



## ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ



**В НОМЕРЕ:**

Техническая политика

Новые компоненты для электронной аппаратуры

Электронные средства: исследования, разработки

Сенсоэлектроника

Функциональная микро- и наноэлектроника

Обеспечение тепловых режимов

Технологические процессы и оборудование

Материалы электроники

**4(76) 2008**

25 - 28 листопада 2008 р.

VII МІЖНАРОДНИЙ  
ПРОМИСЛОВИЙ  
ФОРУМ - 2008

УКРАЇНА, КІЇВ  
МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР



УКРПРОМ  
АВТОМАТИЗАЦІЯ

- АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА
- КОМП'ЮТЕРИ, МЕРЕЖІ
- ВВУДОВАНІ СИСТЕМИ
- ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ
- ПРИЛАДИ І КОМПОНЕНТИ
- SCADA-СИСТЕМИ
- СИСТЕМИ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ
- УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМСТВОМ
- ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
- СИСТЕМНА ІНТЕГРАЦІЯ І НАВЧАННЯ



ЗРАЗКИ, СТАНДАРТИ,  
ЕТАЛОНІ, ПРИЛАДИ

- СТАНДАРТИЗАЦІЯ
- СЕРТИФІКАЦІЯ
- МЕТРОЛОГІЯ
- НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ І ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА
- КОНТРОЛЬНО-ВІМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ І АПАРАТУРА
- ВАГОВЕ І ВАГОДОЗОЮЧЕ ОБЛАДНАННЯ
- ЛАБОРАТОРНЕ ОБЛАДНАННЯ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ:  
"ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА"



ОРГАНІЗАТОР  
ТОВ "МІЖНАРОДНИЙ  
ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР"

ОФІЦІЙНА ПІДТРИМКА:

МІНПРОМПОЛІТИКИ УКРАЇНИ,

ДЕРЖПОТРЕБСТАНДАРТ УКРАЇНИ

УКРАЇНА, 02660, КІЇВ  
БРОВАРСЬКИЙ ПРОСПЕКТ, 15  
т: +380 44 201-11-78, 206-87-96  
[www.tech-expo.com.ua](http://www.tech-expo.com.ua)

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

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер КВ 13418-2302ПР

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



ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

В Украине

Отделения связи. «Каталог видань України». Індекс 23785.  
Подписное агентство «Ідея», [www.idea.com.ua](http://www.idea.com.ua). Індекс 11146.

Подписное агентство «KSS», [www.kss.kiev.ua](http://www.kss.kiev.ua). Індекс 20363.

В России

Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы», Індекс 71141.

В Белоруссии

Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ», Індекс 71141.

В редакции «ТКЭА» можно подписаться с любого номера.

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

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

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

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корецкая.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.

Печ. л. 8.0+1.0. Уч.-изд. л. 11.0. Тираж 500 экз. Заказ № 167.

Издательство «Политехпериодика»

(65044, г. Одесса-44, а/я 17).

Отпечатано в типографии издательства «ART-V»

(65091, г. Одесса, ул. Комитетская, 24а).

Журнал издается при поддержке

ЗАО «Украналіт»,

ОАО «Меридіан» им. С. П. Королєва  
(г. Київ),

НПП «Карат» (г. Львов),

ЦКБ «Ритм» (г. Чернівці)

## СОДЕРЖАНИЕ

### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмиль

### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. А. А. Ащеулов (г. Черновцы)  
Д.т.н. В. В. Баранов (г. Минск)  
К.т.н. Э. Н. Глушецкого,  
зам. гл. редактора (г. Киев)  
Д.т.н. В. В. Данилов (г. Донецк)  
Д.т.н. В. Т. Дейнега (г. Одесса)  
Д.ф.-м.н. В. А. Дроздов (г. Одесса)  
К.т.н. И. Н. Еримичай,  
зам. гл. редактора (г. Одесса)  
К.т.н. А. А. Ефименко,  
ответственный секретарь (г. Одесса)  
Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)  
К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)  
К.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)  
Д.ф.-м.н. В. В. Новиков (г. Одесса)  
К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)  
К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)  
Д.ф.-м.н. М. И. Самойлович (г. Москва)  
Д.ф.-м.н. П. В. Серба (г. Таганрог)  
Д.х.н. В. Н. Томашук (г. Киев)  
Д.ф.-м.н. О. И. Шпотюк (г. Львов)

### УЧРЕДИТЕЛИ

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

Одобрено к печати Ученым советом ОНПУ  
(Протокол № 8 от 22.04.08)

### Техническая политика

Решение конференции «СИЭТ-2008» по тематическому направлению «Проблемы развития микроэлектроники в Украине — состояние и перспективы»

3

### Новые компоненты для электронной аппаратуры

Термоэлектрические микрогенераторы. Современное состояние и перспективы использования. Струтинская Л. Т.

5

### Электронные средства: исследования, разработки

Исследование радиационной стойкости гибридных интегральных микросхем. Мокрицкий В. А., Банзак О. В., Волосевич В. П.

14

Электронная система регистрации параметров механических колебаний. Булавин Л. А., Акташ Е. Ю., Николаенко Т. Ю.

16

Концепция построения радиотехнических систем охраны периметров крупных объектов. Колесник К. В., Смаглюк В. В., Чурюмов Г. И.

19

Параметры поверхностных акустических волн в пьезокристаллах при высоких значениях температуры. Двоешерстов М. Ю., Чередник В. И.

23

### Сенсоэлектроника

Тензорезисторы для низких температур на основе нитевидных кристаллов кремния. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Кутраков А. П., Павловский И. В.

26

Оптические сенсоры газов на основе полупроводниковых источников ИК-излучения. Кабаций В. Н.

30

### Функциональная микро- и наноэлектроника

Зависимость эффективности электроломинесцентных индикаторов от параметров источника питания. Ленков С. В., Гунченко Ю. А., Жеревчук В. В., Селиков А. В.

36

### Обеспечение тепловых режимов

Математическое моделирование нестационарных тепловых режимов блока системы измерения давления СИД-3-148. Ранченко С. Г., Перепека В. И., Грудинкин В. М., Буряченко А. Г.

39

Термовакуумные испытания оптико-электронных приборов космического аппарата МС-2-8. Рассамакин Б. М., Рогачев В. А., Хайрнасов С. М., Хоминич В. И., Гренюк И. Е.

42

### Технологические процессы и оборудование

Осаждение пленок TiN и TiO<sub>2</sub> в обращенном цилиндрическом магнетроне методом реактивного распыления. Костин Е. Г., Демчинин А. В.

47

### Материалы электроники

Вольт-фарадные характеристики ионно-имплантированных структур GaAs. Горев Н. Б., Коджеспирова И. Ф., Привалов Е. Н.

52

Нанокомпозиты на основе опаловых матриц с 3D-структурой, образованной магнитными наночастицами. Ринкевич А. Б., Устинов В. В., Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Клещева С. М., Кузнецов Е. А.

55

### Библиография

Новые книги 15, 35, 38, 46, 54

4

В портфеле редакции

Выставки. Конференции 13, 63, 2-я, 3-я, 4-я стр. обл.

ЗМІСТ

**Технічна політика**

Рішення конференції «СІЕТ-2008» за тематичним напрямком «Проблеми розвитку мікроелектроніки в Україні — стан та перспективи» (3)

**Нові компоненти для електронної апаратури**

Термоелектричні мікрогенератори. Сучасний стан та перспективи використання. Струтинська Л. Т. (5)

**Електронні засоби: дослідження, розробки**

Дослідження радіаційної стійкості гібридних інтегральних мікросхем. Мокрицький В. А., Банзак О. В., Волосевич В. П. (14)

Електронна система реєстрації параметрів механічних коливань. Булавін Л. А., Актан О. Ю., Ніколаєнко Т. Ю. (16)

Концепція побудови радіотехнічних систем охорони периметрів великих об'єктів. Колесник К. В., Смаглюк В. В.

Чурюмов Г. І. (19)

Параметри поверхневих акустичних хвиль у п'єзокристалах при високому значенні температури. Двосіверстов

М. Ю., Череднік В. І. (23)

**Сенсоелектроніка**

Тензорезистори для низьких температур на основі нитковидних кристалів кремнію. Дружинін А. О., Мар'янова І. Й., Кутраков О. П., Павловський І. В. (26)

Оптичні сенсори газу на основі напівпровідникових джерел ІЧ-випромінювання. Кабацій В. М. (30)

**Функціональна мікро- та наноелектроніка**

Залежність ефективності електролюмінесцентних індикаторів від параметрів джерела живлення. Ленков С. В., Гунченко Ю. О., Жеревчук В. В., Селюков О. В. (36)

**Забезпечення теплових режимів**

Математичне моделювання нестационарних теплових режимів блока системи вимірювання тиску СІД-3-148. Ранченко С. Г., Переpeка В. І., Грудинкін В. М., Бураченко Г. Г. (39)

Термовакуумні випробування оптико-електронних пристрій космічного апарату МС-2-8. Расамакін Б. М., Рогачев В. А., Хайрнасов С. М., Хомінч В. І., Гриенюк І. Є. (42)

**Технологічні процеси та обладнання**

Осадження пілівок TiN та TiO<sub>2</sub> в оберненому циліндричному магнетроні методом реактивного розпилення. Костін Е. Г., Демчшин А. В. (47)

**Матеріали електроніки**

Вольт-фарадні характеристики іонно-імплантованих структур GaAs. Горев М. Б., Коджеспірова І. Ф., Привалов Е. М. (52)

Нанокомпозити на основі опалових матриць з 3D-структурою, що створена магнітними наночастками. Рінкевич А. Б., Устинов В. В., Самойлович М. І., Белянін О. Ф., Клецьєва С. М., Кузнецов Е. О. (55)

CONTENT

**Technical politic**

The decision of a conference «СИЭТ-2008» on a thematic direction «Problems of development of microelectronics in Ukraine — a condition and prospects» (3)

**New components for the electronic equipment**

Thermoelectric microgenerators. Current status and prospects of employment. Strutynska L. T. (5)

**Electronic means: investigations, development**

Research of radiation stability of hybrid integrated microcircuits. Mokritskij V. A., Banzak O. V., Volosevich V. P. (14)

The electronic system for mechanical oscillation parameters registration. Bulavin L. A., Aktan O. Yu., Nikolaenko T. Yu. (16)

Conception of radio engineering system designing of perimeters protection of large objects. Kolesnik K. V., Smagluk V. V., Churumov G. I. (19)

Parameters of acoustic-surface waves in piezocrystals under high values of temperature. Dvoesherstov M. Yu., Petrov S. G., Cherednick V. I., Chirimanov A. P. (23)

**Sensoelectronics**

Low-temperature strain gauges based on silicon whiskers. Druzhinin A. A., Maryamova I. I., Kutrakov A. P., Pavlovskyy I. V. (26)

Optical sensors of gas on the basis of semiconductor sources of infrared emission. Kabatsiy V. N. (30)

**Functional micro- and nanoelectronics**

Dependence of efficiency of electroluminescent indicators on parameters of the power supply. Lenkov S. V., Gunchenko Yu. A., Zherezchuk V. V., Selukov A. V. (36)

**Ensuring of thermal modes**

Mathematical simulation of block SID-3-148 non-stationary thermal conditions. Rantchenko G. S., Perepeka V. I., Grudinin V. M., Buriachenko A. G. (39)

Operational thermal conditions of optoelectronic devices for MC-2-8 space vehicle. Rassamakin B. M., Rogachev V. A., Khayrinasov S. M., Khominich V. I., Grenyuk I. Ye. (42)

**Technological processes and equipment**

Deposition of the TiN and TiO<sub>2</sub> films in the inverted cylindrical direct-current magnetron by a reactive sputtering. Kostin E. G., Demchishyn A. V. (47)

**Materials of electronics**

Capacitance-voltage characteristics of GaAs ion-implanted structures. Gorev N. B., Kodzhespairova I. F., Privalov E. N. (52)

Nanocomposites based on opal matrixes with 3D-structure formed by magnetic nanoparticles. Rinkevich A. B., Ustинov V. V., Samoilovich M. I., Klescheva S. M., Kuznetsov E. A. (55)

## РЕШЕНИЕ КОНФЕРЕНЦИИ «СИЭТ-2008» ПО ТЕМАТИЧЕСКОМУ НАПРАВЛЕНИЮ «ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ В УКРАИНЕ — СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ»

*Участники конференции отмечают:*

1. Сегодня экономика развитых стран базируется на высоконаукоемких технологиях и отраслях промышленности, среди которых ведущее место занимает электронная промышленность и, в первую очередь, микроэлектронные и оптоэлектронные технологии.

2. Рынок Украины насыщен электронными компонентами производства стран дальнего зарубежья, и Украина находится в полной зависимости от заграничных поставщиков. Такое положение недопустимо, т. к. в таких направлениях как создание систем управления стратегическими объектами (например, АЭС) использование зарубежной электроники может привести к существенным экономическим потерям. Это относится и к системам защиты информации и оборонным системам.

3. В Украине в настоящее время уровень технологии кристального производства не соответствует современному мировому уровню. В развитых странах технологические проектные нормы элементов интегральных схем (ИС) составляют 90—65 нм с освоением 45 нм, в Украине — 2—3 мкм (уровень 1980-х годов).

4. В Украине отсутствует производство особо чистых материалов для микроэлектронных и оптоэлектронных технологий (моносилан, фосфин, диборан, кислород, азот, хладоны, кислоты и др.).

5. В Украине отсутствует современная технология и производство гетероструктур сверхярких светодиодов на  $A^3B^5$ -соединениях — основы принципиально новых электрических источников света, обладающих энергоэффективностью в 3—4 раза большей, чем лампы накаливания, и дающих существенную экономию энергоресурсов.

6. Общий кризис приборостроительной промышленности Украины, разрушение кооперационных связей и рынков сбыта, а также недостаточные объемы государственной поддержки, привели к следующим негативным последствиям:

— разрушению традиционных связей с предприятиями России — заказчиками НИОКР;

— резкому сокращению численности научных сотрудников и инженеров научно-исследовательских институтов, старению их коллективов;

— старению и потере технологической базы для опытного и серийного производства ИС на заводах,

перепрофилированию микроэлектронных предприятий;

— отсутствию модернизации материально-технической базы для проведения НИОКР (САПР, контрольно-измерительного и аналитического и диагностического оборудования).

7. В действующих государственных научно-технических программах Украины существуют лишь фрагменты по микроэлектронике с небольшим объемом финансирования и отсутствует системная программа восстановления и развития микроэлектроники. Поэтому сейчас Украине, в первую очередь, необходима национальная программа развития микроэлектроники, которая выделила бы ее как приоритетную отрасль.

*Участники конференции рекомендуют:*

Разработать Национальную программу развития микроэлектроники в Украине, в которой предусмотреть:

— развитие инфраструктуры для разработки и внедрения в производство изделий микроэлектроники;

— модернизацию технологической базы предприятий на первом этапе до уровня 0,8 мкм, в том числе используя возможности отечественных предприятий;

— на втором этапе — покупку и постройку в Украине современных мини-модулей уровня 0,17—0,35 мкм, ориентированных на использование КМОП- и БиКМОП-технологий, в том числе на использование СВЧ SiGe HBT (heterojunction bipolar transistor) технологии и технологии гетероструктур на  $A^3B^5$ - и  $A^2B^6$ -соединениях;

— создание межведомственного экспертного совета для определения наиболее перспективных направлений разработок и производства микроэлектронных изделий, в том числе в целях информационной безопасности Украины и потребностей оборонной промышленности;

— законодательную поддержку развития микроэлектроники, в том числе путем предоставления налоговых льгот;

— определение главных направлений развития, по которым имеются реальные заделы, обеспечивающие конкурентоспособность разработок, основанные на достижениях существующих предприятий микроэлектронного комплекса — НИИ микроприборов, ОАО “Квазар”, НПП “Сатурн”, НИИ “Орион”, НПО “Кристалл”, НИИ “Гелий” и др.

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА

Создание в Украине Национального микроэлектронного комплекса коллективного пользования с базовыми современными модулями кристаллов откроет следующие экономические и технические перспективы:

- развертывание в стране высокотехнологичного производства интегральных схем и гетероструктур;
- изготовление электронных комплектующих для обеспечения обороноспособности и информационной безопасности Украины;
- создание в Украине сети дизайн-центров по разработке ИС;
- создание в Украине библиотеки электронных компонентов и систем на кристалле, позволяющей быстро и сравнительно дешево проектировать и изготавливать любые электронные комплектующие для гражданского и военного применения;
- модернизация и доукомплектование современной аппаратурой центра физико-химических исследований и диагностики материалов, технологических структур и приборов микро- и оптоэлектроники, что обеспечит разработку и производство высоконадежных и конкурентоспособных изделий в интересах всех разработчиков и изготовителей элементной базы микроэлектроники;
- развитие в Украине смежных с электронной отраслей промышленности: химической, металлургии чистых металлов, технологического приборостроения и т. д.;
- обучение и закрепление в стране перспективных молодых специалистов: технологов, химиков,

разработчиков ИС, разработчиков систем на базе этих ИС, программистов этих систем и т. д. Работая и проходя стажировку в центре микроэлектроники, молодые ученые и специалисты смогут успешно реализовать свой потенциал в Украине, а сотрудники кафедр университетов и ВУЗов Украины будут проходить переподготовку и проводить научную работу в лабораториях центров микроэлектроники.

Реализация Национальной программы по микроэлектронике будет эффективным шагом по структурной перестройке экономики Украины, переходу на инновационный путь развития.

*К первоочередным задачам отнести:*

- создание межведомственного экспертного совета по микроэлектронике с привлечением НАНУ, МПП, МОН, других заинтересованных ведомств;
- разработку концепции и Национальной программы развития микроэлектроники.

*Настоящее решение направить в высшие правительственные инстанции.*

*Председатель заседания — директор НИИ микро-приборов В. Г. Вербицкий.*

*От участников заседания решение подписали:*

*председатель правления ОАО НПП "Сатурн" В. М. Чмиль,*  
*директор ДП "Квазар ИС" ОАО "Квазар" А. Н. Мартынюк*

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

- Интегральный оптоэлектронный коммутатор на ДМОП-транзисторах. (Украина, г. Черновцы)
- Химическое осаждение из газовой фазы гетеро- и наноструктур соединений III-V. (Украина, г. Львов)
- Исследование датчиков на поверхностных акустических волнах для дистанционного контроля температуры. (Россия, г. Волгодонск)
- Приборно-технологическое моделирование автоэмиссионных кремниевых микрокатодов. (Украина, г. Львов, г. Ивано-Франковск)
- Экспериментальное исследование пространственно-временного интегрирования в акустооптической среде. (Украина, г. Донецк)
- Оптимизация предэпитаксиальной обработки подложек в технологии выращивания гомоэпитаксиальных слоев GaSb из жидкой фазы. (Украина, г. Херсон)
- Фракталы, скейлинг и дробные операторы как основа новых методов обработки информации и конструирования фрактальных радиосистем. (Россия, г. Москва)
- Радиационная модификация хрупкости структурной сетки халькогенидного стекла. (Украина, г. Львов, г. Дрогобыч, г. Киев)
- Термоэлектрические преобразователи электрических и оптических сигналов — новый класс термоэлектрических устройств. (Россия, г. Санкт-Петербург)
- Исследование термометрических характеристик GaP-диодов  $n-p^+$ -типа. (Украина, г. Киев)
  - Сопротивление контактов тонкопленочного резистора. (Россия, г. Арзамас)
  - Выбор информационных параметров для аддитивного заряда химических источников тока. (Украина, г. Днепропетровск)
  - Расчет характеристик рентгеновского излучения. (Украина, г. Харьков)
  - Фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии на основе GaAs. (Украина, г. Херсон, г. Одесса)



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

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

К. х. н. Л. Т. СТРУТИНСКАЯ

Украина, г. Черновцы, Институт термоэлектричества  
E-mail: anatych@inst.cv.ua

Дата поступления в редакцию  
18.04.2008 г.

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МИКРОГЕНЕРАТОРЫ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

*Анализируется состояние и перспективы термоэлектрических микрогенераторов, в том числе и на органическом топливе. Определены пути повышения эффективности микрогенераторов и области их практического применения.*

Значительные успехи в развитии микротехнологий привели к увеличению масштабов использования портативных электронных устройств в специальной технике, системах телеметрии и навигации, метеорологических станциях и маяках, работающих длительное время без обслуживания. Для всех этих устройств требуются дешевые и экологически чистые источники питания с высокой удельной энергией и большим ресурсом работы, способные составить конкуренцию химическим источникам тока. Необходимость в таких источниках привела к появлению новой области использования термоэлектричества — генерированию микромощности [1, 2]. Эта область еще довольно молодая и находится на этапе исследования путей технической реализации и совершенствования термоэлектрических микрогенераторов.

До сих пор создание генерирующих микrouстройств шло по пути миниатюризации уже существующих. Это порождало множество проблем, связанных с движением жидкости в микроканалах, сгоранием топлива, тепло- и массопереносом в небольших объемах, проектированием и изготовлением таких устройств. Решение этих проблем требует выполнения как фундаментальных, так и прикладных исследований и разработок, уникальных для систем сгорания в малых масштабах: смешивание и прокачка топливной смеси с низким числом Рейнольдса, моделирование распределения температуры, химическое кинетическое моделирование, выбор материалов и разработка конструкции. Несмотря на определенные успехи, достигнутые в последние годы, необходимо решить еще ряд научных и технологических проблем, прежде чем эта область утвердится окончательно.

В основе создания микрогенераторов на органическом топливе лежит принцип использования высокой удельной энергии различного вида жидкого углеводородного топлива в микроустройствах сгорания [3]. Жидкие углеводороды имеют высокую удель-

ную энергию около 50 МДж/кг (для сравнения, лучшие литиевые батареи имеют плотность энергии 1,2 МДж/кг, а щелочные — 0,6 МДж/кг). Таким образом, миниатюрные устройства сгорания, даже с КПД превращения тепла в электричество около 3%, могут составить конкуренцию лучшим аккумуляторным батареям, кроме того, в таких устройствах можно обеспечить легкую замену топлива.

Термоэлектрические устройства с использованием процессов горения имеют существенные преимущества по сравнению с химическими источниками тока в плане возможностей накопления энергии на единицу массы и объема, использования большого числа традиционных видов углеводородного топлива и др. К преимуществам термогенераторов с микрокамерами сгорания относятся также их экологическая чистота, возможность работы при низкой температуре окружающей среды и более длительный ресурс работы.

Следует отметить, что до сих пор нет единой классификации микрогенераторов по величине электрической мощности. Одни исследователи относят к микрогенераторам устройства мощностью от нано- до милливатт, другие — до десятка и даже нескольких десятков ватт.

Термин «микроэнергетика» впервые был предложен Сетом Дунном из Института мировой экологии (Worldwatch Institute) [4]. К этой категории отнесены маломощные термогенераторы, солнечные батареи, ветровые генераторы, водородные элементы, газовые микротурбины. Однако, несмотря на большое количество потенциальных применений, широкое использование микрогенераторов сдерживается низким КПД превращения энергии и высокой стоимостью разработок.

Одним из путей расширения возможностей применения термоэлектричества является внедрение новых термоэлектрических материалов, более эффективных, чем традиционные материалы на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{PbTe}$ ,  $\text{Si}-\text{Ge}$ . Это материалы на квантовых ямах, скуттерудиты, функционально градиентные материалы (FGM) и другие.

Другой подход состоит в совершенствовании конструкции, повышении удельной мощности и снижении стоимости маломощных генераторных устройств. При этом миниатюрные генерирующие устройства должны быть совмещены с электронны-

## НОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

ми и оптоэлектронными компонентами, иметь высокое напряжение, большой ресурс работы и быть стойкими к влиянию окружающей среды [5, 6]. Однако технология производства современных термоэлектрических модулей неприменима для таких разработок из-за механических и технологических ограничений размеров термоэлементов. Поэтому исследования ведутся в двух направлениях: по созданию монолитных структур и тонкопленочных устройств в диапазоне мощностей от нВт до десятков мкВт с высоким напряжением (до 5 В). Удельная плотность мощности остается при этом на уровне 60—90 мкВт/см<sup>3</sup> [7].

При небольшой разнице температуры (10—20 К) вертикально интегрированные термоэлектрические микроустройства, полученные по технологии интегральных схем и электрохимической технологии толстых пленок, позволяют достичь высокой удельной мощности 1—10 Вт/см<sup>3</sup> при толщине веток термоэлемента 100 мкм [8]. Это достигается при использовании подложек с высокой теплопроводностью, тонкой металлизации, хорошего контакта с источником тепла и теплоотводом, что позволяет повысить эффективность работы микрогенератора при высоких тепловых потоках и небольшой разнице температуры.

Более подробно разработки с использованием термоэлектрических микрогенераторов рассмотрены ниже.

### Использование маломощных генераторов для освещения

По оценкам специалистов уже сегодня суммарное потребление электроэнергии человечеством превышает 120 млрд. МВт·ч и продолжает увеличиваться примерно на 3% в год [9]. В то же время почти 2 млрд. людей все еще не имеют доступа к электричеству. Причем, в некоторых районах Африки, Южной Азии и Латинской Америки доля населения, ко-

торая вынуждена жить без электричества, непрерывно растет [10].

Актуальным в данное время является использование для освещения светодиодов белого света. Серийно выпускаются светодиоды мощностью 1—3 Вт, которые потребляют на 80% энергии меньше, чем самая маломощная флуоресцентная лампа дневного света. Сравнительная диаграмма стоимости освещения разными устройствами (по данным журнала "Science", США) представлена на рис. 1.

Расчеты стоимости 1000 люкс-часов освещения проведены, исходя из условия трехгодичной эксплуатации (по 4 часа в сутки) с учетом всех расходов: цены оборудования, топлива, сетевой электроэнергии, лампочек, фитилей и батареек.

Из возможных применений автономного энергобезопасления, в том числе и для освещения, выделим те, которые пользуются наибольшим спросом:

- резервное электрообеспечение небольших фермерских хозяйств, частных домов, мини-гостиниц, дач, коттеджей;

- автономные системы для отдаленных от электрической сети объектов (полевые станы, электропастухи, системы микроорошения), а также энергобезопасение «зеленого туризма», который становится все более популярным.

