов [1—6]. Много внимания в литературе уделяется качеству функционального материала [7, 8], в то время как стеклофритту обычно считают аморфной однородной фазой, хотя известно, что стекла могут кристаллизоваться под действием термообработки. Кроме кристаллизации, непосредственное влияние на микроструктуру и механизм проводимости, а следовательно, и на электрофизические параметры толстых пленок оказывает дисперсность компонентов исходных материалов [9, 10]. Изучению этого вопроса уделено мало внимания. Экспериментальные данные работ часто противоречивы. В существующих сегодня стандартах и технических условиях дисперсность порошков для толсто пленочных элементов не регламентирована.

В настоящей работе исследовали изменение электрофизических свойств толсто пленочных структур на основе "RuO<sub>2</sub>—стекло" в зависимости от размеров частиц стеклофритты и температуры вжигания с целью выяснения причин невоспроизводимости их параметров. Объектами исследований являлись резисторы, изготовленные на основе свинцовоборосиликатных стекол (PbO, SiO<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) с фиксированными размерами частиц (0,5; 1; 3 и 5 мкм) и функционального материала RuO<sub>2</sub> с размерами частиц

порядка 1 мкм. Размер частиц порошков исходных материалов определялся с помощью системы анализа изображений "QUANTIMET-720" и растрового электронного микроскопа РЭМ-100У.

На рис. 1 приведены зависимости сопротивления толсто пленочных резисторов от изменения процентного соотношения проводящей фазы RuO<sub>2</sub> и стеклофритты и размеров частиц стекла при фиксированной температуре отжига (870°C). Видно, что изменение сопротивления наиболее сильно выражено у образцов с низким содержанием диоксида рутения. Сопротивление возрастает с увеличением содержания стекла, причем наиболее сильное изменение сопротивления наблюдается у составов с размером частиц стеклофритты 0,5 мкм. Например, сравнивая сопротивления резисторов, сформированных на базе стекла с размерами частиц 0,5 и 5 мкм, можно заметить, что сопротивление пленки при фиксированном соотношении концентраций (10:90) отличается больше чем на два порядка. С увеличением содержания RuO<sub>2</sub> это отличие уменьшается, сопротивление стремится к постоянному значению и практически не зависит от размера частиц стекла.

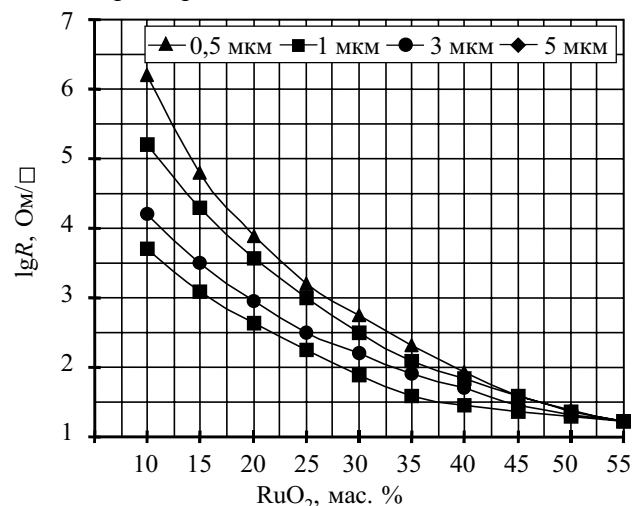


Рис. 1. Зависимость сопротивления  $R$  структур "RuO<sub>2</sub>—стекло" от концентрации фазы RuO<sub>2</sub> для разных размеров частиц стекла

Увеличение сопротивления для высокоомных резисторов можно связать с процессами, протекающими в стеклофритте при вжигании паст [4], а также с влиянием дисперсности компонентов на геометрические размеры проводящих цепочек. С уменьшением

размеров частиц стекла увеличивается длина цепочек проводящей фазы и уменьшается площадь их поперечного сечения.