Главными конкурентами термоэлектрических генераторов (ТЭГ) для освещения являются солнечные и ветровые генераторы, комбинированные ветросолнечные системы и дизель-генераторные установки. Существенный недостаток солнечных и ветровых электростанций — нестабильность их работы вследствие зависимости от природных и климатических условий, а также высокая стоимость систем энергобезопасения. Для типового коттеджа с суточным потреблением 3—4 кВт, расположенного, например, на широте Киева, она составляет около 4 тыс. \$, окупаемость — 15 лет [11]. К недостаткам дизель-генера-

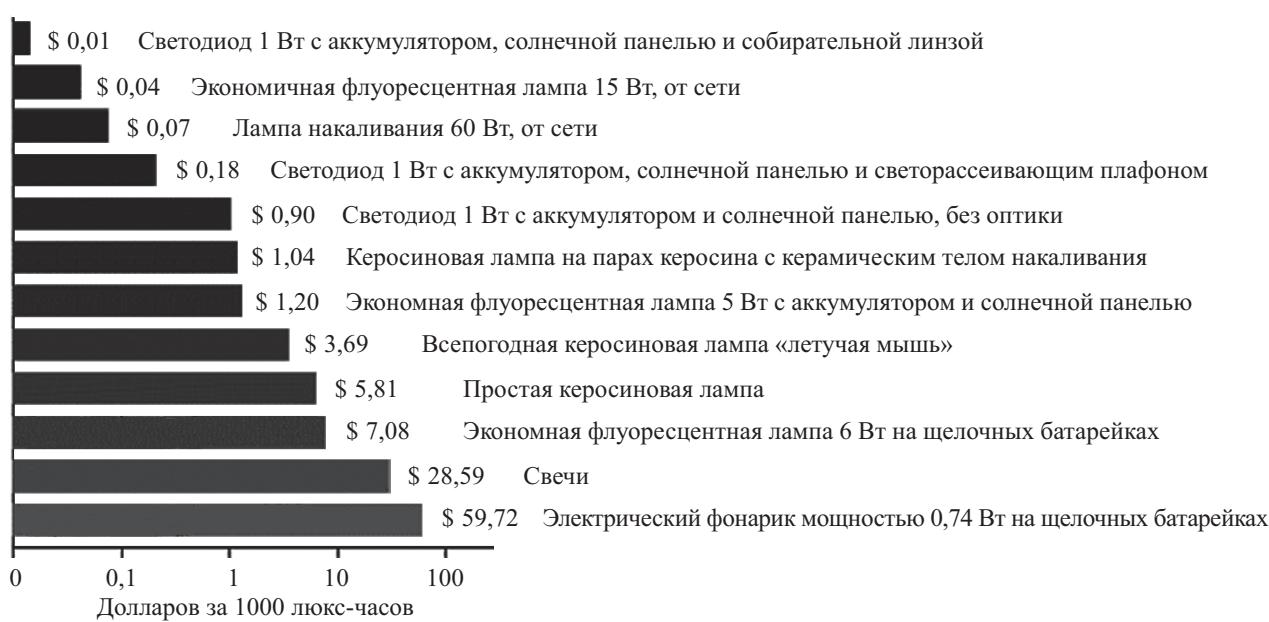


Рис. 1. Стоимость 1000 люкс-часов освещения разными источниками [9]

## НОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

торных установок следует отнести высокий уровень шума и сравнительно небольшой ресурс работы.

Альтернативой таким источникам является маломощный термогенератор на жидком или газовом топливе — бензине, керосине, природном газе или пропан-бутане. Это особенно актуально при работе и отдыхе в труднодоступных неэлектрофицированных местах, аварийном или внеплановом отключении электроэнергии, во время землетрясений, наводнений, ликвидации последствий стихийных бедствий и др. Такая комбинированная система, включающая фотопреобразователь, термогенератор и аккумулятор, от которого питается источник освещения, описана в работе [12].

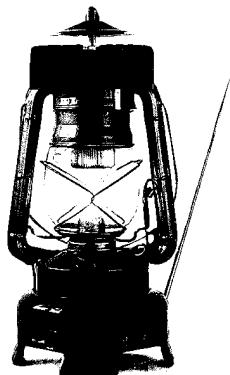


Рис. 2. Лампа Люфо производства компании «Serras Technologies»

Разработаны и уже производятся источники питания портативных устройств на основе керосиновых ламп и фонарей, в которых источники тепла используются для освещения помещений. Компания «Serras Technologies» (Франция) выпускает термогенераторы с керосиновым фонарем (рис. 2) для освещения и питания маломощных транзисторных приемников [13]. В генераторе использованы металлические термопары и воздушное охлаждение, выходное напряжение — 3 В. Низкая мощность такого генератора (0,2 Вт) значительно ограничивает область его использования.

Термогенератор Алтек-8019 (рис. 3), разработанный в Украине в Институте термоэлектричества, не имеет таких недостатков [14]. В этом генераторе ис-



Рис. 3. Термогенератор с керосиновой лампой Алтек-8019

точник тепла и света — керосиновая лампа. Полупроводниковая термобатарея выполнена из материала на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , электрическая мощность генератора — 3 Вт, напряжение — 3, 6 и 12 В. Такой термогенератор можно использовать как для питания радиоприемников и магнитофонов, так и для зарядки аккумуляторов мобильных телефонов, цифровых фотоаппаратов и других устройств.

Проведенный нами технико-экономический анализ использования термогенератора на пропан-бутане, обеспечивающего мощность 10 Вт (с аккумулятором), показал конкурентоспособность такого метода освещения, так как стоимость 1000 люкс-часов из расчета трехлетней эксплуатации составляет 1,15 \$. Для сравнения стоимость освещения экономичной флуоресцентной лампой с аккумулятором и солнечной панелью составляет 1,2 \$.

### Использование маломощных термогенераторов для зарядки аккумуляторов мобильных телефонов, КПК, цифровых фотоаппаратов

По оценкам специалистов, которые занимаются разработкой мобильных телефонов [15], новые модели, выполняя все больше функций (включая фото и видеокамеры, GPS-навигаторы, MP-3 плейеры, Интернет), требуют все более частой зарядки аккумуляторов и их замены, поскольку срок их службы ограничен (несколько сотен циклов «заряд-разряд»).

Для таких применений создано несколько термогенераторов. Российская компания «Криотерм» [16] серийно выпускает термогенераторы мощностью 8 Вт, которые предназначены для подзарядки элементов питания средств связи и навигации, радиоприемников, сотовых телефонов, переносных компьютеров, освещения в отдаленных и труднодоступных местах (рис. 4, а). Генератор выполнен в виде алюминиевого ковша объемом около 1 л, на дне которого установлены генераторные модули. Необходимый перепад температуры достигается при разогреве ковша, например, пламенем костра. Генератор снабжен стабилизатором напряжения от 3 до 12 В.

Другая российская фирма «Термокластер» [17] производит термогенератор (рис. 4, б) мощностью 12 Вт и напряжением 12 В для питания бытовой аппаратуры, средств связи, освещения, зарядки акку-

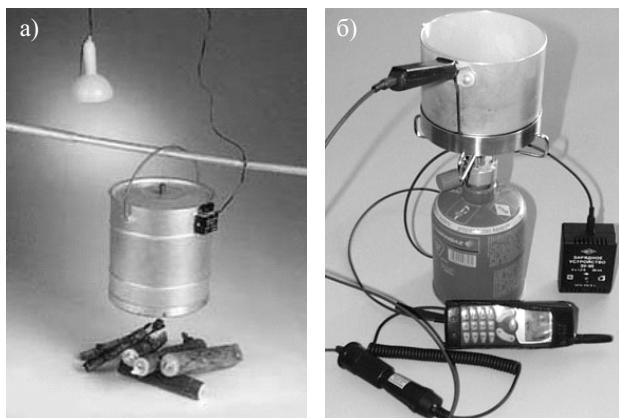


Рис. 4. Термогенераторы для зарядки мобильных телефонов «Криотерм» (а) и «Термокластер» (б)

## НОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

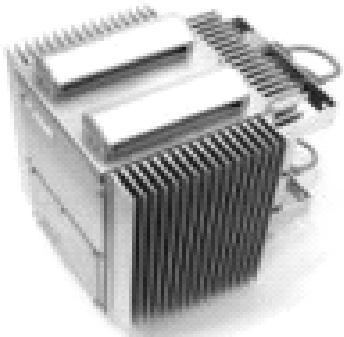


Рис. 5. Термоэлектрический микрогенератор мощностью 2 Вт

муляторов мобильных телефонов, видеокамер, ноутбуков с использованием разных источников тепла: керогаза, примуса, газовой горелки, печки. Недостатками таких устройств являются их большие габариты и необходимость постоянного обслуживания.

Заслуживает внимания микрогенератор компании «Harris Corporation» (США) [18] для зарядки аккумуляторов, батарейных устройств. Он содержит микрокамеру сгорания (температура стенок достигает  $800^{\circ}\text{C}$ ) и термоэлектрический модуль на основе структур с квантовыми ямами. Эффективность модуля, по утверждению создателей, составляет 14—20%. Электрическая мощность генератора достигает 2 Вт, напряжение — 12 В. В другом варианте [19] для оптимального использования тепла сгорания топлива эта разработка снабжена газовой турбиной, которая дает дополнительную энергию.

Альтернативой солнечным батареям являются генераторы компании «PGI International» (США) [20] мощностью 2 и 8 Вт (рис. 5). Основное их назначение — питание систем коммуникаций и мониторинга труднодоступных районов.

В Институте термоэлектрического (Украина) созданы термогенераторы мощностью от 1 до 10 Вт с диффузионными каталитическими источниками тепла [21]. Они комплектуются зарядным устройством и стабилизатором напряжения. Особенность разработанных термоэлектрических генераторов — воз-

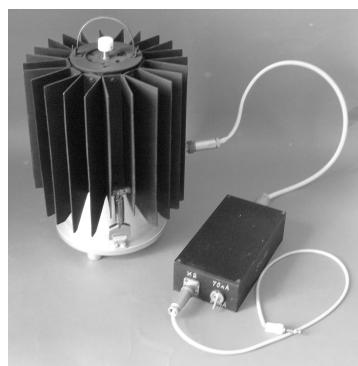


Рис. 6. Термоэлектрический микрогенератор мощностью 1,5 Вт

можность использования жидкого топлива (бензин, керосин, спирт). На рис. 6 показан термогенератор мощностью 1,5 Вт с каталитической испарительной горелкой. Собственная топливная емкость рассчитана на непрерывную работу в течение 25 часов. При необходимости генератор через дозатор подключается к топливному баку большей емкости.

Использование каталитических диффузионных источников тепла в составе микрогенераторов позволило решить ряд проблем теплового регулирования и надежной работы генератора в широком диапазоне подачи топлива [22]. Исследованы две схемы микрогенераторов — цилиндрическая и центральная (рис. 7).

Для центральной схемы найдены оптимальная конфигурация горячего радиатора и расстояние от катализатора до радиатора, при которых достигается максимальная температура. Приведенные схемы реализованы в конкретных вариантах каталитических микрогенераторов [23] мощностью от 10 до 150 мВт.

Особенностью микрогенераторов мощностью 10 и 40 мВт является реализация частичной рекуперации тепла, отведенного от холодных спаев термобатареи, которое используется для предварительного подогрева топлива. В генераторе мощностью 100 мВт используется стандартный газовый баллон емкостью 80—100 мл. При условии длительного потребления электрической энергии от разработанных микрогене-

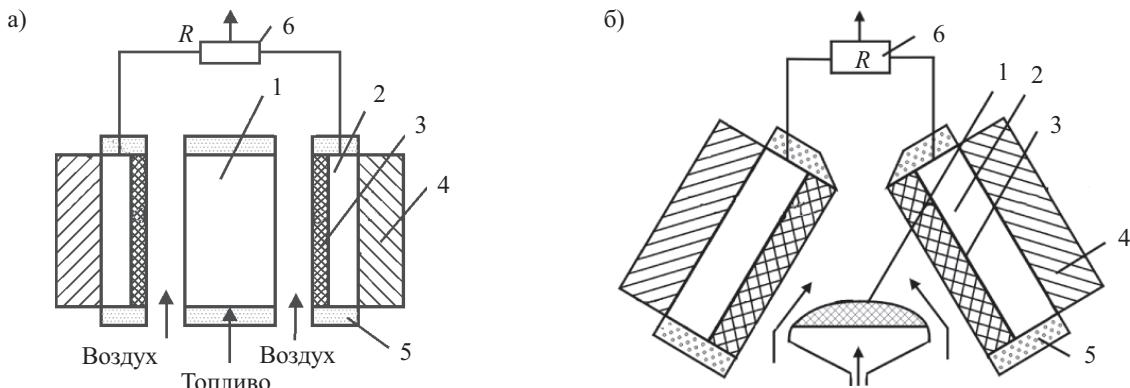


Рис. 7. Цилиндрическая (а) и центральная (б) схемы каталитических микрогенераторов:  
1 — катализатор; 2 — термобатарея; 3, 4 — горячий и холодный радиаторы, соответственно; 5 — теплоизоляция; 6 — электрическая нагрузка

## НОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

нераторов, стоимость энергии примерно в 3 раза меньше стоимости энергии гальванических элементов.

### Микрогенераторы для микроэлектронных устройств

Микрогенераторы для микроэлектронных устройств стали в последнее время объектом внимания целого ряда научно-исследовательских институтов и организаций различных стран мира. Среди них Jet Propulsion Laboratory (США), Infineon Technologies AG (Германия), University of Southern California (США), NEDO Laboratory (Япония) и другие. Основными направлениями их деятельности являются исследования процессов каталитического сжигания органического топлива в микрокамерах и создание термоэлектрических пленочных структур для использования в микроэлектромеханических системах (МЭМС).

Исследования показали, что каталитическое горение является особенно перспективным для использования в термоэлектрических микрогенераторах [3, 24]. Горение на катализаторах вследствие более низкой по сравнению с пламенным горением эффективной энергией активации (примерно в 3 раза) происходит при более низкой температуре и минимальных потерях тепла. Преимущество использования катализаторов состоит также в существенном расширении температурных границ горения в зависимости от состава топливно-воздушной смеси [25]. Устройства, в которых используются подобные камеры сгорания, получили название «рулет» или «швейцарская булочка» [26] (рис. 8) и могут генерировать электрическую мощность до 100 мВт.

Повышение КПД таких устройств достигается снижением тепловых потерь благодаря использованию рециркуляции газов, созданию трехмерных кон-

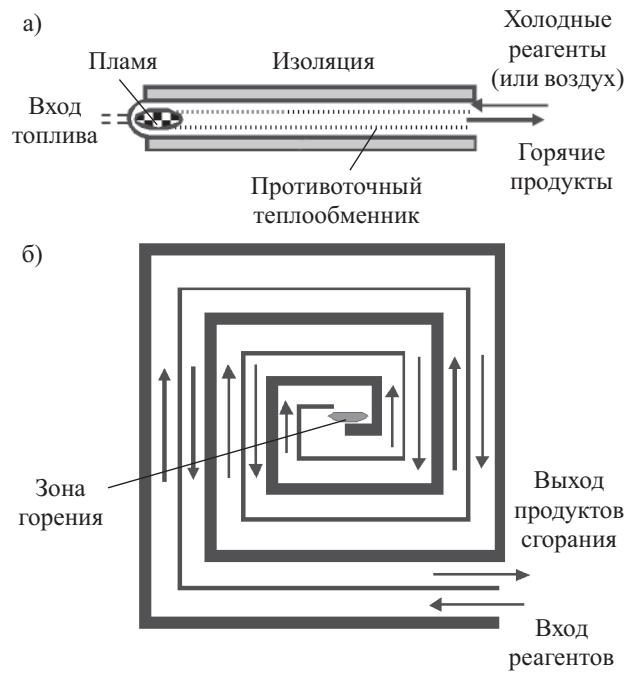


Рис. 8. Схемы теплообменника (а) и камеры сгорания (б) типа «швейцарская булочка» с рециркуляцией тепла

структур из плоских теплообменников с камерой сгорания и электрораспыления жидкого топлива, подаваемого в камеру сгорания.

Экспериментальные исследования микрокамер с каталитическими покрытиями на основе платины и матрицей микродатчиков температуры показали реальную возможность их использования для питания МЭМС [26, 27]. Микрогенератор на основе поликремниевой термобатареи с каталитическим Pt-покрытием, разработанный в Мичиганском университете (США) [24], показан на рис. 9. В качестве топлива в нем используется водород. При перепаде температуры между холодным и горячим спаями 200 К мощность достигает 1 мкВт на одну термопару, КПД — 1%. Мощность до 10 мкВт на одну термопару и КПД 3% достигается при различных геометрических модификациях и использовании более высокого температурного градиента ( $\Delta T=800$  К).

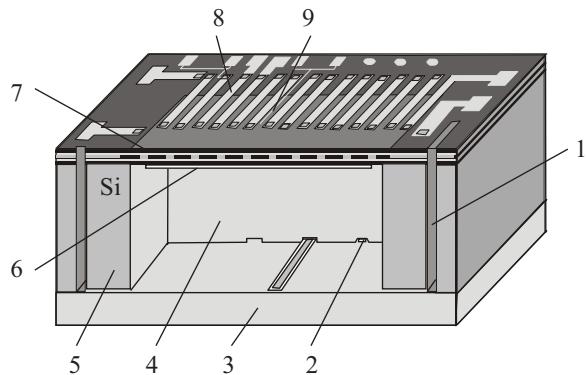


Рис. 9. Конструктивная схема термоэлектрического микрогенератора:

1 — выход продуктов сгорания; 2, 9 — датчики; 3 — стекло; 4 — камера сгорания; 5 — вход газа; 6 — Pt-катализатор; 7 — тепловая изоляция; 8 — термобатарея

Для ряда космических и наземных применений необходимы микроэлектронные устройства низкой мощности при сравнительно высоких напряжениях [28]. Для выполнения такого условия группой китайских ученых создан микрогенератор, в котором удачно сочетаются высокие термоэлектрические характеристики нанопроволок на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  с преимуществами технологии интегральных схем. Микрогенератор имеет пленочную структуру толщиной менее 100 мкм. Уникальная слоистая структура, состоящая из нанопроволочных микрозон, соединенных последовательно и параллельно, позволяет получить на выходе генератора высокое напряжение (до 5 В).

Миниатюрные устройства для интегральных блоков теплового регулирования и источников электроэнергии низкой мощности и высокого напряжения разработаны в США в JPL (Jet Propulsion Laboratory) совместно с НАСА [29]. Разработка микрогенераторов этой компании с улучшенными рабочими характеристиками ведется в направлении миниатюризации электронных компонентов и совмещения функций обнаружения, расчета, регулирования и генерирования мощности. На стадии изготовления находятся новейшие термоэлектрические микро- и нано-

## НОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

устройства, обеспечивающие возможность управления значительными тепловыми потоками и увеличения плотности электрической мощности [30] при повышенном напряжении и быстродействии и сравнительно небольших перепадах температуры. Генераторы изготовлены с использованием технологии интегральных схем и электрохимического осаждения сложных полупроводников ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ ) с размером веток 20 мкм на оксидированной кремниевой основе ( $\text{Si}/\text{SiO}_2$ ) размером  $1,7 \times 1,7$  мм. Тонкопленочные генераторные устройства работают в диапазоне мощностей от мкВт до мВт. Области их использования — теплозатратные мониторы, активные ретрансляторы и автономные системы сигнализации о перегреве [31].

Ученые Массачусеттского Технологического института (США) [32] разработали термогенератор на основе каталитического сгорания на мемbrane. Устройство изготовлено с использованием микротехнологий, имеет канал для входа газовоздушной смеси, вытравленный в кремниевой пластине, накрытым тонкой мембраной из нитрида кремния, и высокотемпературную термобатарею на основе Si-Ge. Платиновый катализатор осаждается на мембрану со стороны канала и соединяется с горячим спаев термобатареи. Генератор стабильно работает при сгорании водорода, аммиака или бутана при температуре до 500°C. Выходное напряжение составляет около 7 В, мощность — 75 мВт.

Учитывая актуальность проблем энергосбережения, важными являются исследования миниатюрных термоэлектрических систем генерирования энергии [33] с использованием тепловой энергии окружающей среды при небольших перепадах температуры или тепловой энергии каталитического сгорания органического топлива с последующей зарядкой накопительной батареи (рис. 10).

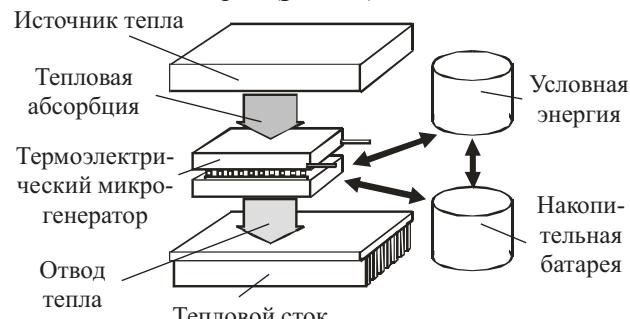


Рис. 10. Модель термоэлектрической системы энергосбережения

В качестве топлива в каталитических системах используется метан, метanol, этанол, муравьиная кислота. Электрическая мощность составляет 40 мВт при напряжении 5 В, КПД достигает 6,5%.

Термоэлектрический микрогенератор с использованием полупроводниковых тонкопленочных технологий на основе мелкодисперсного поликристаллического кремниевого материала (рис. 11) изготовлен в University of Southern California (США) [34]. Модель может использоваться в двух вариантах — как радиоизотопный термоэлектрический микрогенера-

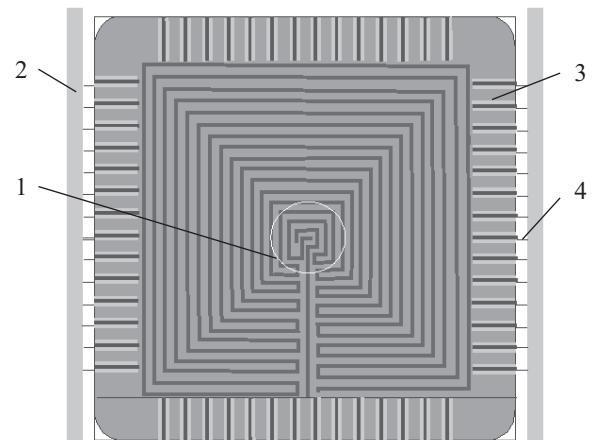


Рис. 11. Схема термоэлектрического микрогенератора на кремниевой основе

тор и как наручные часы. Микрогенератор состоит из нагревателя 1 в виде спирали, размещенного в центре мембраны. Вокруг него расположены термоэлементы 3 и межэлементные соединения 4. Кремниевая рама 2 играет роль холодной стороны. В режиме наручных часов источник тепла — человеческое тело, а хладагент — воздух.

На рис. 12 показана также схема изобретения компании Seiko Instrument Inc.: термоэлектрические наручные часы Seiko [35, 36], работающие от тепла человеческого тела. Часы потребляют 1—2 мкВт при разнице температуры от 1 до 3°C. Термобатарея такого устройства содержит 10 модулей по 104 элемента в каждом и дает напряжение 0,2 В, необходимое для зарядки Ti-Li батареи емкостью 4,5 мА·ч.

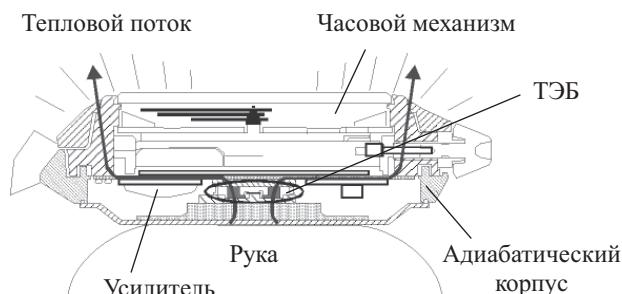


Рис. 12. Схема термоэлектрических часов Seiko

Термоэлектрические тонкопленочные микроУстройства с высокой плотностью упаковки термоэлектрических ветвей разработаны в Институте Фрайбурга (Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques IPM) совместно с компанией Micropelt GmbH (Германия) [37, 38]. Разработанная технология позволяет создавать устройства с количеством ветвей  $p$ - и  $n$ -типа около 8000 на площади 1 см<sup>2</sup>. ЭДС генератора достигает 2,3 В при  $\Delta T=10$  К, максимальная выходная мощность — 2,8 мВт. Предложен альтернативный метод с использованием раздельных подложек для материалов  $p$ - и  $n$ -типа проводимости толщиной несколько мкм, которые осаждаются методом напыления на отдельную подложку на основе  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  и далее подвергаются отжигу и формированию и припаиваются друг к другу. Площадь разработанных устройств составляет от 0,5 до 25 мм<sup>2</sup>.

## НОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Компания Thermo Life® Energy Corp. (США) [39] разработала миниатюрный термоэлемент, генерирующий энергию для датчиков, имплантатов и чипов RFID при перепадах температуры 5—10 К. Специалисты Thermo Life Energy поместили более 5 тысяч тончайших термопар в «таблетке» диаметром всего 9,3 мм, толщиной 1,4 мм и весом 0,23 г. Термопары созданы на подложке при помощи фотолитографии, материалы для термопар — сплавы на основе теллурида висмута. При перепаде температуры между двумя сторонами этой «таблетки» всего 5 градусов генерируется ток около 10 мкА, мощность элемента составляет 30 мкВт. Устройство рассчитано на сбор «бросового» тепла от работающей техники, человеческого тела, промышленных сточных вод, а также от солнечного излучения.

В рамках программы центральной научно-исследовательской организации при министерстве обороны США (DARPA) [40—42] проводятся исследования тепловых процессов, происходящих в системе «воздух — активный слой почвы» и непосредственно в активном слое почвы, для получения термоэлектрической энергии. Результаты этих исследований используются для получения термоэлектрической энергии.

Микрогенераторы, основанные на использовании разницы температур воздуха и активного слоя почвы, а также суточных перепадов температуры воздуха, разработаны в Украине в Институте термоэлектричества [43, 44]. Они предназначены для обеспечения электропитанием небольших автономных наземных и подземных дистанционных систем, которые включают различные датчики и устройства связи. Перспективным является использование почвенных термогенераторов для питания сигнальных устройств на неэлектрофицированных участках дорог, для обеспечения работы автономных агрометеорологических комплексов в отдаленных и пустынных районах. Особенno эффективным является их применение в системах охранной сигнализации.

Термоэлектрические генераторы, помещенные в почву, работают в труднодоступных местах без обслуживания и являются экологически чистыми источниками электрической энергии. Выходная мощность таких генераторов — от 5 до 20 мВт, напряжение — 3—12 В.