Как показано в работе [5], в системах "RuO<sub>2</sub>—стекло" наблюдается смешанный характер проводимости как комбинация процессов, происходящих в проводящей фазе и стеклофазе. В высокоомных резисторах основной вклад в проводимость вносит стеклофритта, следовательно, состояние этой фазы играет существенную роль в процессе токопереноса. Использование неомогенных порошков стекла с частицами различных размеров (в нашем случае 0,5—5 мкм) при фиксированных температуре отжига и соотношении концентраций RuO<sub>2</sub> и стекла может привести к разбросу номинала высокоомных резисторов до двух порядков. Кроме того, варьируя размер частиц стекла можно получить широкий диапазон номинала толсто пленочных резистивных элементов.

Проведенные нами ранее исследования толсто пленочных резисторов, изготовленных по стандартной технологии на базе промышленных паст, показали низкую воспроизводимость их электрофизических параметров. Поэтому в данной работе исследовали порошки свинцовоборосиликатных стекол марок 279, 2005, 2006-2, 2006-3 и 2006-8, а также функционального материала RuO<sub>2</sub>, применяемых нашей промышленностью при изготовлении резистивных паст. Нами составлены гистограммы распределения частиц по размерам порошков стекол различных марок (рис. 2). На основании экспериментальных данных можно сделать вывод, что одной из причин невоспроизводимости характеристик и нестабильности работы резисто-

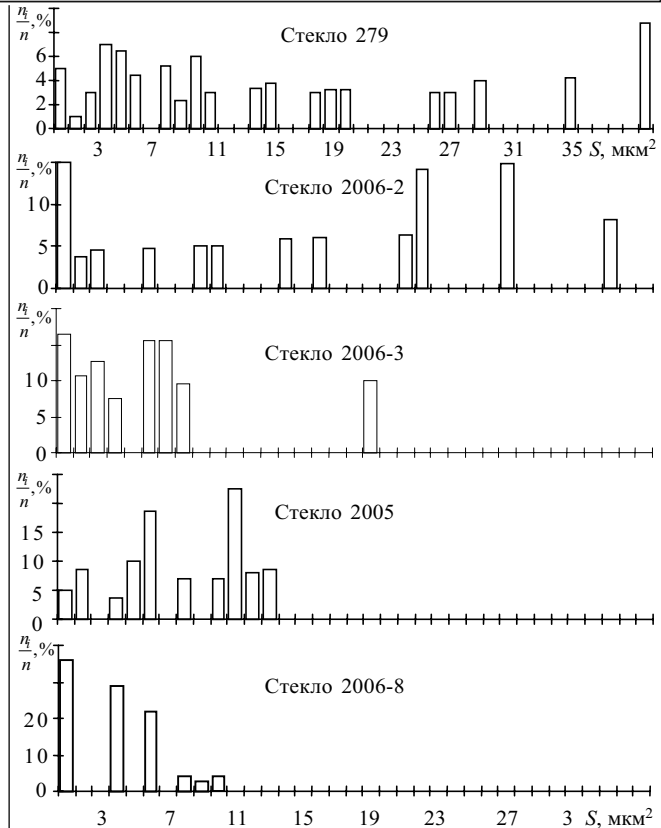


Рис. 2. Гистограммы распределений по размерам частиц порошков стекол ( $n_i/n$  — отношение количества частиц данного размера к общему количеству частиц,  $S$  — средняя площадь проекции частицы)