Компактный источник питания [8], в котором микрогенератор использует разницу температур воздуха и слоя почвы, предназначен для обеспечения работы электронных устройств в отдаленных и малодоступных участках. Конструктивной основой микрогенератора служит небольшой алюминиевый корпус с двумя рядами ребер. Теплообмен с почвой осуществляется с помощью тепловой трубы длиной 30 см. При эффективной разнице температуры на спаях термобатареи около 8,5°C можно получить мощность до 22 мкВт при напряжении 4 В. Микрогенератор используют для непрерывной подзарядки комплекта батарей или конденсаторов, которые должны кратковременно обеспечивать высокой мощностью электронные устройства.

### Термоэлектрические микрогенераторы для специальной и медицинской техники

Развитие специальной и медицинской техники стимулирует создание долговечных и маломощных источников энергии с улучшенными рабочими характеристиками. Для применений в спецтехнике их выходная мощность должна составлять несколько ватт. Исследования по созданию автономных систем питания специального назначения проводятся с активным участием DARPA. Миниатюрные термоэлектрические генераторы, встроенные в электронные компоненты, в полевых условиях могут питать датчики вибрации, давления и освещения, накапливать данные о вибрации почвы и смене температуры, а также питать устройства, которые передают данные на самолет- или вертолет-разведчик [45]. Такие устройства позволяют создавать автономные охранные системы различных объектов. По оценкам специалистов мощность генератора для работы в одном таком элементе охранной системы составляет 50 мВт.

Как альтернатива аккумуляторам еще более привлекательными являются термогенераторы с электрической мощностью 10—20 Вт для питания раций, систем спутниковой навигации, приборов ночного видения. При одинаковой мощности термогенераторы на органическом топливе в 20 раз легче традиционных аккумуляторов [45]. Особенno перспективно применение термогенераторов в таких областях как управление спецтехникой, сбор информации, повышение уровня защиты солдат, а также в передвижных устройствах контроля и безопасности [46].

Микрогенераторы широко используются в кибернетике и медицинских приборах как стимуляторы, где потребление энергии находится на уровне милливатт. Пример такого использования — регулятор ритма сердца, созданный General Atomic [47], который подает электрические импульсы в мышцу сердца. Его мощность — 400 мкВт, напряжение — 4 В.

Немецкая компания Siemens разработала термоэлектрическую систему, которую можно использовать как аккумулятор для регулятора ритма сердца [5]. Термогенератор содержит тонкопленочные термопары, осажденные методом взрывного выпаривания из материала на основе ZnSb, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>. При тепловой мощности 100 мВт выходная электрическая мощность составляет 0,28—0,4 мВт, КПД — до 0,4%.

Перспективным является использование термогенераторов в медицинских приборах, которые вживляются в организм человека (IMD), таких как кардиостимуляторы, дефибрилляторы, насосы для дозировки лекарств и нейростимуляторы. В большинстве таких приборов источниками питания служат аккумуляторы, которые не перезаряжаются. Поэтому главное ограничение таких приборов — ресурс работы аккумулятора [48]. В настоящее время использование IMD постоянно растет, ежегодно в мире вживляется около 1 млн. кардиостимуляторов. В Центре термоэлектрических исследований (США) разработан термогенератор, использующий разницу

## НОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

температур внутренней поверхности кожи и основного корпуса генератора. Использование улучшенной тонкопленочной технологии позволяет получить мощность выше 100 мВт при разнице температур 0,3—1,7°C. Внедрение термоэлектрических технологий для питания IMD позволит увеличить ресурс работы таких приборов и, как следствие, уменьшить частоту хирургических вмешательств с целью замены IMD.

Имплантаты-нейростимуляторы для больных эпилепсией начали применять с 1988 года, и на сегодняшний день их используют больше 25 тысяч человек. Наряду с сокращением числа припадков врачи отметили и побочный положительный эффект нейростимуляций — явное улучшение настроения больных. Электронные устройства-антидепрессанты вживаются в организм человека и подавляют депрессию с помощью электростимуляции особого нерва, идущего в мозг, так называемого блуждающего черепно-мозгового нерва.

Компанией Infineon Technologies AG (Германия) создан такой усовершенствованный термоэлектрический микрогенератор размером 1 см<sup>2</sup> [49]. Основное внимание уделено созданию термически оптимальной конструкции и снижению общего электрического сопротивления генератора. Выходная электрическая мощность составляет около 1 мкВт, напряжение — до 5 В на согласованной нагрузке при перепаде температуры 5 К.

\*\*\*

Представленные в данном обзоре разработки термоэлектрических микрогенераторов показывают, что все более широкое их использование формирует отдельное очень важное направление термоэлектрического — генерирование микромощности для зарядки аккумуляторов, мобильных телефонов, цифровых фотоаппаратов и фотокамер, КПК, GPS-навигаторов, питания небольших радиостанций и другой портативной техники, в том числе и медицинской, а также терминалов спутниковой связи, датчиков температуры, давления, теплового потока, систем навигации и телеметрии.

Для термогенераторов на органическом топливе с выходной электрической мощностью до 1 Вт наиболее перспективным является использование катализитических диффузионных источников тепла. Главным преимуществом таких ТЭГ является экологическая чистота, возможность длительной работы без обслуживания и использование различных видов топлива.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Maruta K., Takeda K., Sitzki L. et al. Catalytic combustion in microchannel for MEMS power generation // Third Asia-Pacific Conference on Combustion.— Seoul, Korea.— 2001.— P. 1—4.
2. Vican J., Gajdeczko B. F., Dryer F. L. et al. Development of a microreactor as a thermal source for MEMS power generation // Proc. of the 29<sup>th</sup> Int. Symposium on Combustion.— Sapporo, Japan.— 2002.— P. 909.
3. Fernandes-Pello A. C. Micro-power generation using combustion: issues and approaches // Ibid.— P. 1—45.
4. <http://www.microenergy.ru>
5. Rowe D. M. Miniature semiconductor thermoelectric devices.— CRC Handbook of Thermoelectrics.— 1995.
6. Fleurial J.-P., Borshchevsky A., Caillat T., Ewell R. New materials and devices for thermoelectric applications // Proc. of the 32<sup>nd</sup> IECEC.— Honolulu, Hawaii.— 1997.— P. 1080.
7. Stordeur M., Stark I. Low power thermoelectric generator-self-sufficient energy supply for micro systems // Proc. of the 16<sup>th</sup> Int. Conf. of Thermoelectrics.— Dresden, Germany.— 1997.— IEEE Catalog N 97<sup>th</sup> 8291.— P. 575—577.
8. Fleurial J.-P., Snyder G. J., Herman J. A. et al. Miniaturized thermoelectric power sources // Proc. of the 34<sup>th</sup> Intersociety Energy Conversion Engineering Conference.— Vancouver, Canada.— 1999.— P. 2569.
9. Что дешевле — свеча или светодиод? (По материалам журнала «Science», США) // Наука и жизнь.— 2006.— № 6.
10. Целуйко В. И. О концепции энергоэффективного освещения // Строительство и недвижимость.— 1999.— № 13.
11. Осиенко П. Електричне сонце // Електротема.— 2002.— № 3.— <http://www.intelcenter.com.ua>
12. Пат. 2243437 Великобритания. Electric lamp / Hwang Feng-Lin (GB).— 30.10 1991.
13. Пат. WO 00/08692. Device for supplying electric power by thermoelectric conversion / E. Serras, N. Serras (FR).— 17.02 2000.
14. Пат. 8637 України. Автономний термоелектричний генератор / Л. І. Анатичук, В. Я. Михайловський.— 2005, Бюл. № 8.
15. Телефону не хватает энергии // Наука и жизнь.— 2004.— № 8.— С. 53
16. <http://www.kryotherm.ru>
17. <http://www.thermocluster.ru>
18. Пат. WO 2006/017390. Fuel Flexible thermoelectric generator with battery charger / S. C. W. Smith, C. M. Newton (US).— 16.02 2006.
19. Пат. 6987329 США. Fuel flexible thermoelectric micro-generator with micro-turbine / C. W. Sijin Smith, C. M. Newton, Richard Gassman.— 17.01 2006.
20. <http://www.pgiint.com/thermoelectric>
21. Mikhailovsky V. Ja. New horizons in the use of thermoelectric generators. Replacement of chemical sources of electric energy by the miniature thermogenerators with radiant catalytic heat sources // J. of Thermoelectricity.— 1997.— N 1.— P. 85—99.
22. Anatychuk L. I., Mikhailovsky V. Ja., Konopelnuk V. V. Miniature thermoelectric generators (TEG) with catalytic heating // Proc. of the XIV Int. Conf. on Thermoelectrics.— Pasadena, California, USA.— 1996.— P. 387—389.
23. Михайловський В. Я. Термоелектричні мікргенератори з каталітичним спалюванням пропан-бутану // Термоелектрика.— 2002.— № 4.— С. 86—90.
24. Zhang C., Najafi K., Bernal L. P., Washabaugh P. D. An integrated combustor-thermoelectric micro power generator // Proc. of the 11 Int. Conf. on Solid-State Sensor and Actuators.— Munich, Germany.— 2001.— P. 69.
25. Jones A. R., Lloyd S. A., Weinberg F. J. Combustion in heat exchangers // Proc. Roy. Soc.— London.— 1978.— A360.— P. 95—115.
26. Ahn J., Eastwood C., Sitzki L., Ronney P. D. Gas-phase and catalytic combustion in heat-recirculating burners // Proc. of the Combustion Institute.— Vol. 30.— 2004.— P. 1—27.
27. Ronney P. D. Analysis of non-adiabatic heat-recirculating combustors // Combustion and Flame.— 2003.— Vol. 135.— P. 421—439.
28. Wei Wang, Falong Jia, Jianzhong Zhang. A new type of micro-thermoelectric power generator fabricated by nanowire array thermoelectric material // Proc. of the 22<sup>nd</sup> Int. Conf. on Thermoelectrics.— La Grande-Motte, France.— 2003.— P. 682—684.
29. Fleurial J.-P., Snyder G. J., Patel J. et al. Solid-state power generation and cooling micro/nanodevice for distributed system architectures // Proc. of the 20<sup>th</sup> Int. Conf. on Thermoelectrics.— Beijing, China.— 2001.— P. 24—29.
30. Lim J. R., Snyder G. J., Huang C.-K. et al. Thermoelectric microdevice fabrication process and evaluation at the jet propulsion laboratory (JPL) // Proc. of the 21<sup>st</sup> Int. Conf. on Thermoelectrics. IEEE.— Long Beach, California, USA.— 2002.— P. 535.

## НОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

31. Bottner H., Nurnus J. Miniaturized thermoelectric converters // Thermoelectrics Handbook. Macro to Nano / edited by D. M. Rowe — CRC Press, 2006.
32. Schaevirtz S. B., Franz A. J., Jensen K. F., Schmidt M. A. A combustion-based MEMS thermoelectric power generator // Transducers'01, The 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators.— Munich, Germany.— 2001.— P. 30.
33. Ryan M. A., Fleurial J. P. Where there is heat, there is a way: thermal to electric power conversion using thermoelectric micro-converters // Electrochemical Soc. Interface.— 2002.— Vol. 11.— P. 30—33.
34. Jacquot A., Liu W. L., Chen G. et al. Fabrication and modeling of an in-plane thermoelectric micro-generator // Proc. of the 21<sup>st</sup> Int. Conf. on Thermoelectrics.— Long Beach, California, USA.— 2002.— P. 561.
35. Paradiso J. Energy harvesting for mobile computing. Responsive Environments Group, MIT Media Lab. <http://www.media.mit.edu/resenv>.
36. Пат. 6222114 США. Portable wrist device / Mitamura Gen (JP).— 2001.
37. Bottner H. Micropelt® miniaturised thermoelectric devices: small size, high cooling power densities, short response time // Proc. of the 24<sup>th</sup> Int. Conf. on Thermoelectrics.— Clemson, USA.— 2005.— P. 1—8.
38. Bottner H., Nurnus J., Gavrikov A., Kuhner G. New thermoelectric components using microsystem technologies // J. of Microelectromechanical Systems.— 2004.— Vol. 13, N. 3.— P. 414—420.
39. <http://www.poweredbythermlife.com>
40. Stevens J. W. Optimized terminal design of small  $\Delta T$  thermoelectric generators // Proc. of the 34<sup>th</sup> Intersociety Energy Conversion Engineering Conference.— Vancouver, B.C.— 1999.— P. 2564.
41. Stevens J. W. Optimal design of small  $\Delta T$  thermoelectric generation systems // Energy Conversion and Management.— 2001.— Vol. 42.— P. 709—720.
42. Stevens J. W. Heat transfer and thermoelectric design consideration for a ground-source thermoelectric generator // Proc. of the Int. Conf. on Thermoelectrics.— Baltimore, MD.— 1999.— P. 68—71.
43. Анатычук Л. И., Микитюк П. Д. Термогенераторы, использующие тепловые процессы в почвах // Термоэлектричество.— 2003.— № 3.— С. 91—100.
44. Микитюк П. Д., Петренко Н. С. Термоэлектрический источник питания, использующий тепло почвы // Термоэлектричество.— 2003.— № 2.— С. 75—82.
45. <http://www.atlant.ru>
46. White A. A. Review of some current research in microelectromechanical systems with defense applications. Weapons systems division aeronautical and maritime research laboratory // DSTO-GD-0316, Aeronautical and Maritime Research Laboratory.— Australia.— 2002.— P. 51.
47. Rowe D. M. Low powered thermoelectric generators and devices // Proc. of the 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Thermoelectrics.— Yokohama, Japan.— 1993.— P. 429—438.
48. Watkins C., Shen B., Venkatasubramanian R. Low-grade-heat energy harvesting using superlattice thermoelectrics for applications in implantable medical devices and sensors // Proc. of the 24<sup>th</sup> Int. Conf. on Thermoelectrics.— Clemson, USA.— 2005.— P. 250—252.
49. Strasser M., Aigner R., Lauterbach C., Sturm T. F. Micro-machined CMOS thermoelectric generators as on-chip power supply // Sensors & Actuators A: Physical.— 2004.— Vol. 114.— Issue 2/3.— P. 362—370.

## ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

**AISS-AUTOMATICA-2008**  
АВТОМАТИЗАЦИЯ:  
ПРИМЕНЕНИЕ, ИННОВАЦІЇ, РЕШЕНИЯ, СИСТЕМЫ

КІДВ 14.VI.1892Г

25-27  
НОЯВРЯ  
КІЕВ

ОРГАНІЗАТОР  
**SMART EXPO**

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ  
**SACCO International**  
г. Київ  
проспект Победи  
40-Б

Д. т. н. В. А. МОКРИЦКИЙ, О. В. БАНЗАК, В. П. ВОЛОСЕВИЧ

Дата поступления в редакцию  
12.02 2008 г.Украина, Одесский национальный политехнический университет  
E-mail: mokrictiy@mail.ruОппонент к. ф.-м. н. А. В. РЫБКА  
(ХФТИ, г. Харьков)ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ  
ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

*Обнаружена стойкость основных параметров микросборок, предназначенных для измерения и стабилизации температуры первичных преобразователей неэлектрических величин, к воздействию быстрыми электронами и нейтронами. Показаны причины изменений некоторых параметров.*

Проблема воздействия излучений на изделия твердотельной электроники может рассматриваться, во-первых, с точки зрения их деградации, во-вторых, как технологический инструмент управления некоторыми параметрами [1]. В данной работе подобный подход к этой проблеме использован для изучения действия электронов с энергией 3,5 МэВ (ускоритель ЭЛУ-4) и нейтронов с энергией 14,5 МэВ (генератор НГ-150) на микросборку, предназначенную для измерения и стабилизации температуры первичных преобразователей неэлектрических величин (сенсоры перемещений, давления и т. п.). Такой объект выбран из-за того, что в его структуре собраны разнородные элементы: дискретные полупроводниковые, интегральные тонкопленочные и полупроводниковые. Это расширяет круг исследуемых объектов и повышает достоверность получаемых результатов.

Пассивная часть микросборки выполнена по тонкопленочной технологии на ситалловой подложке и содержит 15 резисторов. Активные элементы — бескорпусные интегральные аналоговые микросхемы серии Б140 УД12 (4 шт.), две микросхемы серии

765КТ3-1 с токовыми ключами, а также бескорпусные стабилитрон 2С164М-1 и транзисторы 2Т378Б1-2. Использован металлокерамический корпус.

Типичные и допустимые значения основных параметров микросборки до радиационной обработки представлены в табл. 1. Здесь  $U_{ct}$  — выходное стабилизированное напряжение;  $U_{vых0}$  — выходное напряжение дифференциального усилителя при напряжении на входе  $U_{вх}=0$ ;  $I_{вкл}$  — ток выходного транзистора во включенном состоянии;  $I_{выкл}$  — ток входного транзистора в выключенном состоянии.

Радиационная обработка произведена быстрыми электронами при флюэнсе  $10^{14}$ ,  $10^{15}$ ,  $10^{16}$ ,  $10^{17}$  см $^{-2}$ , и быстрыми нейтронами — при флюэнсе  $10^{14}$ ,  $10^{15}$ ,  $10^{16}$  см $^{-2}$ . Результаты измерения параметров микросборок после радиационной обработки представлены в табл. 2. Анализ полученных результатов показывает, что основные электрические параметры микросборок изменились в пределах допуска. Исключение составляет обработка быстрыми электронами при флюэнсе  $10^{16}$  и  $10^{17}$  см $^{-2}$ . В этих случаях выходное стабилизированное напряжение превысило допустимое приблизительно на 1,5 В.

Из данных табл. 2 следует, что параметры микросборок устойчивы к облучению быстрыми электронами при флюэнсе  $10^{15}$  см $^{-2}$ ; быстрыми нейтронами при  $10^{16}$  см $^{-2}$ . Важным обстоятельством, характеризующим радиационную стойкость микросборок как достаточно высокую, является уже отмеченное выше малое изменение основных параметров (за исключением  $U_{ct}$ ), практически не зависящее от флюэнса.

Таблица 1

Электрические параметры микросборок до радиационной обработки

Номер микросборки	$U_{ct}$ , В	$U_{вых0}$ , мВ	$U_{вх}$ , мВ	$U_{вых}$ , В	$I_{вкл}$ , мА	$I_{выкл}$ , нА
007502	11,69	9,8	500	4,46	26,99	16
007202	11,65	0,3	496	4,51	27,00	13
007002	11,24	9,1	501	4,53	27,06	14
006802	11,73	3,1	500	4,47	26,98	14
006002	11,32	2,4	499	4,54	26,92	20
006102	11,27	2,6	500	4,47	26,89	25
Допустимые значения						
	$11,5 \pm 0,35$	$\pm 20,0$	$500 \pm 10$	$4,5 \pm 0,4$	$25 \pm 5$	$< 10 \text{ мкА}$

## ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА: ИССЛЕДОВАНИЯ, РАЗРАБОТКИ

Таблица 2

Электрические параметры микросборок после радиационной обработки

Виды воздействия	Флюэнс, см <sup>-2</sup>	Номер микросборки	$U_{ct}$ , В	$U_{вых,0}$ , мВ	$U_{вх}$ , мВ	$U_{вых}$ , В	$I_{вкл}$ , мА	$I_{выкл}$ , нА
Быстрыми электронами	$10^{17}$	007502	13,30	5,3	501	4,40	25,70	3,0
	$10^{16}$	007202	13,75	0,2	500	4,50	25,21	3,2
	$10^{14}$	007002	11,21	4,5	500	4,52	24,40	7,5
Быстрыми нейтронами	$10^{16}$	006802	11,9	0,5	500	4,70	23,50	5,0
	$10^{15}$	006002	11,32	5,9	500	4,60	23,75	7,0
	$10^{14}$	006102	11,32	4,2	501	4,53	23,47	11,0

Наибольшие изменения наблюдаются для токов включения и выключения выходного транзистора. Это можно объяснить уменьшением коэффициента передачи тока базы транзистора. Следует отметить, что такое уменьшение токов транзистора не выходит за рамки допустимых значений, а для тока  $I_{выкл}$  может рассматриваться как положительный эффект.

Основной причиной отмеченных закономерностей является высокая радиационная стойкость операционных усилителей (**ОУ**), входящих в состав сборки. Действительно, схемы ОУ типа Б140УД12 построены таким образом, что их входной дифференциальный каскад, генераторы тока входного каскада и эмиттерные повторители обеспечивают значительное подавление синфазных помех, к числу которых относится отклонение выходного напряжения операционного усилителя, обусловленное облучением.

Второй по важности причиной значительной радиационной стойкости микросборок является высокая стойкость тонкопленочных резисторов, намного большая, чем полупроводниковых приборов.

Различие радиационной стойкости микросборок в случаях облучения быстрыми электронами и быс-

тыми нейтронами объясняется различием свойств частиц и природы их воздействия на твердое тело. Действие электронов сопровождается нагревом изделия, обусловленным их торможением в элементах конструкции [2, 3].

\*\*\*

Таким образом, полученные данные показали, что исследованные микросборки имеют достаточно высокую радиационную стойкость. Их радиационная обработка при флюэнсе до  $5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> для электронов и  $10^{16}$  см<sup>-2</sup> для нейтронов приводит к улучшению одного из ведущих электрических параметров — тока выключения  $I_{выкл}$ .

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кулаков В. М., Ладыгин Е. А., Шаховцов В. И. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники.— М.: Сов. радио, 1980.
2. Вавилов В. С., Кекелидзе Н. П., Смирнов Л. С. Действие излучений на полупроводники.— М.: Наука, 1988.
3. Ленков С. В., Мокрицкий В. А., Перегудов Д. О., Тарие-лашвили Г. Т. Физико-технические основы радиационной технологии полупроводников.— Одесса: Астропринт, 2002.

### НОВЫЕ КНИГИ

**Максфилд Клайв. Проектирование на ПЛИС. Курс молодого бойца.— М.: Додэка-XXI, 2007.— 408 с.**

Эта книга является не только пособием по проектированию устройств на основе ПЛИС (FPGA), но и содержит поистине энциклопедические сведения. Кроме архитектурных особенностей последних поколений микросхем ПЛИС, здесь рассматриваются различные методы и средства проектирования. Проводится обзор и анализ схемотехнических подходов к проектированию (которые всё ещё находят применение), HDL-моделирования и логического синтеза, а также современных технологий проектирования, основанных на использовании языка C/C++. Рассматриваются специализированные вопросы, такие как совместное проектирование программно-аппаратных систем и разработка систем цифровой обработки сигналов (ЦОС). Обсуждаются и технические новинки, например программируемые пользователем массивы узлов (FPNA). Написанная в непринуждённом, увлекательном стиле, книга будет хорошим пособием и для начинающих, и для опытных инженеров, разрабатывающих устройства на основе ПЛИС. Книга послужит весьма ценным источником информации и для специалистов, разрабатывающих устройства на основе заказных микросхем и переходящих на использование ПЛИС. А также, несомненно, привлечет внимание широкого круга читателей, в том числе технических аналитиков, студентов и продавцов технической продукции.

НОВЫЕ КНИГИ



Д. ф.-м. н. Л. А. БУЛАВИН, к. ф.-м. н. О. Ю. АКТАН,  
Т. Ю. НИКОЛАЕНКО

Украина, Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко  
E-mail: tim\_mail@ukr.net

Дата поступления в редакцию  
04.03 2008 г.

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

## ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

*Разработана простая в реализации система регистрации параметров механических колебаний, обладающая высоким быстродействием, и соответствующее программное обеспечение.*

При выполнении экспериментальных исследований часто возникает необходимость регистрации параметров гармонических колебаний (в том числе затухающих) различных объектов и сред. Примером тому могут служить установки для измерения реологических параметров жидких металлов [1], консистентных жидкостей [2] и др. Основной подвижной частью таких установок является крутильный маятник, совершающий в процессе измерений затухающие гармонические колебания.

Для измерения реологических параметров консистентных жидкостей с помощью такой установки определяют период и декремент затухающих колебаний стержня маятника. С этой целью на стержне маятника укрепляют зеркало и направляют на него луч лазера. Экспериментатор сообщает стержню маятника начальное отклонение и наблюдает (при визуальном способе регистрации) за положением отраженного от зеркала луча на шкале (рис. 1). Когда луч впервые проходит через нулевое значение шкалы, включают секундомер, а когда луч проходит его  $N$  раз (как правило, в эксперименте  $N=7$ ) секундомер останавливают. По известным значениям количества колебаний и их суммарной продолжительности вычисляют период колебаний  $T$ . Логарифмический декремент затухания  $\delta$  определяют по формуле [3]:

$$\delta = \frac{\ln(a_1 / a_N)}{N},$$

где  $a_1$  и  $a_N$  — соответственно амплитуды первого и  $N$ -го колебаний.

Однако визуальная регистрация достаточно трудоемка и вносит дополнительную погрешность в результаты эксперимента. Это потребовало разработки электронных способов регистрации механических колебаний.

Авторами [3] была предложена электронная установка для автоматической регистрации периода и декремента затухания колебаний по отношению скрости прохождения отраженным лучом положения равновесия при первом и  $N$ -м колебании. Для этого

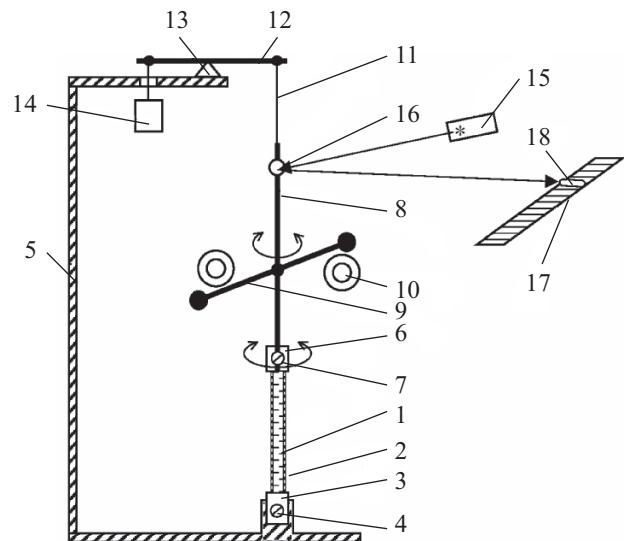


Рис. 1. Схема реализации базового (визуального) способа определения параметров колебаний крутильного маятника: 1 — исследуемая жидкость; 2 — трубка из эластичного материала; 3, 6 — пробка; 4, 7 — зажим; 5 — штатив; 8 — жесткий стержень; 9 — коромысло; 10 — электромагнит; 11 — упругая нить; 12 — рычаг подвесной системы; 13 — опора; 14 — груз натяжения; 15 — источник света (лазер); 16 — зеркало; 17 — шкала; 18 — пятно от луча света на шкале

вместо шкалы с делениями устанавливают непрозрачный экран с двумя щелями, расположенными симметрично относительно равновесного положения луча. За экраном помещают фотоэлемент, подключенный к электронному устройству, которое обрабатывает сигнал от фотоэлемента для последующего вычисления  $T$  и  $\delta$ . Электронное устройство, предложенное в [3], состоит из 17 отдельных блоков, сложно реализуется и требует сопряжения с ПЭВМ.