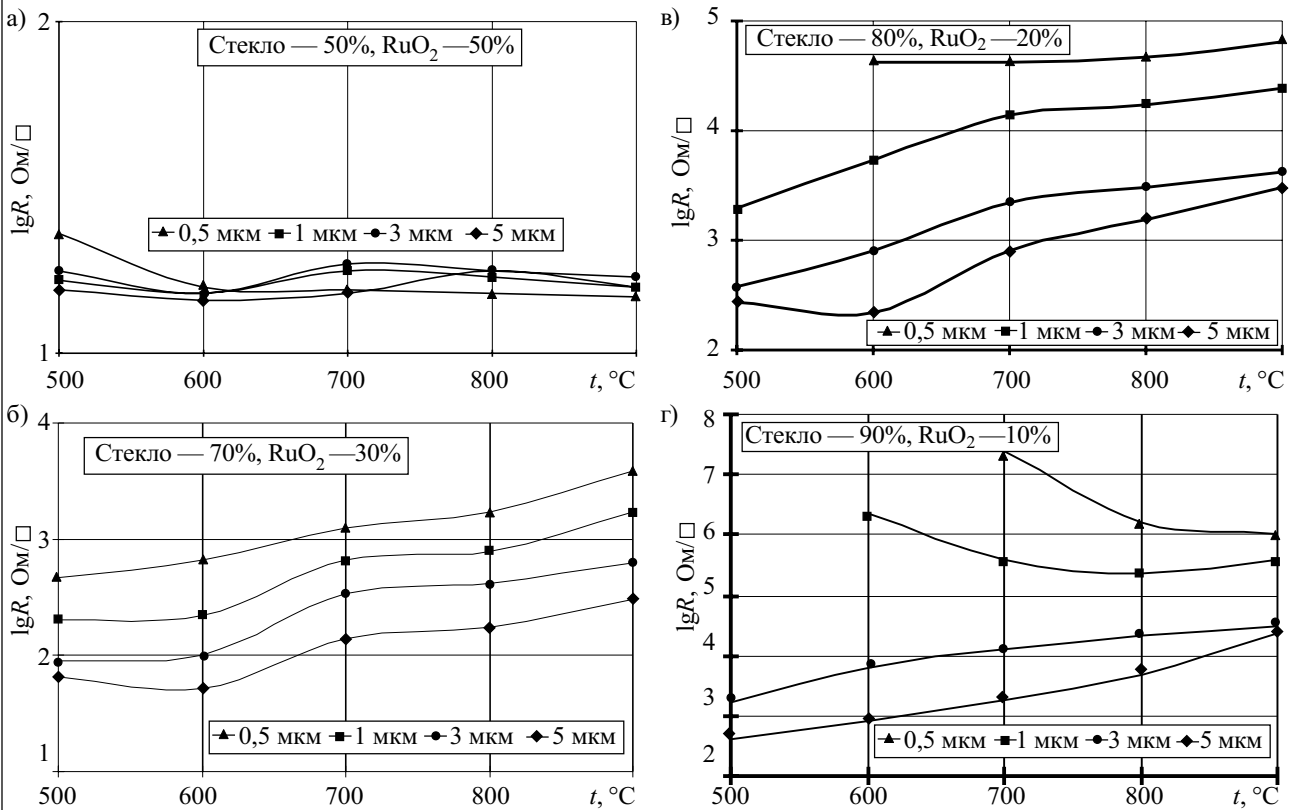


Рис. 3. Зависимость сопротивления резистивных пленок от температуры вжигания при различных соотношениях концентраций "стекло — RuO<sub>2</sub>" для стеклофритты с размерами частиц 0,5; 1; 3 и 5 мкм

ров, полученных на базе освоенных промышленностью паст, является низкая гомогенность порошков исходных материалов. Особенно это сказывается при изготовлении высокоомных резисторов.

Попытки использовать ультразвуковое воздействие на резистивные промышленные пасты с целью увеличения их гомогенности не привели к ожидаемым результатам. Образцы, обработанные ультразвуком ( $\gamma=20\pm 2$  кГц) при мощности генератора 400 Вт и объеме обрабатываемой пасты  $2 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>, имели среднеквадратичное отклонение сопротивления от номинального значения порядка 7%, температурный коэффициент сопротивления (ТКС) — 17%, в то время как отклонение сопротивления в контрольной партии образцов составило 11%, ТКС — 22%. Небольшое улучшение параметров можно объяснить лучшим перемешиванием компонент исходных порошковых материалов.

На рис. 3 представлены зависимости сопротивления структур "RuO<sub>2</sub>—стекло" от температуры вжигания  $t$  при различных соотношениях концентраций исходных компонентов с размерами частиц стекла 0,5; 1; 3 и 5 мкм. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что сопротивление резистивных паст состава 50% RuO<sub>2</sub> и 50% стекла не меняется с увеличением температуры вжигания и практически не зависит от размера частиц стеклофритты (рис. 3, а). При увеличении концентрации стекла сопротивление зависит как от температуры, так и от размера частиц стекла (рис. 3, б, в, г). Следует отметить, что если для всех составов со стеклами с размером частиц 3 и 5 мкм сопротивление с увеличением температуры вжигания возрастает (рис. 3, б, в, г), то для состава "90% стекла — 10% RuO<sub>2</sub>", размеры частиц стекла которого 0,5 и 1 мкм, замечена тенденция уменьшения сопротивления (рис. 3, г). По-видимому, это объясняется тем, что при спекании происходит частичное восстановление диоксида рутения, которое сопровождается появлением на поверхности подвижных атомов металла. Поскольку с уменьшением размера частиц общая площадь поверхности увеличивается, то ощутимо увеличивается количество свободных атомов металла, что приводит к уменьшению удельного поверхностного сопротивления резисторов, изготовленных на основе стекол с размерами частиц 0,5 и 1 мкм (рис. 3, г).

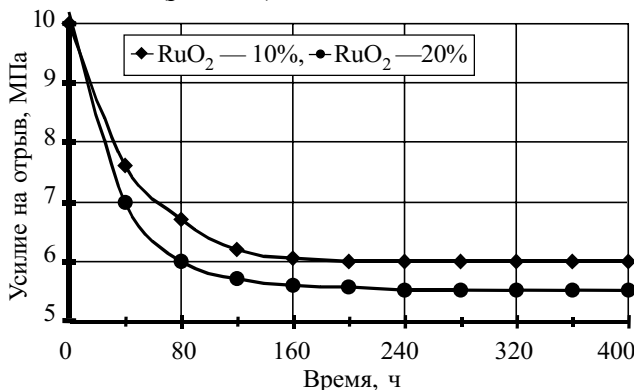


Рис. 4. Зависимость силы сцепления толстой пленки с подложкой от времени ускоренных испытаний при температуре 130°C и относительной влажности окружающей среды 98%

Как показали исследования, дисперсность порошков исходных материалов оказывает влияние и на механические свойства резистивных слоев. При использовании гомогенных порошков исходных материалов с фиксированными размерами частиц сила сцепления толстой пленки с подложкой составляет 10 МПа и при ускоренных испытаниях в камере тепла и влажности КТВ-0,5-65/155 (температура — 130°C, относительная влажность окружающей среды — 98%) уменьшается незначительно (до 5,5 МПа), а после 160 ч испытаний не изменяется (рис. 4). При использовании негетогенных порошков исходных материалов, размеры частиц которых лежат в пределах от долей микрометра до 5—7 мкм, после ускоренных испытаний (при тех же условиях) происходит полное отделение толстой пленки от подложки.