Более простой вариант компьютерной реализации этой же методики предложен в [4]. Здесь электронная часть системы регистрации параметров колебаний состоит из двух фотодиодов и несложной схемы сопряжения с ПЭВМ. Принцип работы электронной части системы основан на регистрации моментов времени  $t_j^A$  и  $t_j^B$  попадания отраженного луча лазера соответственно в щели  $A$  и  $B$ , расположенные на расстоянии  $l$  друг от друга симметрично положению равновесия луча ( $j$  — порядковый номер прохождения положения равновесия).

## МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ

В качестве фотодатчиков в [4] использованы два фоторезистора типа ФПФ-7, которые имеют сравнительно большое (до 10 мс) время реакции. В связи с этим область применения устройства ограничена регистрацией колебаний с большим периодом, т. к. время движения луча между щелями должно значительно превышать время реакции фоторезисторов. Кроме того, измерение промежутков времени в [4] реализовано на базе системного таймера ПЭВМ (микросхема i8253), что исключает использование управляющего программного обеспечения такой установки в многозадачной операционной системе (например, MS Windows).

Таким образом, разработка электронной системы регистрации механических гармонических колебаний, лишенной указанных недостатков, является актуальной задачей. Для ее решения следует, во-первых, вместо фоторезисторов использовать в качестве датчика фотодиод, а во-вторых, «вынести» за границы ПЭВМ блок измерения промежутков времени. В то же время, следует сохранить простоту реализации аппаратной части системы.

Достичь поставленной цели авторам удалось путем построения системы регистрации на базе 8-разрядного микроконтроллера PIC16F630 фирмы Microchip и ПЭВМ. Тактовый генератор микроконтроллера PIC16F630 позволяет обеспечить работу в режиме синхронизации внешним квадцевым резонатором (используется частота 8 МГц). Кроме того, PIC16F630 имеет встроенные модули 16-разрядного таймера и аналогового компаратора. Изменение логического состояния выхода компаратора приводит к генерации команды прерывания. Работа микроконтроллера управляется программой, хранящейся во FLASH-памяти размером 1024 команды; объем памяти, доступной для данных программы, составляет 64 байта.

На **рис. 2** показана схема построения предлагаемой системы регистрации, а на **рис. 3** — подключение микроконтроллера к электронной части.

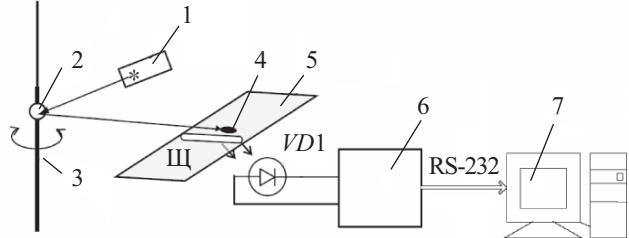


Рис. 2. Схема построения электронной системы регистрации параметров колебаний:

1 — лазер; 2 — зеркало; 3 — стержень кривошпинного маятника; 4 — пятно от отраженного зеркалом 2 лазерного луча; 5 — непрозрачный экран с щелью Щ; 6 — электронная часть (см. рис. 3); 7 — ЭВМ

Резисторы  $R1$  и  $R2$  образуют делитель напряжения, обеспечивающий на инвертирующем входе  $C_{in-}$  компаратора микроконтроллера потенциал около 0,15 В. Когда фотодиод  $VD1$  затемнен (т. е. когда луч лазера не попадает в щель  $\Pi$ ), напряжение на входе  $C_{in+}$  компаратора меньше, чем на  $C_{in-}$ , и на выходе  $C_{out}$  компаратора напряжение соответствует уровню логической единицы (выход компаратора программно инвертирован). Резистор  $R3$  создает положительную обратную связь, необходимую для подавления пульсаций напряжения («дребезга») на фотодиоде, возникающих во время изменения его освещенности. Светодиод  $VD2$  служит индикатором освещенности фотодиода  $VD1$  и используется при юстировке оптической части системы (в случае необходимости).

На **рис. 4** приведена блок-схема, иллюстрирующая работу программы микроконтроллера, разработанной для управления предлагаемой системой регистрации.

Когда отраженный луч лазера попадает в щель Щ, фотодиод  $VD1$  освещается и напряжение на входе  $C_{in+}$  компаратора (см. рис. 3) становится выше, чем на  $C_{in-}$ . Это приводит к изменению логического уровня на выходе  $C_{out}$  компаратора с логической 1

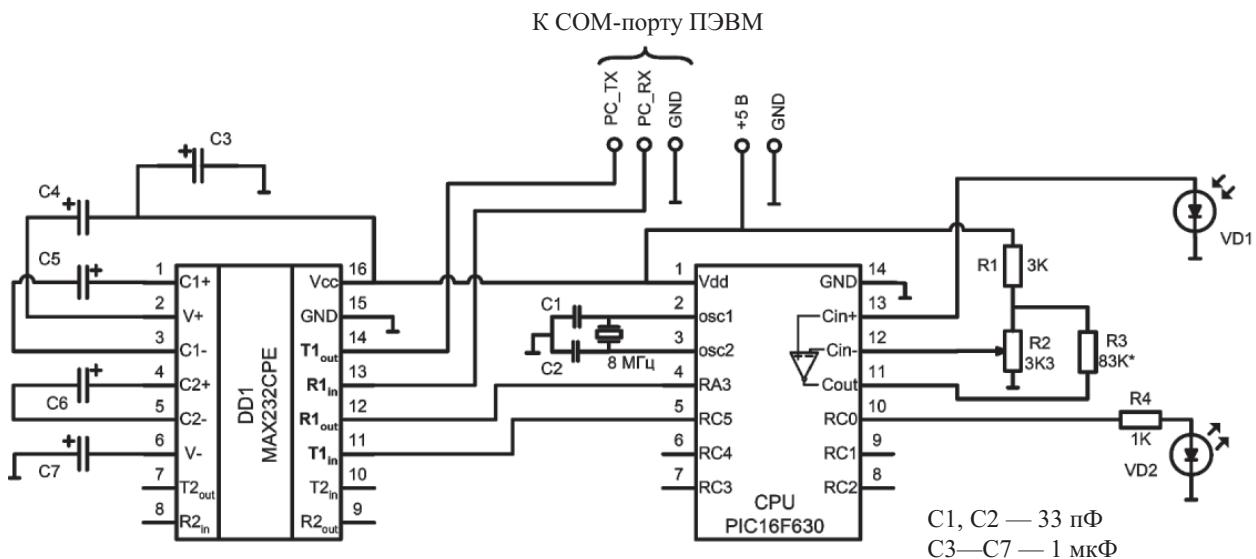


Рис. 3. Схема подключения микроконтроллера к электронной части системы регистрации (на выводах  $C_{in+}$ ,  $C_{in-}$ ,  $C_{out}$  показан встроенный аналоговый компаратор микроконтроллера)

## МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ

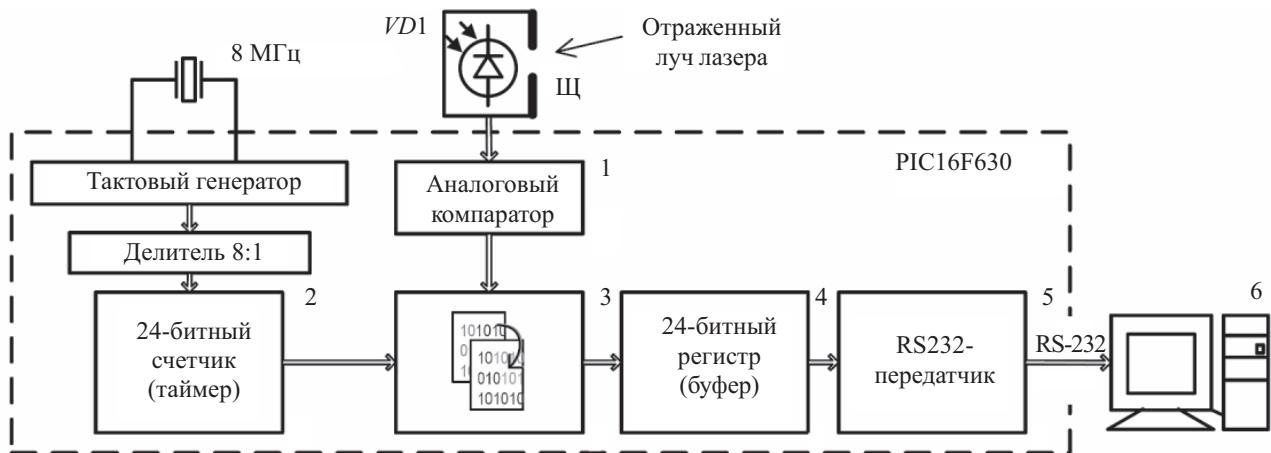


Рис. 4. Блок-схема работы программы микроконтроллера

на логический 0 и к генерации аппаратного прерывания, процедура-обработчик которого 3 (см. рис. 4) сохраняет в буфере 4 текущее значение времени таймера 2 (с точностью не ниже 10 мкс). Это же происходит и в моменты времени, когда луч лазера выходит за пределы щели Щ.

В установке [2], для которой разрабатывалась электронная система, время засветки фотодиода составляет не менее 10 мс. В течение этого времени передатчик 5 отправляет сохраненное в регистре 4 значение на ПЭВМ 6. Для этого используется протокол RS-232 на скорость 19200 бод, а передаваемые биты формируются на выводе RC5 микроконтроллера программным путем. Для согласования низковольтных логических уровней микроконтроллера и уровней СОМ-порта ПЭВМ используется микросхема MAX232CPE. Предусмотрена также возможность приема устройством команд от ПЭВМ.

Работающее на ПЭВМ специальное программное обеспечение принимает оцифрованную таким образом последовательность моментов времени  $t_j^A$  и  $t_j^B$ , которые в данном случае соответствуют пересечению лучом одной и второй границ щели Щ. По значениям  $t_j^A$  и  $t_j^B$  автоматически рассчитывается период колебаний и декремент затухания. Для этого используется следующая методика.

Обозначив  $t_j = (t_j^A + t_j^B)/2$ , для расчета периода колебаний имеем:

$$T = \frac{t_j - t_1}{(j-1)/2},$$

где  $t_1$  — момент времени первого прохождения лучом положения равновесия.

Скорость  $v_j$  прохождения лучом положения равновесия определяют как

$$v_j = \frac{l}{t_j^A - t_j^B}. \quad (1)$$

С другой стороны, если продифференцировать по времени выражение для координаты отраженного луча на шкале

$$x = a_0 e^{-\frac{\delta}{T} t} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right),$$

где  $a_0$  — начальная амплитуда, и положить  $t=j(T/2)$  — момент времени прохождения лучом положения равновесия в  $j$ -й раз, то для  $v_j$  получим следующее выражение:

$$v_j = \left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=j(T/2)} = \frac{2\pi a_0}{T} \cdot (-1)^j e^{-\delta \cdot j/2}. \quad (2)$$

Декремент затухания  $\delta$  вычисляется ПЭВМ, используя (2) для аппроксимации последовательность точек  $\{j, v_j\}$ , полученных из (1).

Все элементы предложенной электронной части системы собраны на монтажной плате, которая конструктивно включена в состав крутильного маятника.

\*\*\*

Таким образом, разработано простое в реализации устройство, обладающее высоким быстродействием (время реакции не более 10 мкс) и содержащее внутренний таймер, что позволяет использовать для обработки результатов программное обеспечение ПЭВМ в многозадачной операционной системе (MS Windows). Для обработки данных, передаваемых устройством на ПЭВМ, разработано специальное программное обеспечение для компьютеризированной регистрации параметров механических гармонических колебаний.

Разработанное устройство может использоваться для регистрации параметров не только крутильных, но и линейных колебаний.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Швидковский Е. Г. Некоторые вопросы вязкости расплавленных металлов. — М.: Гостехтеориздат, 1955.

2. Пат. 78094 України. Спосіб визначення реологічних характеристик консистентних рідин / Л. А. Булавін, Ю. Ф. Забашта, О. Ю. Актан, Т. Ю. Ніколаєнко. — 2007. — Бюл. № 2.

3. Яковлев Г. П., Дунаев Ф. Н., Шелкунов Г. С. Электронная установка для регистрации периода и логарифмического декремента // В кн.: Новые машины и приборы для испытания металлов. — М.: Металлургиздат, 1963. — С. 51—53.

4. Булавин Л. А., Актан О. Ю., Николаенко Т. Ю. и др. Компьютеризация метода крутильных колебаний // Приборы и техника эксперимента. — 2007. — № 3. — С. 164—165.

К. В. КОЛЕСНИК, к. т. н. В. В. СМАГЛЮК,  
д. ф.-м. н. Г. И. ЧУРЮМОВ

Украина, г. Харьков, НИПИ «Союз», Харьковский национальный  
ун-т радиоэлектроники  
E-mail: kolesniknet@ukr.net, churumov@ic.kharkov.ua

Дата поступления в редакцию  
19.05 2008 г.

Оппонент к. т. н. Н. Н. КОБАК  
(НТУУ «КПИ», г. Киев)

## КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОХРАНЫ ПЕРИМЕТРОВ КРУПНЫХ ОБЪЕКТОВ

*Предлагается структурная схема построения радиотехнических систем охраны периметров крупных объектов с точки зрения полноты решаемых функциональных задач.*

Обеспечение безопасности крупных объектов всегда имело особое значение как в общегосударственном масштабе, так и в сфере частного бизнеса. Под крупными объектами подразумеваются: промышленные предприятия, крупные склады и хранилища, объекты энергетического и химического комплексов, аэропорты и испытательные полигоны, т. е. объекты, которые расположены на значительных площадях и включают в себя большое число зданий и сооружений. К таким объектам обычно предъявляют повышенные требования по обеспечению пожарной, экологической и техногенной безопасности.

Одним из важных аспектов в решении вопроса безопасности крупных объектов является создание радиотехнических систем охраны их периметров. Такие системы обеспечивают предотвращение преднамеренного проникновения на территорию объекта, контроль прохода или проезда на его территорию субъектов и транспортных средств при непосредственном функционировании этих объектов.

Систему охраны периметра можно подразделить на ряд функциональных подсистем, учитывая многообразие выполняемых функций.

Конкретная реализация системы охраны объекта зависит от специфики самого объекта, требований к функциональным подсистемам и номенклатуры применяемых радиотехнических средств.

Структурная схема радиотехнической системы охраны (РТСО) периметров крупных объектов, позволяющей решать основные задачи, показана на рис. 1.

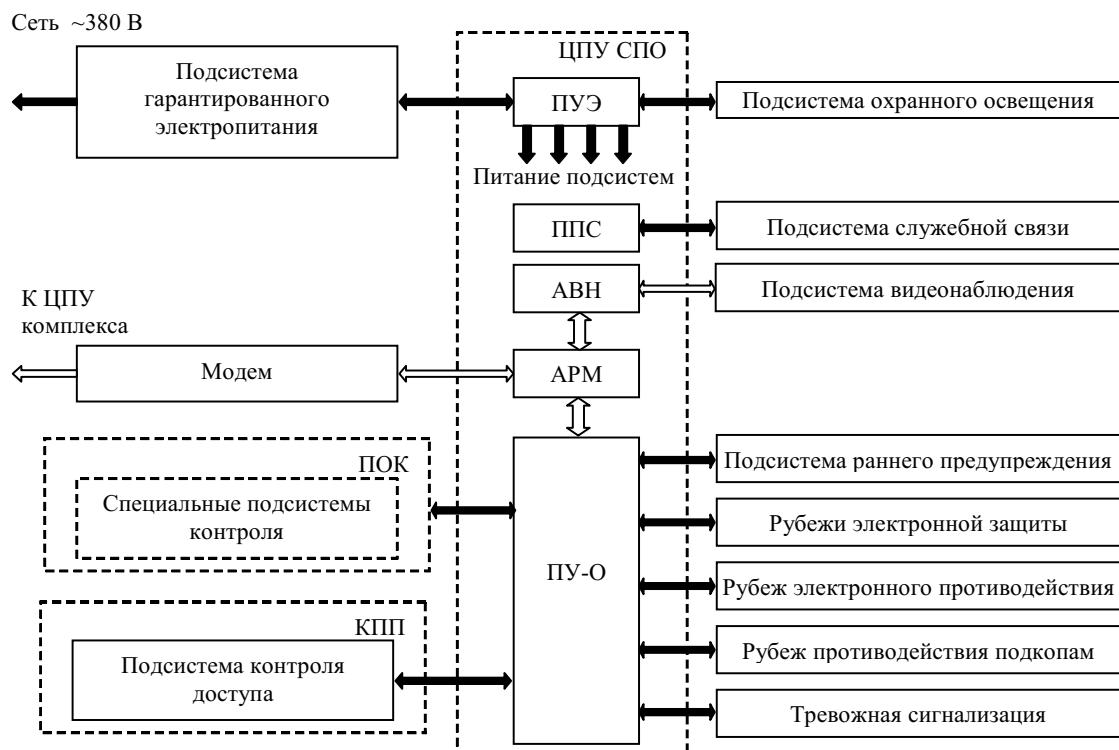


Рис. 1. Обобщенная структурная схема РТСО периметров крупных объектов

## ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА: ИССЛЕДОВАНИЯ, РАЗРАБОТКИ

Кроме радиотехнических средств в структуру системы входят:

- контрольно-пропускные пункты (**КПП**);
- пункты обеспечения контроля участков периметров (**ПОК**);
- охранное периметровое освещение.

Рассмотрим основные принципы построения функциональных подсистем РТСО.

*Подсистема раннего предупреждения на подступах к периметру* предусматривает наличие внешней полосы отчуждения, которая позволяет идентифицировать границу объекта предупредительными транспарантами, электронными светозвуковыми табло и громкой связью.

*Радиотехнический рубеж предупреждения подкопов* обычно совмещают с одним из физических ограждений периметра и используют для выявления подкопа под него.

*Подсистема видеонаблюдения (АВН)* предназначена для визуального контроля, регистрации и передачи видеинформации с любого контролируемого участка на дальних подступах к периметру объекта и вдоль самих периметров.

*Подсистема служебной связи (ПСС)* должна обеспечивать двухстороннюю связь контролеров с начальником службы охраны. Служебная связь орга-

низуется при помощи линейных (проводных) средств связи. Кроме того, необходимо предусмотреть наличие резервных средств в виде переносных радиотехнических средств связи.

Объект должен быть оснащен «тревожной связью», как вдоль тропы контроля, так и по территории объекта. В качестве средств связи применяются «тревожные кнопки», которые подключены к системе охранной сигнализации и имеют адресную фиксацию, что позволяет определять участок нарушения и повышает эффективность системы в целом.

*Рубежи радиотехнической защиты от преднамеренного проникновения* на территорию объекта устанавливаются за физическим ограждением периметра (забором). При этом для уменьшения возможного противодействия нарушителя применяются один или несколько рубежей радиотехнической защиты, основанных на различных физических принципах построения, таких как проводноволновые, радиолучевые, инфракрасные, вибрационные, трибоэлектрические, емкостные, сигнальные и др.

*Рубеж электронного противодействия* рекомендуется располагать после рубежей радиотехнической защиты для повышения эффективности противодействия нарушителям. Этот рубеж представляет собой

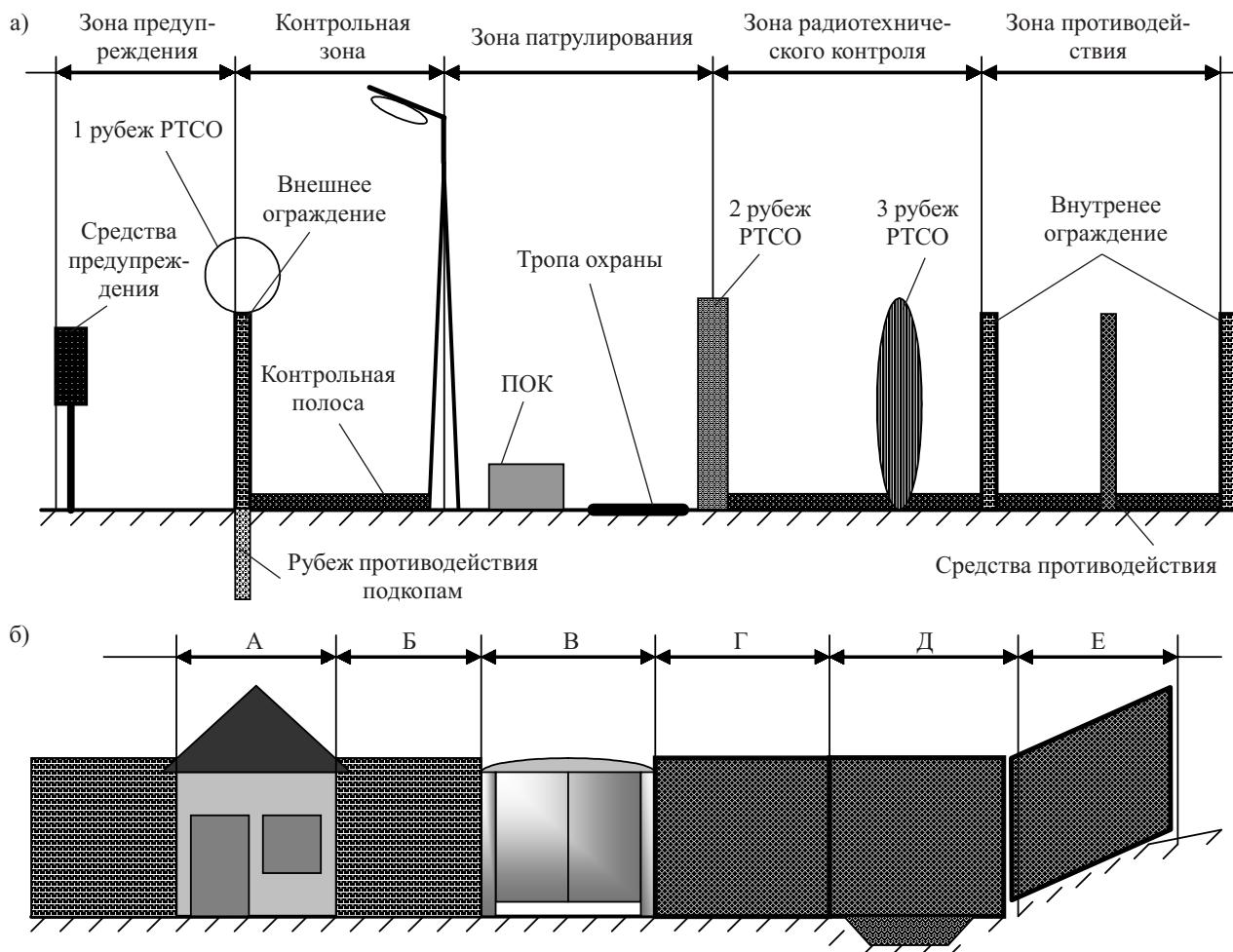


Рис. 2. Условный участок периметра крупного объекта

## ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА: ИССЛЕДОВАНИЯ, РАЗРАБОТКИ

активное электронное устройство, которое физически воздействует непосредственно на нарушителя (например, высоким электрическим напряжением).

Помимо рассмотренных средств, объекты могут оснащаться специальными подсистемами контроля, регистрации и противодействия в зависимости от специфики объекта, что определяется в каждом конкретном случае и согласуется с соответствующими ведомственными службами. Это могут быть приборы ночного видения, радиолокаторы, сканирующие прожекторы и т. д.

Центральный пульт управления (ЦПУ) системой должен обеспечивать выполнение следующих функций: централизованное управление работой всех составных частей системы; контроль работоспособности, регистрацию отказов и локализацию неисправности любого элемента системы; получение адресной информации от всех подсистем контроля и охраны периметра объекта; архивирование и обработку полученной информации; выработку сообщений и указаний по обеспечению сохранности объекта.

ЦПУ представляет собой специализированный программно-аппаратный комплекс, включающий в себя автоматизированное рабочее место (АРМ) на базе персональной ЭВМ и специальное программное обеспечение (СПО). Кроме того, в состав АРМ входит пульт управления аппаратурой охраны периметра (ПУ-О), представляющий собой адресную телеметрическую микропроцессорную систему, пульт видеоконтроля и регистрации, пульт подсистемы связи (ППС), пульт управления энергоснабжением и охранным периметровым освещением (ПУЭ), модем связи с ЦПУ комплекса, аппаратура видео наблюдения (АВН).

На рис. 2, а показано расположение основных радиотехнических подсистем на условном участке периметра объекта.

Учитывая, что периметр объекта на разных участках может иметь различный рельеф местности (рис. 2, б, зоны Д и Е), а также иметь участки проезда или прохода (зона В), иметь в составе периметра строения (КПП или другие — зона А) или физическое ограждение различных типов (зоны Б и Г), для охраны различных участков периметра целесообразно применять различные типы РТСО в зависимости от их особенностей.

Рассмотрим многообразие применяемых средств на примерах реализации радиотехнической защиты от преднамеренного проникновения.

Первый вариант — с применением периметрового охранного радиоволнового извещателя типа ЕМЦ200/2 (Украина, Превин ЛТД) показан на рис. 3. Извещатель использует принцип регистрации изменения электромагнитного потока СВЧ-сигнала между разнесенными на охраняемом периметре приемной и передающей антеннами [1, 2].

Поток электромагнитных волн между передающей и приемной антенной имеет вытянутую форму. В извещателе ЕМЦ200/2, где используются плоские прямоугольные антенные решетки одинаковой формы и ориентации, форма потока близка к вытянутому прямоугольному параллелепипеду.

Для минимизации интерференционных составляющих сигнала в реальных условиях используют фазированные антенные решетки, выполненные по микрополосковой технологии.