### Выводы

Сопротивление толстых пленок зависит как от размеров частиц исходных компонентов, так и от температуры вжигания, причем изменение сопротивления может достигать 2—4 порядков. Использование гомогенных порошков исходных материалов резистивных паст обеспечивает воспроизводимость их электрофизических параметров и высокие прочностные характеристики толсто пленочных слоев.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ansell M. P. Conduction processes in thick film resistors // J. Electrocomponents Science Technology.— 1976.— Vol. 3, N 3.— P. 131—140.
2. Carcia P. F., Feretti A., Suna A. Particle size effects in thick film resistors // J. Appl. Phys.— 1982.— Vol. 53, N 7.— P. 5282—5288.
3. Ronald P., Anjard Sr. Precision fineness of grind measurement for thick film parts // Microelectron. Reliabil.— 1983.— Vol. 23, N 2.— P. 319—322.
4. Abe O., Taketa V., Haradome M. The effect of various factors on the resistance and TCK of RuO<sub>2</sub> thick film resistors — relation between the electrical properties and particle size of constituents, the physical properties of glass and firing temperature // Active and Passive Elec. Comp.— 1988.— Vol. 13, N 2.— P. 67—83.
5. Гребенкина В. Г., Дышель Д. Е., Смолин М. Д., Федоров В. Н. Механизм электропроводности резистивных толстых пленок на основе рутенатов свинца и висмута // Техника средств связи. Сер. ТПО.— 1990.— Вып. 2.— С. 26—28.
6. Шориков Ю. С., Орлов А. М. Оксиды платиновых металлов со структурой рутила в толсто пленочной технологии.— М.: ЦНИИцветмет, 1983.— Обзорная инф. Сер. Производство редких металлов и полупроводниковых материалов.— Вып. 2.
7. Шориков Ю. С., Шарнинова Н. С., Подшибякин С. В., Ялалдинова З. Х. Влияние морфологии частиц диоксида рутения на электропроводность толстых пленок при положительных температурах // Электронная техника. Сер. Материалы.— 1985.— Вып. 9.— С. 64—67.
8. Коледов Л. А., Яковлев Я. А. Влияние размера частиц проводящей фазы на электрические характеристики толсто пленочных резисторов // Там же.— С. 50—55.
9. Пучкова Н. С., Смирнов А. Н., Лазур А. И. Система паст «Аналог-4» расширяет возможности толсто пленочной технологии // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2000.— № 5—6.— С. 58—59.
10. Лозинский Н. С., Груба А. И., Левченко Л. И., Гарштя О. Н. Влияние компонентов рутениевых паст на параметры керметных резисторов // Там же.— 1997.— № 4.— С. 39—46.



Открытое акционерное общество  
«Нептун»

Украина  
65031, г. Одесса -31,  
ул. Промышленная, 28

Телефон: (048)721-48-37  
тел./факс: (048)732-35-23,  
(0482)99-67-90

## Аппаратура ВЧ-связи ABC1-ЦМ

Аппаратура высокочастотной связи по ЛЭП одноканальная цифровая ABC1-ЦМ — новый этап в развитии оборудования передачи информации по воздушным линиям (ВЛ) высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП).



Благодаря применению сигнальных процессоров, ПЛИС и современной элементной базы удалось приемопередающий тракт и цифровую обработку сигналов реализовать программным путем.

ТЕХНОЛОГІІ ІНТЕРНЕТІ  
**ІНФОРМАТІКА**  
**І ЗВ'ЯЗОК 2005**

# 11-14 ЖОВТНЯ 2005



## ІНФОРМАТІКА І ЗВ'ЯЗОК

XIII міжнародна спеціалізована виставка

Організатори



Державний комітет зв'язку та інформатизації України  
Міністерство промислової політики України

**МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР**  
Київ, Броварський пр-т, 15 (м. «Лівобережна»)



ITE GROUP PLC



Прем'єр Експо, 04050, Київ, вул. Пимоненка, 13-Б  
Тел. +380 44 451 4160, Факс: +380 44 451 4161  
E-mail: info@pe.com.ua, www.pe.com.ua



# POWER ELECTRONICS



МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА И КОНФЕРЕНЦИЯ  
**СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**



**9-11 ноября 2005**

РОССИЯ, МОСКВА, ЦМТ

Организаторы:

**ПРИМЭ СПО**



Тел.: +7(812)380 6007  
380 6003, 380 6000  
Факс: +7(812)380 6001  
E-mail: [electron@primexpo.ru](mailto:electron@primexpo.ru)



[www.primexpo.ru/power](http://www.primexpo.ru/power)

Пишите  
Подписывайтесь  
Читайте



Номер готовили  
Донецк, Киев, Львов, Минск, Москва, Одесса,  
Санкт-Петербург, Ташкент, Тирасполь,  
Томск, Харьков, Херсон, Черновцы.