Извещатель ЕМЦ200/2 имеет следующие характеристики:

- дальность действия до 500 м при максимальной ширине зоны не более 3 м, в т. ч. и в сложных климатических условиях;

- возможность обнаружения нарушителей в большом диапазоне скорости их перемещения (от 0,1 до 10 м/с);



Рис. 3. Радиоволновой извещатель типа ЕМЦ200/2

Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2008, № 4

а)



б)

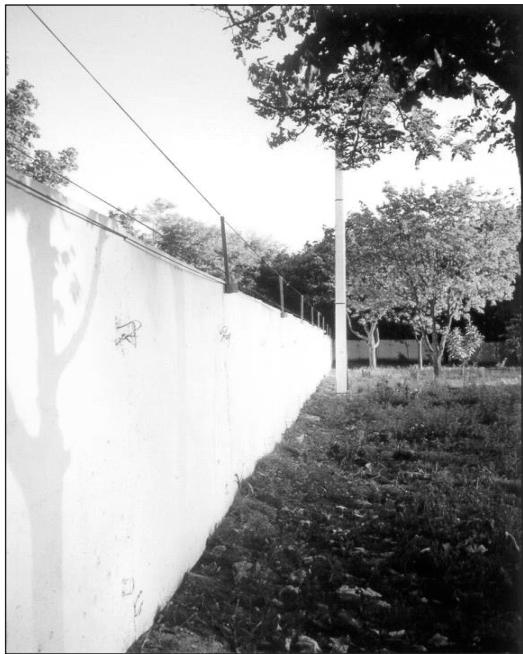


Рис. 4. Проводнорадиоволновой извещатель «Рельеф»

- возможность получения прогнозированных и постоянных характеристик зоны обнаружения;
- малая мощность излучения (менее 10 мВт);
- высокая вероятность (не менее 0,95) обнаружения нарушителя при пересечении охранной зоны при ходьбе в полный рост, бегом, ползком (перекатом), прыжком;
- высокая помехозащищенность;
- отсутствие «мертвых» зон.

В качестве второго варианта рубежа радиотехнической защиты от преднамеренного проникновения может быть рассмотрен проводнорадиоволновой извещатель «Рельеф». Такой извещатель использует принцип создания объемной зоны обнаружения вокруг чувствительного элемента, состоящего из двух изолированных проводов, проходящих параллельно друг другу на расстоянии 40—50 см и образующих систему, повторяющую рельеф блокируемого рубежа охраны (рис. 4).

Эти провода образуют так называемую «открытую антенну», к одному концу которой подключается передатчик — генератор УКВ-энергии, а к другому — приемник. Вокруг проводов, закрепленных на изолирующих кронштейнах, создается электромагнитное поле, формирующее зону обнаружения.

В качестве зондирующего сигнала в линейную (проводную) часть от передатчика подаются радиоимпульсы, при прохождении которых по проводам устанавливаются две волны: бегущая и стоячая. Нарушитель, пересекая зону контроля, оказывает воздействие на амплитуду и фазу стоячей волны, что регистрируется приемником и формирует сигнал обнаружения.

Первый извещатель создает охраняемую зону без необходимости иметь в ней какие-либо дополнительные устройства, ограждения и провода на поверхности периметра. Однако он требует отсутствия в

контролируемой зоне перепадов рельефа местности и посторонних предметов — деревьев, кустов и т. д.

Второй извещатель требует установки в охраняемой зоне стоек или кронштейнов с натянутыми проводами, однако его работа практически не зависит от рельефа местности.

Приведенные примеры наглядно показывают, как использование радиотехнических средств с различными принципами построения позволяет решать разные задачи по охране периметров объектов в зависимости от конкретных требований.

Аналогично можно провести соответствующий анализ для всех подсистем РТСО периметра объекта.

\*\*\*

Таким образом, рассмотренная обобщенная структурная схема концептуально определяет принципы построения систем охраны периметров крупных объектов. Она позволяет выполнять функциональную оптимизацию при проектировании охранных систем с учетом конкретных требований и особенностей объектов, для которых создаются эти системы. Для этого решается задача анализа особенностей построения подсистем с учетом существующего на сегодняшний день научно-технического потенциала в разработке элементов их структур и в зависимости от специфики охраняемых объектов.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Виноградов Г. М., Колесник К. В. Контроль периметра больших и малых объектов и другие возможности электромагнитного забора // Бизнес и безопасность.— 2006.— № 5.— С. 96.

2. Виноградов Г. М., Колесник К. В., Смаглюк В. В. Системы охранной сигнализации на основе электромагнитного потока СВЧ-сигнала и фазообразующих средств // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА).— 2006.— № 1.— С. 13—14.

К. ф.-м. н. М. Ю. ДВОЕШЕРСТОВ, к. ф.-м. н. В. И. ЧЕРЕДНИК

Россия, г. Нижний Новгород, НПО «ЭРКОН»,  
ННГУ им. Н. И. Лобачевского  
E-mail: Dvoesh1@mail.ruДата поступления в редакцию  
05.05.2008 г.Оппонент к. т. н. Ю. Э. ПАЭРАНД  
(ДонГТУ, г. Алчевск)

## ПАРАМЕТРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПЬЕЗОКРИСТАЛЛАХ ПРИ ВЫСОКИХ ЗНАЧЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ

*Приведены формулы для расчета температурных зависимостей основных характеристик распространения ПАВ в некоторых кристаллах, применяемых при проектировании акустоэлектронных устройств.*

При проектировании акустоэлектронных устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ), работающих при высокой температуре ( $t > 100^\circ\text{C}$ ), необходимо изучить основные параметры ПАВ, распространяющихся в пьезокристаллах в таких условиях. К основным параметрам ПАВ относятся скорость ( $V$ ), коэффициент электромеханической связи ( $K^2$ ), угол потока энергии ( $rfa$ ), параметр анизотропии ( $\gamma$ ), температурный коэффициент задержки ( $tcd$ ).

В качестве звукопровода для поверхностных акустических волн используется целый ряд пьезоэлектрических монокристаллов [1, 2]. Как известно [3], широко применяемые ниобат лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) и танталат лития ( $\text{LiTaO}_3$ ) могут быть использованы до температуры  $300^\circ\text{C}$ , пьезокварц ( $\alpha$ -quartz) — до  $573^\circ\text{C}$ , ортофосфат галлия ( $\text{GaPO}_4$ ) — до  $933^\circ\text{C}$ , лангасит ( $\text{LGS}$ ) — до  $1470^\circ\text{C}$ .

Целью данной работы является изучение свойств ПАВ, распространяющихся в пьезокристаллических структурах при температурах более  $100^\circ\text{C}$ .

При проектировании устройств на ПАВ в общем случае существует задача расчета параметров и поиска оптимальных ориентаций ПАВ в пьезокристаллических материалах. Обычно в пьезокристаллическом материале оптимальными направлениями для ПАВ считаются те, в которых температурный коэффициент задержки  $tcd$  и угол потока энергии  $rfa$  ПАВ были бы минимальны, коэффициент электромеханической связи  $K^2$  — максимальен, параметр анизотропии  $\gamma \approx -1$ . В широко применяемых в акустоэлектронике пьезокристаллах оптимальные ориентации и параметры ПАВ при комнатной температуре ( $20$ — $25^\circ\text{C}$ ), в основном, известны. Например, для пьезокварца оптимальными ориентациями считаются  $ST$ - $X$ -срез ( $0^\circ; 132,75^\circ; 0^\circ$ ) и  $ST$ - $X+25$ -срез ( $0^\circ; 132,75^\circ; 25^\circ$ ), для ниобата лития —  $YZ$ -срез ( $0^\circ; 90^\circ; 90^\circ$ ) и  $128$ - $YX$ -срез ( $0^\circ; 38^\circ; 0^\circ$ ), для танталата лития —  $112$ - $X$ -срез ( $90^\circ; 90^\circ; 112^\circ$ ), для лангасита — ( $0^\circ; 140^\circ; 26^\circ$ ), для ортофосфата

галлия — ( $0^\circ; 110^\circ; 0^\circ$ ) и т. д. [4—6]. При температуре выше  $100^\circ\text{C}$  основные параметры ПАВ будут изменяться. Кроме этого, возникает задача поиска оптимальных ориентаций для ПАВ, распространяющихся в пьезокристаллах при высокой температуре.

Для расчета параметров ПАВ, распространяющихся в пьезокристаллах, в широком диапазоне температуры необходимо решить уравнения пьезоакустики [2, с. 15] с учетом того, что каждый пьезокристалл характеризуется своими материальными константами. Упругие константы описываются тензором 4-го ранга, который в сокращенной матричной нотации дает  $6 \times 6$  матрицу  $C_{ij}$  ( $i=1$ — $6$ ,  $j=1$ — $6$ ), пьезоэлектрические константы описываются тензором 3-го ранга, дающего матрицу  $3 \times 6$   $e_{ij}$  ( $i=1$ — $3$ ,  $j=1$ — $6$ ), диэлектрические константы — тензором 2-го ранга  $\epsilon_{ij}$  ( $i=1$ — $3$ ,  $j=1$ — $3$ ). Зависимость всех компонент материальных констант пьезокристалла от температуры можно записать в следующем виде [1]:

$$\begin{aligned} C_{ij}(t) &= C_{ij}(t_0)(1+TC_{ij}^{(1)}(t-t_0)+TC_{ij}^{(2)}(t-t_0)^2+\dots \\ &\dots+TC_{ij}^{(n)}(t-t_0)^n); \\ e_{ij}(t) &= e_{ij}(t_0)(1+Te_{ij}^{(1)}(t-t_0)+Te_{ij}^{(2)}(t-t_0)^2+\dots \\ &\dots+Te_{ij}^{(n)}(t-t_0)^n); \\ \epsilon_{ij}(t) &= \epsilon_{ij}(t_0)(1+T\epsilon_{ij}^{(1)}(t-t_0)+T\epsilon_{ij}^{(2)}(t-t_0)^2+\dots \\ &\dots+T\epsilon_{ij}^{(n)}(t-t_0)^n); \\ p(t) &= p(t_0)(1+T\rho^{(1)}(t-t_0)+T\rho^{(2)}(t-t_0)^2+\dots+T\rho^{(n)}(t-t_0)^n). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $TC_{ij}^{(n)}$ ,  $Te_{ij}^{(n)}$ ,  $T\epsilon_{ij}^{(n)}$ ,  $T\rho^{(n)}$  — температурный коэффициент константы упругости, пьезоконстанта, диэлектрическая константа, плотность кристалла соответственно  $n$ -го порядка,  $t_0$  — комнатная температура.

Решая уравнения пьезоакустики методом Фарнелла-Джонса [2, с. 15] с учетом (1), можно рассчитать основные параметры ПАВ для рабочей температуры.

В частности, зная зависимость скорости  $V$  от температуры  $t$ , можно определить температурные характеристики ПАВ. Температурный коэффициент задержки 1-го порядка  $tcd^{(1)}$  (обозначим его  $\alpha_t$ ) можно определить следующим образом. Продифференцируем время задержки ПАВ  $\tau = l/V$  ( $l$  — длина пути распространения волны) по температуре:

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{V} \frac{dl}{dt} - \frac{l}{V^2} \frac{dV}{dt} = \frac{l}{V} \left( \frac{1}{l} \frac{dl}{dt} - \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \right) = \tau(\alpha_l - \alpha_v).$$

Тогда

$$tcd^{(1)} = \alpha_\tau = \frac{1}{\tau} \frac{d\tau}{dt} = \alpha_l - \alpha_v, \quad (2)$$

где  $\alpha_l = \frac{1}{l} \frac{dl}{dt}$  — коэффициент линейного расширения кристалла вдоль направления распространения волн;  $\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt}$  — температурный коэффициент скорости ПАВ.

Для расчета температурного коэффициента задержки 2-го порядка  $tcd^{(2)}$  можно воспользоваться следующим выражением [1]:

$$tcd^{(2)} = \frac{1}{2} \frac{1}{\tau(t_0)} \frac{d^2\tau}{dt^2}, \quad (3)$$

где  $\tau, \tau(t_0)$  — время задержки ПАВ при температурах  $t$  и  $t_0$ , соответственно.

С другой стороны,  $\tau = nT = n/f$  ( $T$  — период волны,  $n$  — количество периодов) и

$$\frac{d\tau}{dt} = -\frac{n}{f^2} \frac{df}{dt}.$$

Тогда из (2) получим:

$$\alpha_\tau = \frac{f}{n} \frac{d\tau}{dt} = -\frac{1}{f} \frac{df}{dt} = -\alpha_f, \quad (4)$$

где  $\alpha_f$  — температурный коэффициент частоты.

Далее приведем некоторые математические соотношения для того, чтобы получить удобное выражение для вычисления  $tcd^{(2)}$ .

Продифференцируем время задержки волны по температуре еще раз:

$$\frac{d^2\tau}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{V} \frac{dl}{dt} - \frac{l}{V^2} \frac{dV}{dt} \right) = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{V} \frac{dl}{dt} \right) - \frac{d}{dt} \left( \frac{l}{V^2} \frac{dV}{dt} \right),$$

проведем некоторые преобразования:

$$\frac{d^2\tau}{dt^2} = \frac{l}{V} \left[ \frac{1}{l} \frac{d^2l}{dt^2} - \frac{1}{V} \frac{d^2V}{dt^2} + \frac{2}{V^2} \left( \frac{dV}{dt} \right)^2 - \frac{2}{lV} \frac{dV}{dt} \frac{dl}{dt} \right];$$

$$\frac{1}{2} \frac{1}{\tau} \frac{d^2\tau}{dt^2} = \frac{1}{2} \frac{1}{l} \frac{d^2l}{dt^2} - \frac{1}{2} \frac{1}{V} \frac{d^2V}{dt^2} + \frac{1}{V^2} \left( \frac{dV}{dt} \right)^2 - \frac{1}{lV} \frac{dV}{dt} \frac{dl}{dt},$$

откуда получим

$$tcd^{(2)} = \alpha_\tau^{(2)} = \alpha_l^{(2)} - \alpha_v^{(2)} + \alpha_v^2 - \alpha_l \alpha_v = \alpha_l^{(2)} - \alpha_v^{(2)} - \alpha_\tau \alpha_v. \quad (5)$$

Другой вариант формулы для вычисления температурного коэффициента задержки второго порядка можно получить, дифференцируя (2):

$$\frac{d\alpha_\tau}{dt} = -\frac{1}{\tau^2} \frac{d\tau}{dt} \frac{dt}{dt} + \frac{1}{\tau} \frac{d^2\tau}{dt^2}.$$

Отсюда

$$\frac{1}{\tau} \frac{d^2\tau}{dt^2} = \frac{d\alpha_\tau}{dt} + \alpha_\tau^2,$$

и тогда

$$\alpha_\tau^{(2)} = \frac{1}{2} \frac{1}{\tau} \frac{d^2\tau}{dt^2} = \frac{1}{2} \left( \frac{d\alpha_\tau}{dt} + \alpha_\tau^2 \right). \quad (6)$$

Вычислив производную  $\frac{d\alpha_\tau}{dt}$  с учетом того, что

в соответствии с (2)  $\alpha_\tau = \alpha_l - \alpha_v$ , можно убедиться, что выражения (5) и (6) эквивалентны. (Вторым слагаемым в скобках в (6) обычно пренебрегают, т. к. оно мало по сравнению с первым.)

Используя приведенные формулы, проведем численный анализ характеристик ПАВ в широком интервале температуры.

На рис. 1 показаны расчетные зависимости скорости ПАВ от температуры для различных пьезокристаллов при их оптимальной ориентации (см. выше). Материальные константы для этих кристаллов взяты из работ [4—6]. Из рис. 1 видно, что с ростом температуры фазовая скорость волны, распространяющейся в кристаллах ниобата лития, кварца и лангасита, снижается, а в кристаллах ортофосфата галлия и танталата лития остается практически постоянной.

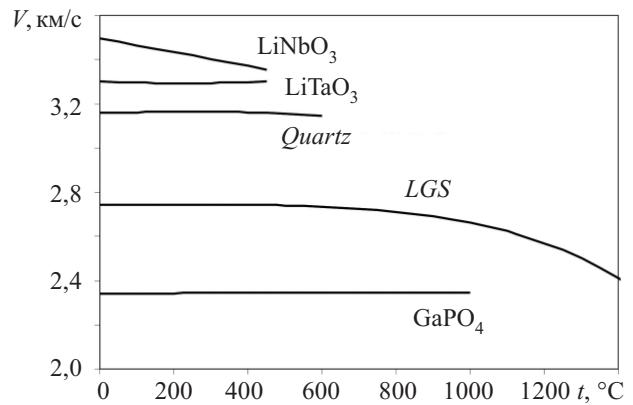


Рис. 1. Зависимости фазовой скорости ПАВ вдоль открытой поверхности от температуры для различных материалов при их оптимальной ориентации

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента электромеханической связи ПАВ от температуры для тех же пьезокристаллов. Здесь видно, что с ростом температуры коэффициент электромеханической связи в кристаллах ниобата лития и танталата лития достаточно сильно снижается, в кварце и ортофосфате галлия остается практически неизменным, а в лангасите увеличивается при  $t > 600^\circ\text{C}$ .

Наиболее интересными для высокотемпературного применения являются пьезокристаллы лангасита и ортофосфата галлия [3].

Из рис. 1 и 2 видно, что с ростом температуры до  $1400^\circ\text{C}$  значение  $K^2$  для LGS увеличивается до 2,2%, а скорость от 2,743 км/с при комнатной температуре

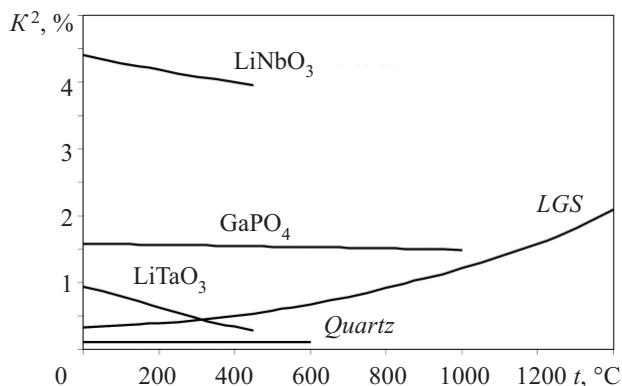


Рис. 2. Зависимости коэффициента электромеханической связи от температуры для различных материалов при их оптимальной ориентации

уменьшается до 2,414 км/с. Как показывают расчеты, с ростом температуры угол потока энергии и параметр анизотропии  $LGS$  ухудшаются ( $pfa=16^\circ$ ,  $\gamma=10$  при  $t=1400^\circ\text{C}$ ).

При увеличении температуры до  $1000^\circ\text{C}$  значение  $K^2$  для  $\text{GaPO}_4$  несколько уменьшается (до 1,48%), а скорость остается практически постоянной (2,344 км/с). Как показывают расчеты, с ростом температуры величины  $pfa$  и  $\gamma$  также не изменяются ( $pfa=0^\circ$ ,  $\gamma=0,42$  при  $1000^\circ\text{C}$ ).

Одной из важнейших характеристик ПАВ являются температурные свойства, которые характеризуются температурным коэффициентом задержки 1-го порядка  $tcd$ . Как известно [4],  $ST$ - $X$ -пьезокварц,  $LGS$  ориентации ( $0^\circ; 140^\circ; 26^\circ$ ) и  $\text{GaPO}_4$  ориентации ( $0^\circ; 110^\circ; 0^\circ$ ) термостабильны для ПАВ при комнатной температуре  $t_k=20-25^\circ\text{C}$ . В ниобате лития и танталате лития вообще не существует термостабильных срезов для ПАВ.

На рис. 3 показаны результаты расчета  $tcd$  ПАВ, распространяющихся в рассмотренных выше кристаллах. Здесь видно, что при значениях температуры выше  $300^\circ\text{C}$  величина  $tcd$  ПАВ в пьезокварце и лангасите резко увеличивается, т. е. данные кристаллы не термостабильны при высоких температурах. В ниобате лития величина  $tcd$  с ростом  $t$  также остается высокой.

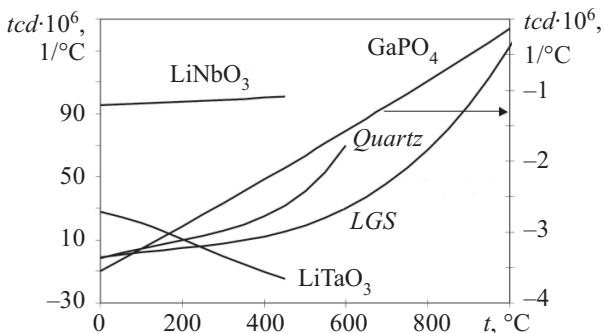


Рис. 3. Зависимости температурного коэффициента задержки от температуры для различных материалов при их оптимальной ориентации

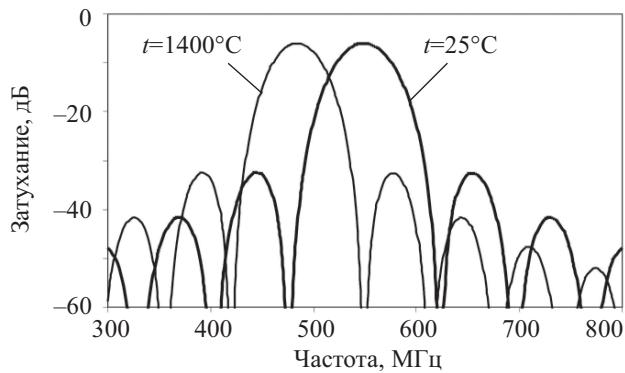


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика линии задержки на лангасите

Танталат лития, с точки зрения термостабильности для ПАВ, занимает промежуточное положение между кварцем и ниобатом лития. Известно, что минимальная величина  $tcd$  для  $112$ - $X$ -среза  $\text{LiTaO}_3$  ( $90^\circ; 90^\circ; 112^\circ$ ) составляет  $28 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ . Из рис. 3 видно, что данный срез становится термостабильным для ПАВ при  $t=300^\circ\text{C}$ .

Ортофосфат галлия  $\text{GaPO}_4$  ориентации ( $0^\circ; 110^\circ; 0^\circ$ ) остается термостабильным для ПАВ во всем исследованном диапазоне температуры — от комнатной до  $1000^\circ\text{C}$ .

На рис. 4 показано влияние температуры на эксплуатационные характеристики линии задержки на ПАВ в лангасите ( $0^\circ; 140^\circ; 26^\circ$ ) для комнатной температуры и для  $t=1400^\circ\text{C}$ . Число алюминиевых электродов каждого из двух идентичных встречечно-штыревых преобразователей — 15, относительная толщина электродов  $h/p=0,01$ , коэффициент металлизации  $w/p=0,5$  ( $p=2,49$  мкм — период,  $w$  — ширина,  $h$  — толщина электродов). Как видно из рисунка, центральная частота линии задержки уменьшается с 548 МГц при  $t=25^\circ\text{C}$  до 483 МГц при  $t=1400^\circ\text{C}$  из-за уменьшения скорости распространения волны с 2,74 до 2,41 км/с (см. рис. 1).

\*\*\*

Приведенные в статье формулы позволяют рассчитывать параметры ПАВ, распространяющихся в пьезокристаллах  $Quartz$ ,  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$ ,  $\text{GaPO}_4$ ,  $LGS$  при температурах выше  $100^\circ\text{C}$ . Предложены материалы и оптимальные ориентации ПАВ в них для создания акустоэлектронных устройств, работающих при высокой температуре.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Двоещерстов М. Ю., Петров С. Г., Чередник В. И., Чириманов А. П. Новые оптимальные ориентации для ПАВ в пьезокристаллах лангасита, ланганита и лангатата // ЖТФ. — 2002. — Том. 72, вып. 8.
- Мэттьюз Г. Фильтры на поверхностных акустических волнах. — М.: Радио и связь, 1981.
- Hornsteiner J., Born E., Riha E. Surface acoustic wave sensor for high-temperature applications // IEEE Inter. Freq. Contr. Symp. — 1998. — P. 615—620.
- Cowperthwaite J., Pereira da Cunha M. Optimal orientation function for SAW devices // Ibid. — 2003. — P. 881—887.
- Kremp P. Quartz homeotypic Gallium-Orthophosphate — a new high tech piezoelectric material // IEEE Ultrason Symp. — 1994. — P. 949—954.
- Visintini G., Ruppel C. Improved material constants for  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{LiTaO}_3$  // Ibid. — 1990. — P. 435.

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, к. т. н. И. И. МАРЬЯМОВА,  
А. П. КУТРАКОВ, к. т. н. И. В. ПАВЛОВСКИЙ

Украина, г. Львов, Национальный университет “Львовская политехника”  
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию  
05.05 2008 г.

Оппонент д. ф.-м. н. И. Е. ПРОЦЕНКО  
(Сумський державний університет, м. Суми)

## ТЕНЗОРЕЗИСТОРЫ ДЛЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

*Исследованы тензометрические характеристики микрокристаллов кремния p-типа. Разработаны тензорезисторы для различных диапазонов низкой температуры, включая температуру жидкого гелия, а также для работы в сильных магнитных полях при 4,2 К.*

Необходимость создания чувствительных миниатюрных тензорезисторов для измерения деформации при низких температурах обусловлена потребностями таких отраслей техники как авиакосмическая, машиностроительная, криоэнергетическая и др. Для измерения деформации при низких температурах (вплоть до температуры жидкого гелия) используются проволочные и фольговые тензорезисторы, изготовленные из различных металлических сплавов. Недостатком этих тензорезисторов является низкий коэффициент тензочувствительности, величина которого при 4,2 К составляет 1,8—2,2 [1]. Использование полупроводниковых материалов, в частности, кремния, для изготовления чувствительных элементов тензорезисторов позволило значительно увеличить их чувствительность [2]. Механизм действия таких тензорезисторов основан на классическом «смиттвском» тензорезистивном эффекте в полупроводниках [3]. Проведенные нами исследования тензорезистивного эффекта в легированных нитевидных кристаллах (НК) кремния p-типа в диапазоне температур 4,2—300 К показали, что при гелиевых температурах в кремнии с концентрацией бора вблизи перехода «металл—диэлектрик» (ПМД) наблюдается гигантский неклассический тензорезистивный эффект [4], вызванный изменением механизма переноса носителей тока при криогенных температурах. Это открывает возможности создания кремниевых тензорезисторов с высокой чувствительностью при низких температурах.

Нами разработаны полупроводниковые тензорезисторы, чувствительными элементами которых являются НК Si p-типа с ориентацией <111>, поскольку они обладают уникальной механической прочностью и, благодаря своей морфологии, позволяют реализовать максимальный для данного материала тензорезистивный эффект [5]. Эти тензорезисторы нашли применение во многих областях науки и техники как для измерения прочностных характеристик различ-

ных изделий и конструкций, так и для создания на их основе датчиков механических величин (давления, ускорения и др.) [6].

Для создания кремниевых тензорезисторов, работоспособных при низких температурах, проводились исследования тензометрических характеристик НК Si p-типа, легированных бором, с различным удельным сопротивлением в широком диапазоне температур — от комнатной до температуры жидкого гелия.

Исследовались три группы кристаллов с разной степенью легирования:

1) сильнолегированные НК Si p-типа с удельным сопротивлением  $\rho_{300K}=5\cdot10^{-5}$  Ом·м с металлическим типом проводимости;

2) НК Si p-типа с  $\rho_{300K}=1\cdot10^{-4}$  Ом·м и концентрацией бора, соответствующей близости к переходу «металл—диэлектрик» с металлической стороны перехода;

3) НК Si p-типа с  $\rho_{300K}=1,3\cdot10^{-4}$  Ом·м и концентрацией бора вблизи ПМД с диэлектрической стороны.

Однако на характеристики кристаллов кремния, закрепленных на материалах с разным коэффициентом термического расширения (КТР), влияют так называемые термические деформации, обусловленные различием КТР кремния и исследуемого материала [4, 7]. Особенно сильно это влияние проявляется при низких температурах. Поэтому исследования тензометрических характеристик НК кремния для создания тензорезисторов на их основе проводились на двух группах материалов:

1) материалы с КТР, близким к КТР кремния, в частности, инварные сплавы;

2) материалы с КТР, который сильно отличается от КТР кремния, в частности, сталь.

### Методика эксперимента

Исследование тензометрических характеристик НК кремния в диапазоне температур 4,2—300 К проводилось в гелиевом криостате с помощью специально разработанного устройства с упругим элементом в виде консольной балки, на которой крепились кристаллы, приклеенные лаком ВЛ-931 (с температурой полимеризации 180°C). Консольные балки, изготовленные из разных материалов (инвара или стали), с помощью специального механизма деформировались ступенчато в диапазоне деформаций сжатия-растяжения до  $\pm 1,25\cdot10^{-3}$  отн. ед. Во время измерений элект-

ропитание кристаллов осуществлялось от источника постоянного тока Keithley 224. Электрическое напряжение на образцах и выходный сигнал сенсора температуры измерялись цифровыми вольтметрами типа Keithley 2000 с одновременной автоматической записью показаний приборов на компьютер.

Экспериментально определялись зависимости сопротивления НК Si от деформации балки  $\epsilon_0$  при фиксированных температурах: 300, 77 и 4,2 К. Полученные затем зависимости относительного изменения сопротивления кристаллов от  $\epsilon_0$   $\Delta R(\epsilon_0)/R_0 = f(\epsilon_0)$  определяют тензометрические характеристики кристаллов при этих температурах. Значения коэффициента тензочувствительности при фиксированной температуре можно рассчитать по формуле

$$K = \frac{\Delta R(\epsilon_0)/R_0}{\epsilon_0}, \quad (1)$$

где  $R_0$  — сопротивление кристалла на недеформированной балке;  $\Delta R(\epsilon_0)$  — изменение сопротивления кристалла в результате деформации балки.

#### Тензометрические характеристики НК кремния на упругих элементах из инвара

На рис. 1, а приведены полученные экспериментально тензометрические характеристики для первой группы кристаллов, закрепленных на инварной балке, при указанных температурах. Как видно из графиков, эти кристаллы характеризуются наличием классического тензорезистивного эффекта (сопротивление кристаллов увеличивается при деформации растяжения и уменьшается при деформации сжатия) во всем исследуемом интервале температур. Величина коэффициента тензочувствительности этих кристаллов, рассчитанная по формуле (1), при разных

температурах составляет соответственно  $K_{300K} \approx 96$ ,  $K_{77K} \approx 224$  и  $K_{4,2K} \approx 283$  при деформации растяжения балки  $\epsilon = 1,08 \cdot 10^{-3}$ . Такие НК Si можно использовать в качестве чувствительных элементов тензорезисторов, работоспособных в широком диапазоне температур — от комнатной до температуры жидкого гелия.

Тензометрические характеристики НК Si с концентрацией бора вблизи ПМД с металлической стороны перехода приведены на рис. 1, б. Как видно, при комнатной температуре и температуре жидкого азота их тензометрические характеристики имеют вид, типичный для классического тензорезистивного эффекта в кремнии. Величина коэффициента тензочувствительности таких кристаллов составляет  $K_{300K} \approx 93$  и  $K_{77K} \approx 261$  при деформации растяжения балки  $\epsilon = 1,08 \cdot 10^{-3}$ . При температуре жидкого гелия тензометрические характеристики этих кристаллов имеют необычный вид в результате проявления неклассического тензорезистивного эффекта: сопротивление кристаллов сильно возрастает под действием деформации и не зависит от ее знака; при этом коэффициент тензочувствительности увеличивается и достигает значения  $K_{4,2K} \approx 606$  при деформации растяжения балки  $\epsilon = 1,08 \cdot 10^{-3}$ . Созданные на основе таких кристаллов тензорезисторы могут использоваться для измерения деформации при криогенных температурах вплоть до температуры жидкого гелия [8].

НК Si с концентрацией бора вблизи ПМД с диэлектрической стороны перехода (рис. 1, в), характеризуются чрезвычайно высокой тензочувствительностью при температуре жидкого гелия, что обусловлено неклассическим тензорезистивным эффектом в этих кристаллах:  $K_{4,2K} = 4,9 \cdot 10^3$  при деформации рас-

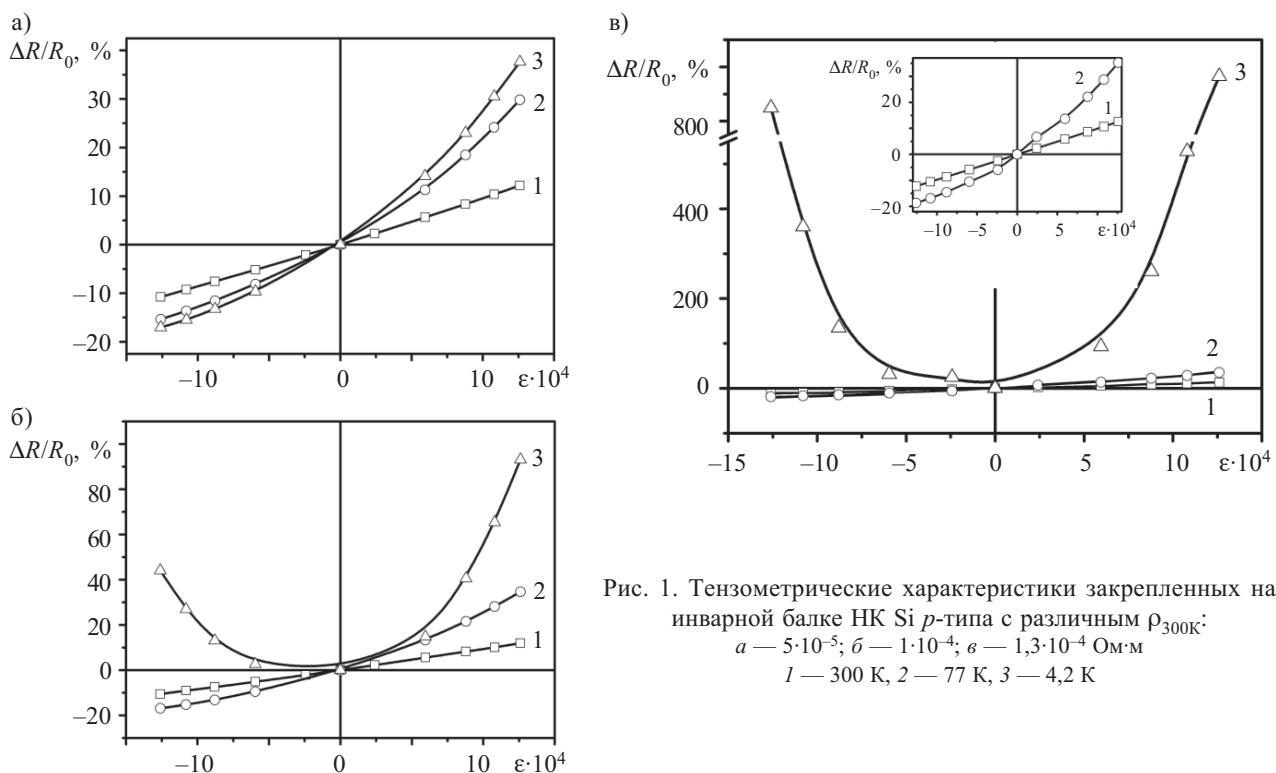


Рис. 1. Тензометрические характеристики закрепленных на инварной балке НК Si *p*-типа с различным  $\rho_{300K}$ :  
а —  $5 \cdot 10^{-5}$ ; б —  $1 \cdot 10^{-4}$ ; в —  $1.3 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{м}$   
1 — 300 К, 2 — 77 К, 3 — 4,2 К

тяжения балки  $\varepsilon = 1,08 \cdot 10^{-3}$  и  $K_{4,2K} = 3,3 \cdot 10^3$  при деформации сжатия  $\varepsilon = -1,08 \cdot 10^{-3}$ , что на два порядка выше коэффициента тензочувствительности обычных кремниевых тензорезисторов при такой температуре. Это открывает возможности использования таких кристаллов как чувствительных элементов тензорезисторов для измерения очень малых деформаций при гелиевых температурах. Однако это не исключает возможности использования этих кристаллов в тензорезисторах для работы при температуре жидкого азота, для них  $K_{77K} = 266$  и  $K_{300K} = 99$  при уровне деформации  $\varepsilon = 1,08 \cdot 10^{-3}$ .

#### Тензометрические характеристики НК кремния на упругих элементах из стали

Следует отметить, что если КТР материала балки (сталь в нашем случае) больше КТР кремния, то на НК Si, закрепленный на балке, действует термическая деформация сжатия, значение которой возрастает при низких температурах. Рассчитанные из экспериментальных данных значения термической деформации для микрокристаллов Si, закрепленных на стальной балке, составляют:  $\varepsilon_t = -(4,5-5) \cdot 10^{-4}$  при 300 К,  $\varepsilon_t = -1,85 \cdot 10^{-3}$  при 77 К и  $\varepsilon_t = -2,3 \cdot 10^{-3}$  при 4,2 К. При сравнении значения термической деформации  $\varepsilon_t$ , которую испытывают при низких температурах кристаллы *p*-Si, закрепленные на стальной балке, с величиной деформации самой балки, которая достигает величины  $\varepsilon = \pm 1,25 \cdot 10^{-3}$ , становится понятным, почему термическая деформация сильно влияет на тен-

зометрические характеристики этих кристаллов при криогенных температурах.

На рис. 2, *a* приведены тензометрические характеристики сильнолегированных НК кремния на стальной балке при разных температурах. Влияние термической деформации наиболее сильно проявляется при криогенных температурах в интервале 4,2—77 К, поэтому тензометрические характеристики этих кристаллов при 77 К и 4,2 К при деформации сжатия балки имеют значительную нелинейность (кривые 2, 3 на рис. 2, *a*). Такие НК *Si p*-типа, на наш взгляд, нецелесообразно использовать для тензорезисторов, предназначенных для измерения при криогенных температурах деформации конструкций и изделий, изготовленных из материалов, КТР которых значительно больше КТР кремния (например, стали).

Совсем другой вид имеют тензометрические характеристики НК *Si p*-типа с концентрацией бора вблизи ПМД при низких температурах, когда проявляется действие неклассического тензорезистивного эффекта в этих кристаллах. На рис. 2, *b* показаны тензометрические характеристики НК *Si p*-типа с  $\rho_{300K} = 1 \cdot 10^{-4}$  Ом·м (вблизи ПМД с металлической стороны перехода) на стальной балке. Поскольку при гелиевых температурах эти НК находятся под действием деформации сжатия даже при деформации растяжения балки за счет действия термической деформации со стороны стальной балки, кривая 3 на рис. 2, *b* соответствует характеру изменения сопротивления НК *Si* под действием деформации сжатия для случая не-

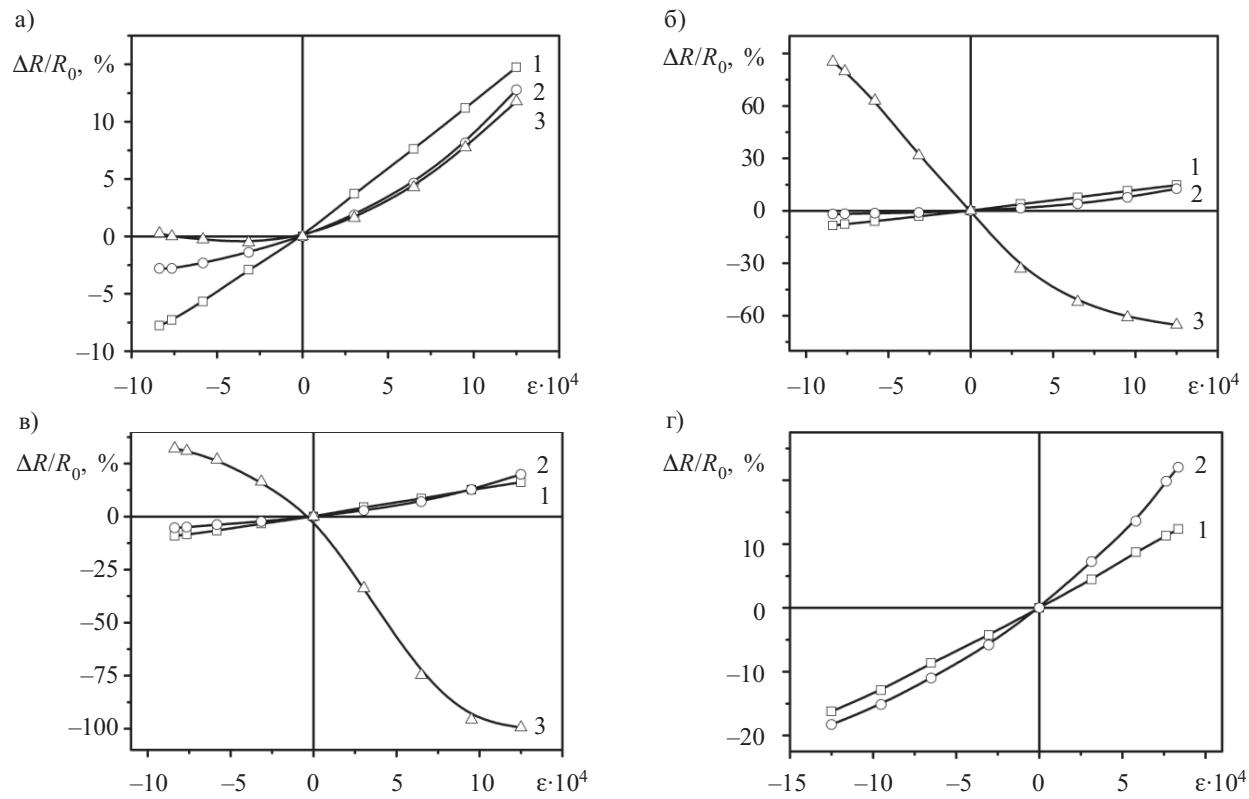


Рис. 2. Тензометрические характеристики закрепленных на стальной балке НК *Si p*-типа с различным  $\rho_{300K}$ :  
*a* —  $5 \cdot 10^{-5}$ ; *b* —  $1 \cdot 10^{-4}$ ; *c* —  $1,3 \cdot 10^{-4}$ ; *d* —  $2,5 \cdot 10^{-4}$  Ом·м  
1 — 300 К; 2 — 77 К; 3 — 4,2 К

классического тензорезистивного эффекта. При этом величина коэффициента тензочувствительности составляет:  $K_{4,2K} = -1020$  при  $\epsilon = -8,4 \cdot 10^{-4}$  и  $K_{4,2K} = -640$  при  $\epsilon = 9,5 \cdot 10^{-4}$ , тогда как  $K_{77K} = 81$  и  $K_{300K} = 120$  при  $\epsilon = 9,5 \cdot 10^{-4}$ . Такие НК Si *p*-типа с  $\rho_{300K} = 1 \cdot 10^{-4}$  Ом·м можно рекомендовать как чувствительные элементы тензорезисторов для измерения деформаций стальных конструкций при гелиевых температурах.

Аналогичный характер имеют тензометрические характеристики НК Si *p*-типа вблизи ПМД с диэлектрической стороны перехода, закрепленных на стальной балке (рис. 2, *в*). Они имеют коэффициент тензочувствительности  $K_{4,2K} = -1000$  и  $K_{77K} = 133$  при деформации балки  $\epsilon = 9,5 \cdot 10^{-4}$ . При 4,2 К эти кристаллы имеют асимметричные тензометрические характеристики при растяжении и сжатии, а по величине коэффициента тензочувствительности сравнимы с НК *p*-Si с  $\rho_{300K} = 1 \cdot 10^{-4}$  Ом·м. Однако для измерения деформации стальных конструкций и изделий при гелиевых температурах предпочтительнее использовать тензорезисторы на основе НК *p*-Si с  $\rho_{300K} = 1 \cdot 10^{-4}$  Ом·м, которые характеризуются высоким значением  $K_{4,2K}$  и симметричными (по отношению к деформации) тензометрическими характеристиками.

НК Si с концентрацией бора, которая отвечает диэлектрической области, удаленной от ПМД ( $\rho_{300K} = 2,5 \cdot 10^{-4}$  Ом·м), при температуре жидкого азота имеют тензометрические характеристики, типичные для классического тензорезистивного эффекта (кривая 2 на рис. 2, *г*). Их коэффициент тензочувствительности равен  $K_{77K} = 263$ , а  $K_{300K} = 147,5$  при  $\epsilon = 8,4 \cdot 10^{-4}$ . При 4,2 К такие кристаллы после закрепления на стальной балке под действием большой термической деформации  $\epsilon_t$  в результате неклассического тензорезистивного эффекта очень сильно изменяют свое сопротивление, значение которого достигает 10—30 МОм. Поэтому их нецелесообразно использовать для тензорезисторов, предназначенных для работы при гелиевых температурах, в то же время они могут успешно применяться для измерения деформации стальных конструкций при температуре жидкого азота.

#### Тензорезисторы для криогенных температур и сильных магнитных полей

Для разработки тензорезисторов, работоспособных при криогенных температурах в сильных магнитных полях, исследовалось влияние магнитного поля на сопротивление НК Si *p*-типа с разной концентрацией бора с целью выбора кристаллов, параметры которых наиболее стабильны при воздействии магнитного поля. Проводились измерения магнитосопротивления недеформированных и одноосно деформированных кристаллов при температуре жидкого гелия. Результаты измерений приведены на рис. 3. Как видно, минимальное изменение сопротивления в сильных магнитных полях имеют сильнолегированные НК Si *p*-типа с  $\rho_{300K} = 5 \cdot 10^{-5}$  Ом·м, для которых относительное изменение сопротивления недеформированных кристаллов ( $\epsilon = 0$ ) под воздействием магнитного поля с индукцией  $B = 6$  Тл не превышает 1,8% (кривая 1 на рис. 3). В то же время для НК Si *p*-типа с

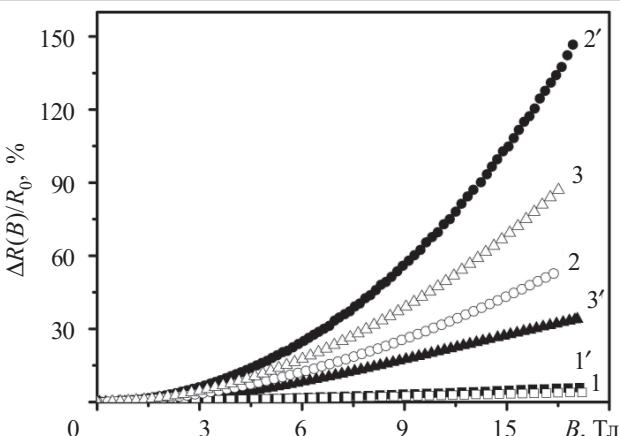


Рис. 3. Магнитосопротивление при 4,2 К недеформированных (1—3) и деформированных (1'—3')  $\epsilon = -3,8 \cdot 10^{-3}$  НК Si *p*-типа с различным  $\rho_{300K}$ :

1, 1' —  $5 \cdot 10^{-4}$  Ом·м; 2, 2' —  $1 \cdot 10^{-4}$  Ом·м; 3, 3' —  $1,3 \cdot 10^{-4}$  Ом·м

$\rho_{300K} = (1-1,3) \cdot 10^{-4}$  Ом·м изменение сопротивления составляет десятки процентов (кривые 2 и 3 на рис. 3). Действие одноосной деформации на сильнолегированные НК *p*-Si не приводит к существенному изменению их сопротивления (кривая 1' на рис. 3), тогда как для кристаллов с концентрацией бора вблизи ПМД изменение сопротивления в магнитном поле составляет десятки процентов (кривые 2', 3' на рис. 3).

Поэтому сильнолегированные НК *p*-Si могут использоваться как чувствительные элементы тензорезисторов для работы при температуре жидкого гелия в сильных магнитных полях [9]. Характеристика такого тензорезистора иллюстрируется кривой 3 на рис. 1, *а*. Коэффициент тензочувствительности таких тензорезисторов  $K_{4,2K} = 276$  при деформации растяжения  $\epsilon = +1,26 \cdot 10^{-3}$  и  $K_{4,2K} = 116$  при деформации сжатия  $\epsilon = -1,26 \cdot 10^{-3}$ , что в несколько десятков раз превышает значение коэффициента тензочувствительности проволочных и фольговых тензорезисторов [1], предназначенных для работы в таких же условиях.

\*\*\*

Разработаны низкотемпературные тензорезисторы на основе нитевидных кристаллов кремния *p*-типа, легированных бором. Для измерения деформации в материалах с КТР, близким к КТР кремния, разработаны тензорезисторы для широкого диапазона температур 4,2–300 К; для криогенных температур, включая температуру жидкого гелия; для температуры жидкого гелия.

Для измерения деформации в материалах с КТР, большим КТР кремния (сталь и сплавы), разработаны тензорезисторы для гелиевых температур; для температуры жидкого азота.

Разработаны тензорезисторы, работоспособные при гелиевых температурах в сильных магнитных полях (с индукцией до 6 Тл), на основе сильнолегированных НК *p*-Si.

Таким образом, использование микрокристаллов кремния *p*-типа с концентрацией бора вблизи перехода «металл—диэлектрик», обладающих неклассическим тензорезистивным эффектом при 4,2 К, в каче-

## СЕНСОЭЛЕКТРОНИКА

стве чувствительных элементов тензорезисторов, позволило создать тензорезисторы для гелиевых температур с аномально высоким коэффициентом тензочувствительности.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Клакова Н. П. Тензорезисторы // Датчики и системы.— 2004.— № 3.— С. 10—12.
2. Эрлер В., Вальтер Л. Электрические измерения незелектрических величин полупроводниковыми тензорезисторами.— М.: Мир, 1974.
3. Бир Г. Л., Пикус Г. Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках.— М.: Наука, 1972.
4. Druzhinin A. A., Maryamova I. I., Pavlovsky I. V., Palewski T. Piezoresistive properties of boron-doped silicon whiskers at cryogenic temperatures // Functional Materials.— 2004.— Vol. 11, N. 2.— P. 268—272.
5. Voronin V., Maryamova I., Zaganyach Y. et al. Silicon whiskers for mechanical sensors // Sensors and Actuators.— 1992.— Vol. A30, N. 1—2.— P. 27—33.
6. Дружинин А. А., Марьамова И. И., Лавитская Е. Н. и др. От полупроводниковых тензорезисторов к микроэлектронным датчикам // Датчики и системы.— 2001.— № 6.— С. 2—7.
7. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел.— М.: Наука, 1974.
8. Пат. 5217 України. Чутливий елемент сенсора механічних величин для температури рідкого гелію / А. О. Дружинін, І. Й. Мар'ямова, О. П. Кутраков, І. В. Павловський.— 2005.— Бюл. № 2.
9. Пат. 11353 України. Чутливий елемент сенсора механічних величин для роботи при температурі рідкого гелію в сильних магнітних полях / А. О. Дружинін, І. Й. Мар'ямова, І. В. Павловський.— 2005.— Бюл. № 12.

*K. ф.-м. н. В. Н. КАБАЦІЙ*

Украина, Мукачевский технологический институт  
E-mail: [vm@mti.edu.ua](mailto:vm@mti.edu.ua)

Дата поступления в редакцию  
31.03 2008 г.

Оппонент д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ  
(Донецкий нац. ун-т, г. Донецк)

## ОПТИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ ГАЗОВ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ

*Рассмотрены различные конструкции маломощных полупроводниковых источников ИК-излучения и оптических сенсоров газов на их основе. Показана перспективность использования таких сенсоров в приборах газового анализа нового поколения.*

Методы анализа, базирующиеся на поглощении квантов света молекулами вещества, составляют группу абсорбционных оптических методов, широко используемых на практике. Наиболее распространенным для анализа концентраций  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\Sigma \text{C}_m \text{H}_n$  в составе многокомпонентных газовых смесей является метод ИК-спектроскопии. Наличие узких селективных полос поглощения разной интенсивности в ИК-области спектра, характерных для каждого анализируемого компонента, позволяет выбирать оптимальные условия измерения, а также разработать оптические сенсоры для приборов газового анализа с высокими селективными возможностями. Для разработки и промышленного выпуска современных конкурентоспособных оптических сенсоров газов и приборов газового анализа на их основе необходимы полупроводниковые источники и детекторы ИК-излучения в области спектра 2,5—5,0 мкм, где находятся селективные полосы поглощения газов, выбрасываемых в атмосферу промышленностью и загрязняющих ее.

Актуальность разработки оптических сенсоров на базе полупроводниковых источников ИК-излучения

обусловлена также повышенными требованиями к безопасности проведения работ в угледобывающей, металлургической, химической и пищевой промышленностях, топливно-энергетического комплекса, предприятий транспорта, контроля газовых выбросов в атмосферу. Использование современной элементной базы дает возможность автоматизировать процесс измерения, а также осуществлять непрерывный контроль за загрязнением окружающей среды и промышленными процессами.

Однако круг полупроводниковых материалов, на базе которых могут быть изготовлены активные элементы полупроводниковых источников ИК-излучения, ограничен, а материалы еще недостаточно изучены.

Наиболее приемлемыми для реализации активных элементов полупроводниковых источников излучения в области спектра 2,5—5,0 мкм являются полупроводниковые гетероструктуры на базе твердых растворов  $\text{InGaAs}/\text{InAs}$  и  $\text{InAsSbP}/\text{InAs}$ , имеющих необходимый интервал изменения ширины запрещенной зоны. Благодаря особенностям дефектообразования при эпитаксиальной кристаллизации образуются структурно совершенные слои твердых растворов, позволяющие получить в них  $p-n$ -переходы [1].

Настоящая работа посвящена разработке нового поколения оптических сенсоров газов и газоанализаторов на их основе с использованием маломощных полупроводниковых источников ИК-излучения волн длиной 2,5—5,0 мкм, изготовленных на базе гетероструктур  $\text{InGaAs}/\text{InAs}$  и  $\text{InAsSbP}/\text{InAs}$ .

Выращивание эпитаксиальных гетероструктур  $\text{InGaAs}/\text{InAs}$  и  $\text{InAsSbP}/\text{InAs}$  проводилось методом

жидкофазной эпитаксии в потоке очищенного водорода. Активные элементы для полупроводниковых источников ИК-излучения, спектр излучения которых перекрывает область 2,8—3,6 мкм, были изготовлены на базе эпитаксиальных гетероструктур твердых растворов (ТР)  $In_{1-x}Ga_xAs$  ( $x \leq 0,25$ ). Эпитаксиальные структуры получали в режиме вынужденного охлаждения раствора-расплава в диапазоне температуры 920—970 К на подложках  $InAs$  ориентации  $<111>$ . Скорость охлаждения составляла 0,15—0,6 К/мин. Перед началом процесса эпитаксии расплав, с целью его гомогенизации, выдерживался в течение 40—60 мин при температуре на 5—10 К большей, чем температура начала роста. Для получения  $p-n$ -перехода легирование осуществлялось путем введения в расплав специально изготовленной лигатуры  $In-Mn$ .

Для следующей области спектра (3,8—5,0 мкм) активные элементы для полупроводниковых источников ИК-излучения были изготовлены на базе ТР  $InAs_{1-x-y}Sb_xP_y$  ( $0 \leq x \leq 0,15$ ;  $0 \leq y \leq 0,18$ ). Эпитаксиальные структуры получали в режиме вынужденного охлаждения раствора-расплава в диапазоне температуры 950—990 К. Перегрев на 30—50 К осуществлялся с целью лучшей гомогенизации раствора-расплава. Скорость охлаждения составляла 0,2—0,46 К/мин. Перед эпитаксией расплав выдерживался на протяжении 60—90 мин в атмосфере чистого водорода. За это время расплав надежно очищался и приводился в контакт с подложкой  $InAs$ . Для получения  $p-n$ -перехода проводилось легирование расплава  $Mn$  или  $Zn$ .

Исследования морфологии эпитаксиальных слоев полученных ТР проводились методом металлографического анализа на микроскопе ММР-2Р, а концентрация носителей в слоях и их подвижность измерялись по методу Холла. Эпитаксиальные слои в большинстве случаев имели равномерную зеркальную поверхность. Концентрация остаточной донорной примеси в нелегированных образцах составляла  $(1—2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ; концентрация дырок в легированных марганцем слоях ТР находилась в пределах  $10^{16}—10^{18} \text{ см}^{-3}$ ; подвижность носителей составляла 30—120  $\text{см}^2/\text{Вс}$  при 300 К. В качестве контактов к  $p$ -области структур использовался сплав  $In-Mn$ , контактами к  $n$ -области служили  $In$  или сплав  $In-Sn$ . Добавки металлов-доноров или акцепторов повышали концентрацию носителей в рекристаллизационной области и обеспечивали омичность контактов. Омические контакты к полученным эпитаксиальным структурам создавались двух видов: точечные (диаметром около 150 мкм) и сплошные — со стороны кристалла, через которую не выводится излучение.

Вольт-амперные характеристики  $p-n$ -перехода практически не изменялись с изменением состава ТР, что указывает на рекомбинационно-генерационную модель протекания тока через  $p-n$ -переход в твердых растворах.

Исследование электролюминесцентных (ЭЛ) свойств активных элементов показало, что излучательная рекомбинация в полученных гетероструктурах определяется прямыми переходами — «зона-зон-

ными» в  $n$ -материале и «зона проводимости — акцепторный уровень» в  $p$ -материале. Форма спектров ЭЛ элементов (рис. 1) указывает на высокое структурное совершенство ТР во всем диапазоне составов. Полуширина спектров излучения  $p-n$ -переходов уменьшается с ростом  $x$  (уменьшается длина волны излучения). Модуляция светового потока проводилась сигналом с частотой до  $10^7$  Гц.

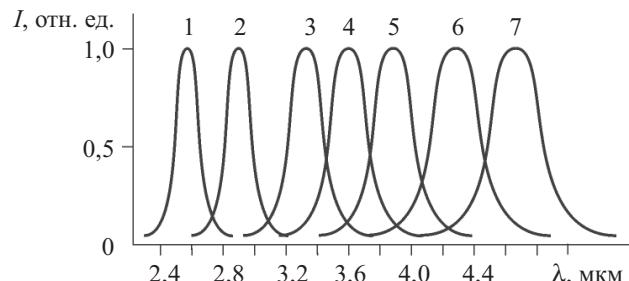


Рис. 1. Зависимость интенсивности излучения  $p-n$ -перехода ЭЛ активных элементов на основе ТР от длины волны излучения при  $T=300$  К:

1—4 —  $In_{1-x}Ga_xAs/InAs$  ( $x \leq 0,25$ ); 5—7 —  $InAs_{1-x-y}Sb_xP_y/InAs$  ( $0 \leq x \leq 0,15$ ;  $0 \leq y \leq 0,18$ )

Комплексные исследования электрофизических и оптических параметров активных элементов полупроводниковых источников ИК-излучения позволили определить оптимальные составы ТР, обеспечивающие излучение активных элементов на длинах волн, представляющих практический интерес (волны длиной 2,7; 3,32; 4,27 и 4,67 мкм соответствуют селективным полосам поглощения паров воды, метана  $CH_4$ , диоксида углерода  $CO_2$ , оксида углерода  $CO$ ) [2].

Для увеличения внешнего квантового выхода излучения, защиты от механических повреждений и от агрессивной среды на активные элементы наносились оптические покрытия с различной структурой поверхности из халькогенидных полупроводниковых стекол (ХПС) систем  $Ge(Pb)-Sb(Bi)-S(Se)$ . Эти стекла имеют смешанную структуру (цепочечные, тетраэдрические и пирамидальные структурные единицы), что определяет их лабильность и реверсивность к перестройке структуры и позволяет решать проблему выбора температуры размягчения и согласования коэффициентов термического расширения активных элементов, корпуса и оптического покрытия. Цилиндрическая часть корпуса полученных полупроводниковых источников ИК-излучения (рис. 2) изготовлена из ХПС, она не менее, чем в 2 раза выше удлиненной полусферической линзы [3].

Величина углубления теплопроводного основания 1 и расстояние между излучающими кристаллами 2 выбраны такими, чтобы получить эффект полного внутреннего отражения излучения, которое падает на границу раздела «халькогенидное стекло — воздух», а также эффективно использовать боковое излучение кристаллов. Уменьшение углов отражения бокового излучения и эффективное использование фронтального излучения происходит в удлиненной полусферической линзе. Цилиндрическая часть корпуса и удлиненная полусферическая линза изго-

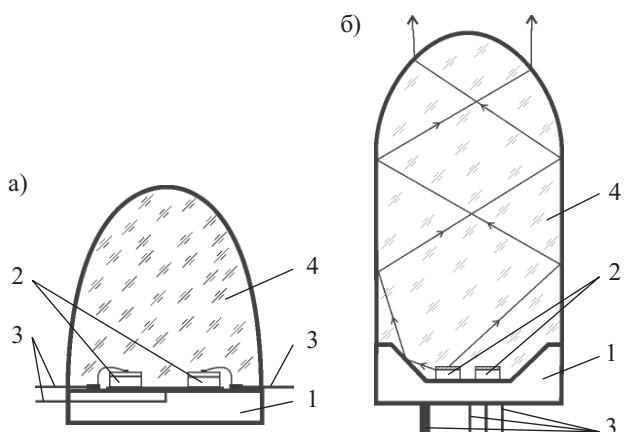


Рис. 2. Конструкция маломощных полупроводниковых источников ИК-излучения в бескорпусном варианте (а) и с цилиндрической частью корпуса из ХПС (б):  
1 — основание; 2 — активные элементы; 3 — токовыводы; 4 — фокусирующее и защитное покрытие из ХПС

твлены в одном технологическом цикле из одного материала так, что не существует границы раздела между ними. Преломляющая излучение боковая поверхность углубления основания, изготовленная в форме усеченного конуса или другого концентрататора излучения, вместе с удлиненной полусферической линзой повышают выход излучения, пригодного для практического использования. Размещение на основании двух и более кристаллов, излучающих волны одной или разной длины, не изменяет их диаграмму направленности, что особенно важно для конструирования целого класса приборов газового анализа. Эффективное использование бокового и фронтального излучения активных элементов полупроводниковых источников ИК-излучения позволило одновременно уменьшить диаграмму направлен-

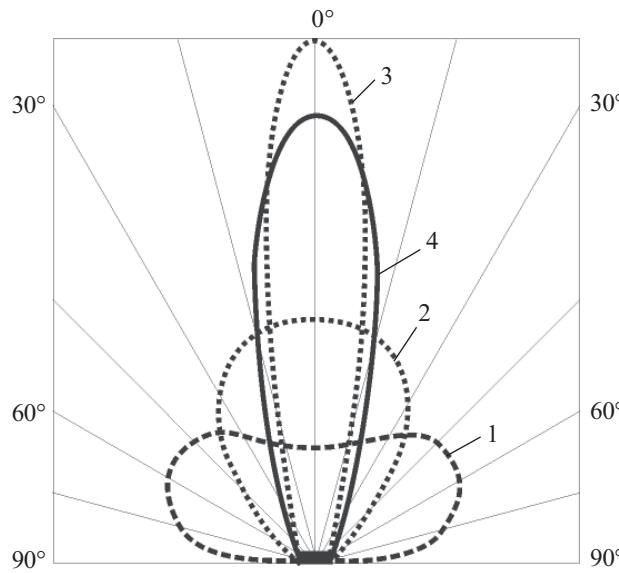


Рис. 3. Диаграмма направленности полупроводниковых источников ИК-излучения:  
1 — без оптического покрытия активных элементов; 2 — с оптическим покрытием в форме полусфера; 3 — помещенных в параболический отражатель диаметром 80 мм; 4 — с цилиндрической частью корпуса из ХПС

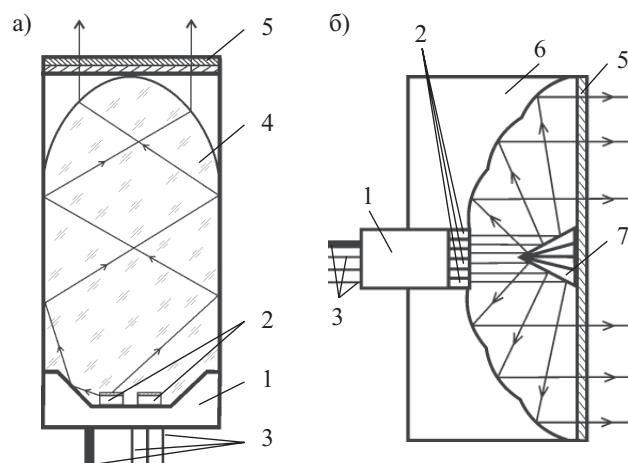


Рис. 4. Конструкция источников ИК-излучения с оптическим фильтром и несколькими кристаллами, излучающими волны разной длины (а), с квазипараболическим отражателем (б):  
1—4 — как на рис. 2; 5 — узкополосный оптический фильтр; 6 — квазипараболический отражатель; 7 — правильная многоугольная зеркальная пирамида

ности со 180 до 40° и увеличить мощность излучения в 2,5—4 раза вдоль оси излучения (рис. 3).

Оригинальная технология нанесения фокусирующих и защитных оптических покрытий на излучающие активные элементы обеспечивает хорошую воспроизводимость геометрии стеклянного купола.

Для расширения области использования маломощных полупроводниковых источников излучения, а также температурного диапазона стабильной работы без применения умеренного охлаждения, нами разработаны различные конструкции источников ИК-излучения с улучшенными техническими характеристиками с использованием двух и более активных элементов на одну или несколько длин волн излучения, а также размещенных в корпусе квазипараболического зеркала (рис. 4).

Такой источник излучения содержит оптический фильтр на рабочую длину волн с узкой полосой пропускания и активный элемент, состоящий из двух и более излучающих кристаллов. Спектры излуче-

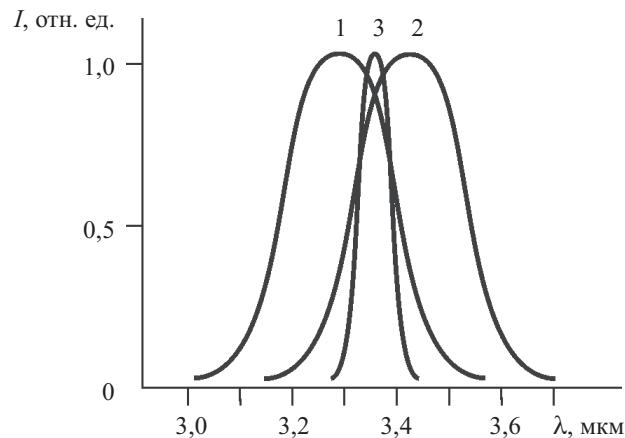


Рис. 5. Спектры излучения кристаллов активного элемента источника излучения (1, 2) и спектральное положение оптического фильтра (3)

## СЕНСОЭЛЕКТРОНИКА

ния кристаллов разнесены по длинам волн относительно рабочей длины волны оптического фильтра для источника излучения на длину волны  $\lambda=3,34$  мкм, (рис. 5). Ширина полосы пропускания оптического фильтра  $\Delta\lambda_p$  выбирается из соотношения

$$\frac{C}{n} \Delta T \leq \Delta\lambda_p,$$

при этом длина волны и ширина спектра излучающих кристаллов при  $T=300$  К удовлетворяют условиям:

$\lambda_k \leq \lambda_p - \frac{k}{2} \Delta\lambda_p$  — для четного количества излучающих кристаллов,

$\lambda_k \leq \lambda_p + \frac{k+1}{2} \Delta\lambda_p$  — для нечетного количества излучающих кристаллов,

где  $C$  — температурный коэффициент смещения спектра излучающих кристаллов;

$n$  — количество кристаллов, излучающих волны разной длины;

$\Delta T$  — интервал изменения температуры окружающей среды;

$\lambda_p$  — рабочая длина волны оптического фильтра;

$\lambda_k$  — длина волны максимального излучения кристаллов;

$k$  — номер излучающего кристалла,

$k = 1, 2, \dots, n$ .

Высокая стабилизация полосы излучения источника при изменении температуры окружающей среды происходит вследствие того, что максимумы в спектрах излучения кристаллов смещены относительно рабочей длины волны оптического фильтра в коротковолновую и длинноволновую области спектра и имеют одинаковый температурный коэффициент смещения запрещенной зоны. Стабилизация мощности излучения на рабочей длине волны тако-

го источника осуществляется путем регулирования прямого электрического тока через  $p-n$ -переход излучающих структур.

При конструировании современных абсорбционных приборов газового анализа необходимо обеспечить высокую чувствительность, точность, временную и температурную стабильность приборов с одновременным уменьшением их габаритов, энергопотребления и веса. Это приводит к необходимости разработки новых конструкций источников ИК-излучения, которые способны формировать несколько независимых потоков излучения, одинаковых по равномерности распределения энергии внутри потока и занимающих разное пространственное положение в разные моменты времени. Для этих целей нами разработан многоканальный источник ИК-излучения с использованием квазипарabolического зеркального отражателя, конструкция которого показана на рис. 4, б.

В корпусе 1 размещено несколько активных элементов 2, излучающих волны одной или разных длин, квазипарabolическое зеркало 6, правильная многоугольная пирамида 7 с зеркальными гранями и оптический фильтр 5. Активные излучающие элементы размещены в квазипарabolическом зеркале так, что их излучение направлено в сторону вершины многоугольной пирамиды, помещенной в его фокусе. Такое размещение элементов позволяет получить несколько одинаковых параллельных световых пучков ИК-излучения. Независимость таких пучков света, занимающих разное пространственное положение в разные моменты времени, обеспечивается использованием двух и более излучающих активных элементов, смещенных относительно оптической оси источника излучения, которые активируются источником питания в разные моменты времени. В начальный момент времени один из излучающих активных

### Электрофизические и оптические параметры полупроводниковых источников ИК-излучения на основе твердых растворов $InGaAs/InAs$ и $InAsSbP/InAs$

Длина волны в максимуме полосы излучения, $\lambda_{\max}$ , мкм	2,5—5,0
Ширина спектра излучения источников на уровне $0,5I$ , $\Delta\lambda_{0,5}$ , мкм	0,25—0,60
Квантовая эффективность $p-n$ -перехода ТР, %	0,05—0,10
Температурный коэффициент смещения $\lambda_{\max}$ , мкм/К:	
для структур $InGaAs/InAs$ ( $\lambda_{\max}=2,5—3,9$ мкм)	
при $T < 273$ К $\lambda_{\max}$ сдвигается в коротковолновую область	$(2,8—3,1) \times 10^{-3}$
при $T > 273$ К $\lambda_{\max}$ сдвигается в длинноволновую область	$(2,0—2,5) \times 10^{-3}$
для структур $InAsSbP/InAs$ ( $\lambda_{\max}=4,2—5,0$ мкм)	
при $T < 273$ К $\lambda_{\max}$ сдвигается в коротковолновую область	$(3,5—3,9) \times 10^{-3}$
при $T > 273$ К $\lambda_{\max}$ сдвигается в длинноволновую область	$(2,8—3,0) \times 10^{-3}$
Мощность излучения источников, $P$ , мкВт:	
импульсный режим генерации ( $I=1—10$ А, $\tau=100$ мкс)	500—1500
непрерывный режим генерации ( $I=50—150$ мА)	50—100
Температурный коэффициент изменения мощности в диапазоне температуры 213—333 К, %/К	0,3—0,6
Быстродействие, с	$10^{-7}$
Угол излучения, °	$\leq 40$
Гарантийная наработка образцов, тыс. ч.	$\geq 30$

элементов создает световой пучок, направленный на соответствующие грани пирамиды, который, отражаясь от них, попадает на соответствующие сегменты зеркала. Затем процесс повторяется поочередно с каждым излучающим элементом. При этом формируются параллельные световые пучки, имеющие различное пространственное положение. Использование одинаковых активных элементов, излучающих на одной или разных длинах волн, позволяет получить пространственно разделенные одинаковые пучки излучения с равномерным распределением энергии внутри пучка в различные моменты времени.

Все разработанные нами конструкции полупроводниковых источников ИК-излучения механически прочны и сохранили свои параметры после действия на них вибрационных нагрузок в диапазоне частот от 10 до 500 Гц при испытаниях на вибростенде ВЭДС-400А.

Результаты измерения электрофизических и оптических параметров полупроводниковых источников ИК-излучения приведены в **таблице**.

С учетом наличия узких селективных полос поглощения разной интенсивности в средней ИК-области для анализируемых компонентов газовой смеси, конструктивные особенности полупроводниковых источников ИК-излучения, а также требования к современным приборам газового анализа, были разработаны различные конструкции оптических сенсоров (**рис. 6**) и газоанализаторов на их основе, а также оригинальные способы измерения концентрации анализируемых газов в газовой смеси [4—7].

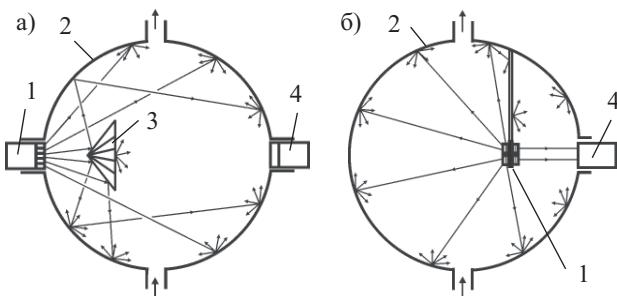


Рис. 6. Конструкция оптических сенсоров в виде полого шара со светоотражающим экраном (а) и без экрана (б): 1 — полупроводниковый источник ИК-излучения; 2 — шар с внутренней диффузно рассеивающей поверхностью; 3 — светоотражающий экран; 4 — фотоприемник

Разработанный нами способ измерения концентрации газов в газовой смеси при увеличении неселективных потерь излучения (запыленность среды, повышенная влага и температура, загрязненность оптических элементов со временем) позволяет измерять концентрацию газов в широком диапазоне температуры с заданной точностью и чувствительностью.

В предложенном способе анализируемый газ проходит через измерительные кюветы разной длины, в которых потоки излучения испытывают одинаковые изменения, не связанные с поглощением газа. Концентрация анализируемого газа в газовой смеси определяется из соотношения:

$$C_x = \frac{1}{\alpha(l_2 - l_1)} \ln \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2},$$

где  $C_x$  — концентрация газа, который анализируется;  $\alpha$  — коэффициент поглощения газа, который анализируется, зависит от степени согласования спектров поглощения газа, спектральной характеристики источника инфракрасного излучения и спектральной чувствительности приемника инфракрасного излучения;  $l_1, l_2$  — длина измерительных кювет;  $\Delta U_1, \Delta U_2$  — изменение напряжения при попадании на фотоприемник потока излучения, который прошел через измерительные кюветы длины  $l_1$  и  $l_2$  соответственно.

В процессе обработки электрических сигналов на выходе приемника инфракрасного излучения эти изменения компенсируются. Использование полупроводниковых источников излучения и электронной модуляции приемника инфракрасного излучения позволяет измерять разности поглощения излучения на выходе измерительных кювет синхронно с поочередной прокачкой через них газовой смеси, что повышает надежность предложенного способа.

В разработанных оптических сенсорах в качестве приемника инфракрасного излучения использовался неселективный полупроводниковый фотодиод. Световой поток модулировали при питании активных элементов переменным током величиной 200 мА и частотой 100 кГц. Такой режим работы активных элементов позволяет увеличить быстродействие сенсора до 0,3—0,5 с. Наличие в полупроводниковом источнике ИК-излучения активного элемента, излучающего на длине волн, не совпадающей с селективными полосами поглощения анализируемого газа или компонентов в газовой смеси ( $\lambda=3,90$  мкм), позволяет использовать его в оптическом сенсоре в качестве источника опорного сигнала.

Измерения концентрации анализируемого газа или компонентов в газовой смеси показали, что минимальную погрешность измерений можно получить при прокачке оптического сенсора воздухом или газом, селективные полосы поглощения которого не совпадают с селективными полосами поглощения анализируемого газа или компонентов в газовой смеси, в объеме, в 10 раз превышающем объем сенсора.

Для измерения концентрации метана  $\text{CH}_4$  ( $\lambda=3,34$  мкм), который имеет относительно малый коэффициент поглощения в данной области, использовался оптический сенсор в форме полого шара диаметром 80 мм (рис. 6). Внутренняя поверхность шара и светоотражающего экрана (рис. 6, а) покрыта сильно деформированной алюминиевой фольгой, создающей диффузное отражение с коэффициентом отражения 0,90—0,92 в диапазоне длин волн 2,5—5,0 мкм. Применение алюминиевой фольги обеспечивает более равномерное освещение и полное использование потока излучения, что увеличивает чувствительность и точность измерений. Размещение активных элементов на общем теплопроводном основании улучшает температурную стабильность работы сенсора. Проведенные измерения концентрации метана в диапазоне 0—5 об. % показали высокую надежность и точность измерений. Отношение

## СЕНСОЭЛЕКТРОНИКА

сигнал/шум составляло 36 и 235 для концентрации соответственно 0,3 и 4,8 об. %. При измерении концентрации газов с относительно большим коэффициентом поглощения, например двуокиси углерода  $\text{CO}_2$  ( $\lambda=4,27$  мкм), за счет малого объема сенсора ( $16\text{ см}^3$ ) скорость прокачки газовой смеси удалось снизить до 0,05 м/ч. При этом время установления значений концентрации газа составляло 30 с, а минимально измеренная концентрация  $\text{CO}_2$  в воздухе составляла 50—100 млн $^{-1}$ .

\*\*\*

Использование в оптических сенсорах и газоанализаторах инфракрасных полупроводниковых источников излучения волн длиной 2,5—5,0 мкм открывает новые возможности абсорбционного метода при конструировании приборов газового анализа. Такие сенсоры работают при комнатной температуре, имеют высокое быстродействие ( $\tau=10^{-7}$ — $10^{-8}$  с), большой диапазон частот электронной модуляции (до 10 МГц), большое время наработки на отказ (не меньше 30 тыс. ч), малые размеры и энергопотребление. Проведенные испытания разработанных оптических

сенсоров показали их перспективность для создания портативных газоанализаторов. Высокие эксплуатационные параметры и низкая себестоимость делают такие сенсоры конкурентоспособными на внутреннем и мировом рынках.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кабацій В. М., Головач Й. Й. Швидкодіючі напівпровідникові джерела випромінювання інфрачервоного діапазону спектру // Вісник Технологічного університету Поділля.— 2002.— Ч. 1, вип. 5.— С. 34—40.
2. Кабацій В. М. Джерела випромінювання нового покоління в області спектру 2,5—5,0 мкм // Тр. 7-й Міжнар. наук.-практич. конф. «СІІТ-2006».— Одеса.— 2006.— С. 154.
3. Пат. 27726 України. Напівпровідникове джерело інфрачервоного випромінювання / В. М. Кабацій, В. О. Гасинець.— 12.11 2007.
4. Пат. 80638 України. Спосіб вимірювання концентрації газів / В. М. Кабацій.— 10.10 2007.
5. Пат. 80639 України. Інфрачервоний газоаналізатор / В. М. Кабацій.— 10.10 2007.
6. Пат. 81703 України. Газоаналізатор (варіанти) / В. М. Кабацій.— 25.01 2008.
7. Пат. 81704 України. Газоаналізатор / В. М. Кабацій, Ю. В. Мигалина, М. М. Кабацій.— 25.01 2008.

## НОВЫЕ КНИГИ

**Бёрд Джон. Инженерная математика: Карманный справочник.— М.: Додэка-XXI, 2008.— 544 с.**

Справочник содержит практически все разделы аппарата современной математики, которые используются в инженерном деле, такие как алгебра, геометрия, тригонометрия, теория матриц и детерминантов, булева алгебра и логические схемы, дифференциальное и интегральное исчисление, статистика и теория вероятностей и т. д.

Карманный справочник — уникальный и доступный источник основных инженерных математических формул. Материал книги разделен на 14 глав, содержит 93 раздела, более 400 числовых примеров, более 300 рисунков.

Будет полезен инженерно-техническим работникам, студентам и абитуриентам технических вузов и колледжей.

**Болл Стюарт Р. Аналоговые интерфейсы микроконтроллеров.— М.: Додэка-XXI, 2007.— 360 с.**

Данное издание является практическим пособием по применению различных интерфейсов для подключения аналоговых периферийных устройств к компьютерам, микропроцессорам и микроконтроллерам. Раскрывается специфика применения таких интерфейсов, как I2C, SPI/Microware, SMBus, RS-232/485/422, токовая петля 4-20 мА и др. Даётся обзор большого количества современных датчиков: температурных, оптических, ПЗС, магнитных, тензодатчиков и т. д. Подробно описываются контроллеры, АЦП и ЦАПы, их элементы — УВХ, ИОН, кодеки, энкодеры. Рассмотрены исполнительные устройства — двигатели, терморегуляторы — и вопросы управления ими в составе систем автоматического управления различного типа (релейного, пропорционального и ПИД). Книга снабжена иллюстрациями, наглядно представляющими аппаратные и программные особенности применения элементов аналоговой и цифровой техники.

Занинтересует не только специалистов, имеющих стаж работы с аналоговой и цифровой техникой, но и студентов технических колледжей и вузов.

НОВЫЕ КНИГИ



Д. т. н. С. В. ЛЕНКОВ, Ю. А. ГУНЧЕНКО,  
к. т. н. В. В. ЖЕРЕВЧУК, к. т. н. А. В. СЕЛЮКОВ

Украина, г. Киев, Военный институт КНУ им. Т. Шевченко,  
Одесский национальный политехнический университет  
E-mail: mokrckiy@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
26.02.2008 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Н. О. КОВАЛЕНКО  
(Ин-т монокристаллов, г. Харьков)

## ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ИНДИКАТОРОВ ОТ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Исследована зависимость яркости электролюминесцентных индикаторов от состава активного материала, от напряжения и частоты источника питания. Выбран оптимальный состав активного материала, разработан источник питания с автоматической подстройкой яркости свечения при изменении уровня освещенности.

Электролюминесцентные индикаторы (ЭИ) широко используются в системах отображения информации (СОИ). Условия эксплуатации СОИ могут меняться в зависимости от объекта их применения (замкнутое или открытое пространство), что требует изменения параметров излучения. Однако современные ЭИ такими возможностями не обладают: их параметры фиксируются выбором исходных материалов, конструкцией и технологией изготовления. Следствием этого может быть ухудшение восприятия оператором информации, выдаваемой ЭИ, в случае, например, изменения внешней освещенности. Устранить этот недостаток можно двумя методами [1]:

- найти составы люминофора и других материалов ЭИ, оптимальные для заданных условий эксплуатации;
- создать источник питания (ИП), меняющий свои параметры в зависимости от изменения условий эксплуатации электролюминесцентного индикатора с оптимальными параметрами.

В связи с этим перед разработчиками ЭИ стоит задача, во-первых, исследования взаимосвязи состава люминофора, яркости и световой эффективности излучения от напряжения, частоты и других параметров ИП, а во-вторых, создания источника питания, параметры которого зависят от условий эксплуатации ЭИ. Комплекс подобных исследований был впервые выполнен авторами данной работы.

Результаты исследования зависимости яркости излучения от напряжения для ЭИ на основе сульфида цинка представлены на **рис. 1** [2].

Из рисунка видно, что максимальной яркостью излучения  $950 \text{ кд}/\text{м}^2$  обладают структуры на основе  $\text{ZnS:TbF}_3$  (3 мас. %). Для ЭИ на основе  $\text{ZnS:HoF}_3$

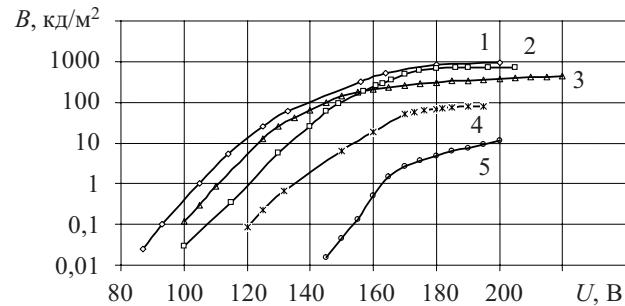


Рис. 1. Вольт-яркостные характеристики ЭИ:  
1 —  $\text{ZnS:TbF}_3$  (3 мас. %); 2 —  $\text{ZnS:HoF}_3$  (5 мас. %); 3 —  $\text{ZnS:SmF}_3$  (1 мас. %); 4 —  $\text{ZnS:ErF}_3$  (5 мас. %); 5 —  $\text{ZnS:TmF}_3$  (10 мас. %)

(5 мас. %) значение яркости максимально при 200 В и составляет  $800 \text{ кд}/\text{м}^2$ .

Для исследуемых структур на основе сульфида цинка, легированного активаторами  $\text{SmF}_3$  (1 мас. %),  $\text{TmF}_3$  (10 мас. %),  $\text{ZnS:ErF}_3$  (5 мас. %), максимальные значения яркости составили  $450$ ,  $11$  и  $200 \text{ кд}/\text{м}^2$ , соответственно.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что для практического использования лучшими параметрами обладают ЭИ зеленого цвета свечения на основе  $\text{ZnS:TbF}_3$  (3 мас. %) и  $\text{ZnS:HoF}_3$  (5 мас. %). Они имеют максимальную яркость излучения ( $950$  и  $800 \text{ кд}/\text{м}^2$ ) и меньшее пороговое напряжение возбуждения (95 и 115 В) по сравнению со структурами, легированными туллием (145 В) и эрбием (120 В).

В работе предложено использовать в качестве диэлектрика пленки твердого раствора  $\text{HfO}_2\text{-Nd}_2\text{O}_3$ . При этом величина порогового напряжения составляет 115 В, что в 1,3—1,8 раз меньше, чем у известных ЭИ, в которых традиционно используются, например,  $\text{Sn}_2\text{O}_3$  или  $\text{Y}_2\text{O}_3$  [2].

Вольт-яркостная характеристика ЭИ (рис. 2) имеет три участка. На первом участке ее крутизна, характеризуемая показателем степени  $n$  функции  $B \sim U^n$ , постепенно возрастает (здесь  $n=10\text{---}15$ ), на втором она максимальна ( $n \geq 30$ ). На третьем участке яркость  $B$  определяется зависимостью от активной составляющей тока  $I$  и квантового выхода возбуждения центров свечения  $P_1 B \sim I N_1 P_1$ , где  $N_1$  — количество возбуждаемых центров свечения. На первом участке кривой  $B(U)$  ток  $I$  определяется, в основном, термо-

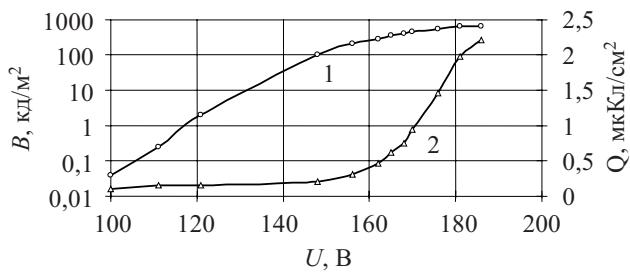


Рис. 2. Вольт-яркостная (1) и вольт-зарядовая (2) характеристики ЭИ на основе ZnS:HoF<sub>3</sub> (5 мас.%)

полевой ионизацией сравнительно мелких уровней (менее 0,8 эВ), обусловленных дефектами структуры ZnS.

Зависимость яркости излучения ЭИ на основе ZnS:HoF<sub>3</sub> (5 мас.%) от частоты напряжения питания представлена на рис. 3, из которого видно, что повышение частоты  $f$  приводит к увеличению яркости  $B$ . Измерения проводились при возбуждении структуры напряжением 170 В в диапазоне 200—10000 Гц.

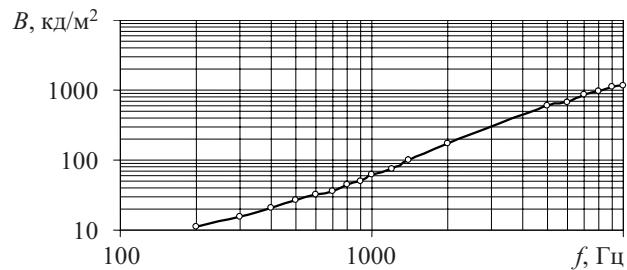


Рис. 3. Зависимость яркости излучения ЭИ на основе ZnS:HoF<sub>3</sub> (5 мас.%) от частоты напряжения питания

По результатам исследований характеристик ЭИ был разработан ИП-инвертор, позволяющий регулировать амплитуду и частоту переменного выходного напряжения. Особенностью инвертора является наличие дополнительных каналов для автоматического управления выходным напряжением в зависимости от внешней освещенности рабочей зоны, где размещена система отображения информации, использующая исследуемый индикатор.

Электрическая нагрузка ЭИ носит ярко выраженный емкостной характер, поэтому ток, протекающий через индикатор, по форме может не соответствовать приложенному переменному напряжению в связи с полной перезарядкой внутренней емкости [3]. С учетом относительно продолжительного времени затухания яркости (0,4—2 мс), разработан ИП для

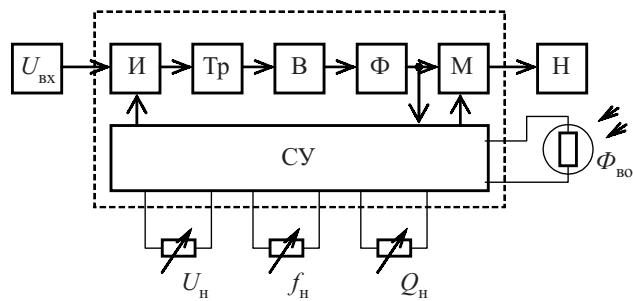


Рис. 4. Структурная схема ИП ЭИ

управления параметрами ЭИ. Он позволяет регулировать напряжение, частоту и скважность импульсов управляющего напряжения.

Структурная схема ИП (рис. 4) содержит:  $U_{\text{вх}}$  — источник напряжения (24—60 В); И — высокочастотный инвертор с нерегулируемой частотой; Тр — повышающий трансформатор; В — выпрямитель; Ф — сглаживающий фильтр; М — модулятор; СУ — система управления;  $U_{\text{н}}$ ,  $f_{\text{н}}$ ,  $Q_{\text{н}}$  — элементы оперативной регулировки напряжения, частоты и скважности, соответственно;  $\Phi_{\text{вн}}$  — фотодатчик одного из каналов автоматического управления в зависимости от внешней освещенности; Н — нагрузка (ЭИ).

Диаграммы, иллюстрирующие функционирование силовой части предлагаемого ИП, приведены на рис. 5.

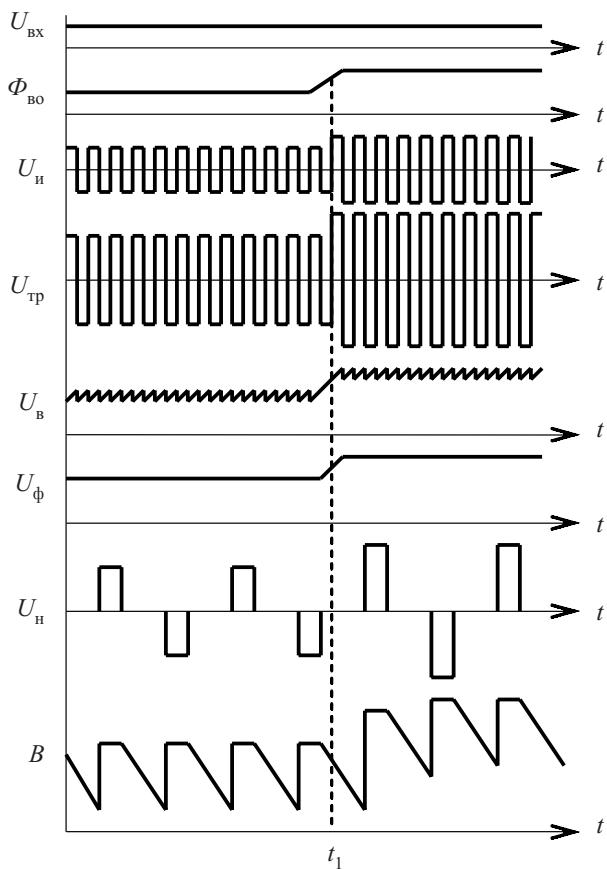


Рис. 5. Диаграммы функционирования ИП ЭИ при изменении освещенности рабочей зоны

Входное напряжение  $U_{\text{вх}}$  равное 24—60 В, в зависимости от типа исполнения и условий применения источника питания,  $\Phi_{\text{вн}}$  — сигнал с фотодатчика, пропорциональный освещенности рабочей зоны,  $U_{\text{и}}$  — напряжение на выходе инвертора с нерегулируемой частотой, которое может подстраиваться автоматически в зависимости от уровня внешней освещенности. Напряжение на выходе повышающего трансформатора ( $U_{\text{тр}}=k_{\text{тр}}U_{\text{и}}$ , где  $k_{\text{тр}}$  — коэффициент трансформации) по форме соответствует напряжению на выходе инвертора и может составлять 50—300 В. Напряжение с выхода трансформатора вып-

## ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

рямляется выпрямителем В (напряжение  $U_B$ ) и сглаживается фильтром Ф (напряжение  $U_\phi$ ). Полученное постоянное напряжение  $U_\phi$  с помощью модулятора инвертируется с регулируемой частотой  $f$  и скважностью  $Q$  (напряжение  $U_H$ ) и подается на ЭИ.

Предположим, в момент времени  $t_1$  (рис. 5) освещенность рабочей зоны увеличилась (например, включили освещение). Это привело к увеличению сигнала с фотодатчика  $\Phi_{vo}$  и, как следствие, к увеличению амплитуды напряжения на выходе инвертора И, трансформатора Тр, фильтра Ф. Амплитуда выходного напряжения модулятора также увеличится, а частота и скважность импульсов останутся без изменения. При этом яркость свечения ЭИ с момента времени  $t_1$  также увеличится (яркость В индикатора на рис. 5), чем скомпенсирует влияние увеличенной освещенности рабочей зоны на восприятие оператором информации с дисплея (ЭИ).

\*\*\*

Таким образом, найдены оптимальные составы люминофоров, обладающих повышенной яркостью

излучения, и диэлектриков, позволяющих уменьшить пороговое напряжение. Разработан источник питания, позволяющий увеличить срок службы ЭИ за счет щадящего режима работы, повысить эффективность восприятия информации оператором за счет автоматической подстройки яркости свечения ЭИ в зависимости от уровня внешней освещенности и, как следствие, повысить эргономические показатели системы отображения информации.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Верещагин И. К., Ковалев Б. А., Косяченко Л. А., Кокин С. М. Электролюминесцентные источники света.— М.: Энергатомиздат, 1990.
2. Ленков С. В., Жеревчук В. В., Содеева Л. В. Керування тонкоплівковими електролюмінісцентними індикаторами // Збірник праць ВІКНУ ім. Т. Шевченка.— 2008.— № 11.— С. 38—42.
3. Mach R., Muller G. O. Physical concepts of high-field, thin-film electroluminescence devices // Phys. Stat. Sol.— 1982.— Vol. Al.— P. 11—66.

### НОВЫЕ КНИГИ

**Кожитов Л. В., Косушкин В. Г., Крапухин В. В., Пархоменко Ю. Н. Технология материалов микро- и наноэлектроники.— М.: МИСИС, 2007.— 544 с**

Рассмотрены теоретические основы и математическое моделирование процесса роста монокристаллов полупроводников из расплава с использованием теории случайных явлений для управления процессом роста бездефектных кристаллов. Представлены результаты математического моделирования равновесия фаз многокомпонентных систем, макро- и микрокинетика парофазной эпитаксии кремния и соединений AmBv в хлоридно-гидридном и МОС-гидридном процессах.

Рассмотрены актуальные для микроэлектроники технологии получения скрытых проводящих и диэлектрических слоев в кремнии, предложен механизм их фазообразования. Показано, что развитие работ в области органических полупроводников, в том числе с фрактальными кластерами и наночастицами различных элементов в полимерах, позволяет получать материалы с особыми свойствами.

Книга предназначена для широкого круга научных и инженерно-технических работников, специализирующихся в области получения и исследования материалов микро- и наноэлектроники, в области разработки новых материалов, оптимизации технологических процессов, а также студентов и аспирантов.

**Фостер Л. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности.— М.: Техносфера, 2008.— 336 с.**

В предлагаемой книге авторы — известные ученые и бизнесмены, занимающиеся теоретическими и практическими проблемами нанотехнологий, — описывают состояние отрасли и перспективы ее развития на ближайшее десятилетие, а также возможное воздействие нанотехнологий на глобальные процессы.

Книга предназначена для широкого круга читателей: научных работников, специалистов, а также студентов профильных учебных заведений.

**Евстифеев А. В. Микроконтроллеры AVR семейства Classic фирмы «ATMEL». 6-е издание. CD.— Электронное издание на CD-диске.— М.: Додэка-ХХI, 2008**

Книга представляет собой справочное издание по применению микроконтроллеров AVR семейства Classic фирмы ATMEL.

НОВЫЕ КНИГИ



К. т. н. Г. С. РАНЧЕНКО, к. т. н. В. И. ПЕРЕПЕКА,  
В. М. ГРУДИНКИН, А. Г. БУРЯЧЕНКО

Украина, г. Одесса, ОАО «Элемент»  
E-mail: odessa@element.od.ua, element-tech@ukr.net

Дата поступления в редакцию  
27.03 2008 г.

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

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ БЛОКА СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ СИД-3-148

*Приведены методика и результаты моделирования тепловых режимов блока, установленного в подкапотном пространстве двигателя самолета Ан-148. Моделирование выполнено с использованием данных, полученных в ходе сертификационных испытаний самолета.*

Выполнение оценки тепловых режимов работы блока СИД-3-148 — системы измерения давления, предназначенной для эксплуатации на борту самолета Ан-148 в составе газотурбинного двигателя Д-436-148, являлось важной составной частью обеспечения надежности указанной системы. Оценка проводилась для реальных условий полета по данным термометрирования, проведенного при испытаниях самолета.

Анализ нестационарных тепловых режимов блока был проведен с использованием «метода конечных балансов», по сути являющимся модификацией «метода сеток», основные идеи которого изложены в ряде работ по вычислительной физике [1—3]. В качестве инструмента для анализа нестационарных тепловых режимов блоков РЭА «метод конечных балансов» отработан в [4].

Цель расчета состояла в оценке значений средненеинтегральной температуры составных частей блока, поэтому при моделировании блок рассматривался как система тел с сосредоточенными параметрами (с реальной для каждого тела теплоемкостью), соединенных между собой тепловыми проводимостями, определенными с учетом реальных теплофизических и геометрических характеристик тел, их взаимного расположения и кондуктивных связей через места контактов и креплений. Такая постановка задачи моделирования позволяет перейти от системы дифференциальных уравнений в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных нелинейных неоднородных уравнений, которая решается в матричной форме.

При необходимости задача решается в итерационном циклическом режиме.

Следует отметить, что после определения средненеинтегральной температуры тел моделируемой системы можно любое из них, в свою очередь, рассмотреть как систему, состоящую из частей, и произвести моделирование на новом, более детализированном уровне. Как показала практика, попытка добиться в

одной модели большой степени детализации приводит к вычислительным трудностям из-за большого числа уравнений и сложности эффективного анализа промежуточных результатов. Иерархическая процедура постепенной детализации гетерогенных структур (таковыми являются блоки РЭА) приводит к задаче анализа более гомогенных структур (плата, кристалл процессора), для анализа которых используют классический метод сеток.

В настоящей статье рассматривается первый уровень анализа блока.

### Моделирование тепловых режимов

При моделировании тепловых режимов использованы сведения о конструкции и расположении блока, краткое описание которых дано ниже.

Блок собран в герметизированном металлическом корпусе. Внутри корпуса (рис. 1) установлены две печатные платы, на которых расположены компоненты одного из каналов измерения давления: входные

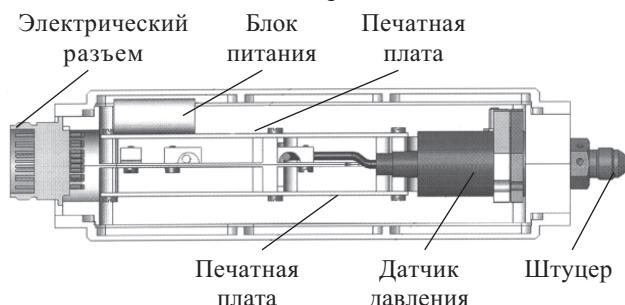


Рис. 1. Размещение элементов внутри корпуса блока усилители, аналого-цифровой преобразователь, микропроцессор, выходные формирователи и блок питания. К одной плате подключен канал датчика, измеряющего давление воздуха на входе в двигатель, к другой — измеряющего давление воздуха за компрессором высокого давления. Для крепления блока на двигателе в конструкции блока предусмотрен специальный экран с тросовыми амортизаторами. Термовая схема расположения блока в подкапотном пространстве двигателя приведена на рис. 2.

Электротепловая схема блока, установленного в подкапотном пространстве, представлена на рис. 3.

Рассматриваемая система тел включает в себя следующие составляющие:

— экран, на котором через тросовые амортизаторы крепится блок;

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

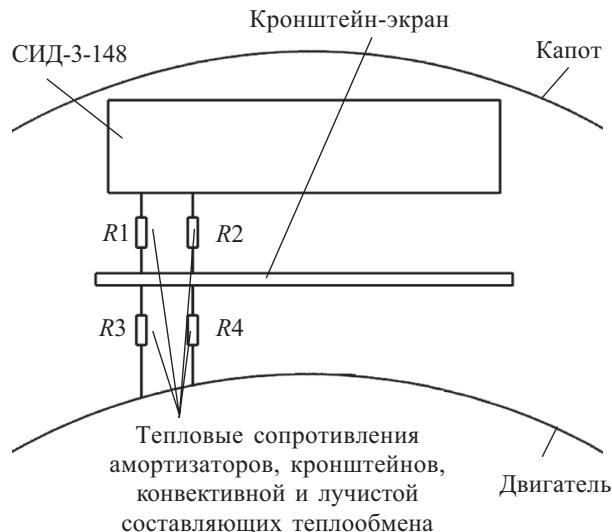


Рис. 2. Термическая схема расположения блока в подкапотном пространстве двигателя

- корпус блока;
- воздух внутри блока;
- две печатные платы (нагретая зона).

При составлении модели рассматриваемой системы было принято допущение о том, что внешними границами системы являются воздух подкапотного пространства и оболочка двигателя. Их температуры изменяются по графику типового цикла самолета Ан-148, наиболее высокая температурная площадка графика это участок, соответствующий взлету и набору высоты до 10000 м.

Для отслеживания в процессе моделирования заданного графика изменения граничных температур, независимых от изменения температур экрана и корпуса блока, была разработана подпрограмма, обес-

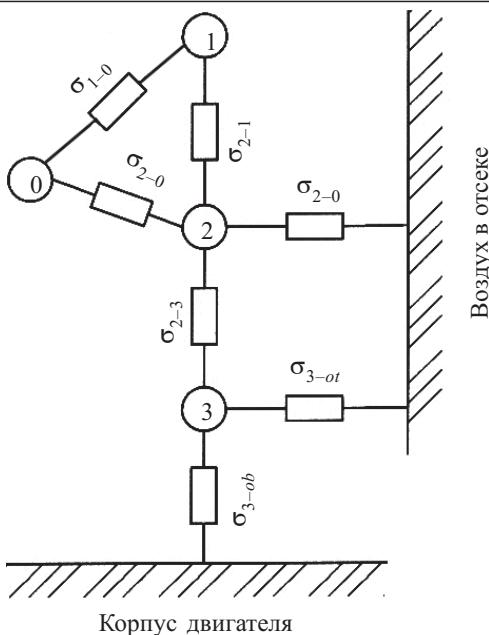


Рис. 3. Электротермическая схема блока, установленного в подкапотном пространстве:

- 0 — воздух внутри блока; 1 — нагретая зона (2 платы); 2 — корпус блока; 3 — экран; -□- — тепловые проводимости

печивающая получение временной зависимости температуры границ рассматриваемой системы в подкапотном пространстве для трех температурных уровней площадки «взлет — набор высоты до 10000 м». Результаты моделирования представлены на рис. 4.

Профили температуры на всех трех уровнях подобны и эквидистанты. Обмен энергией указанных выше тел описывается нижеприведенной системой обыкновенных неоднородных нелинейных дифференциальных уравнений.

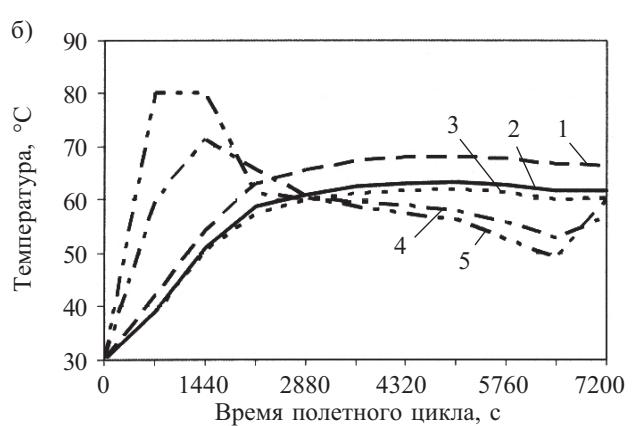
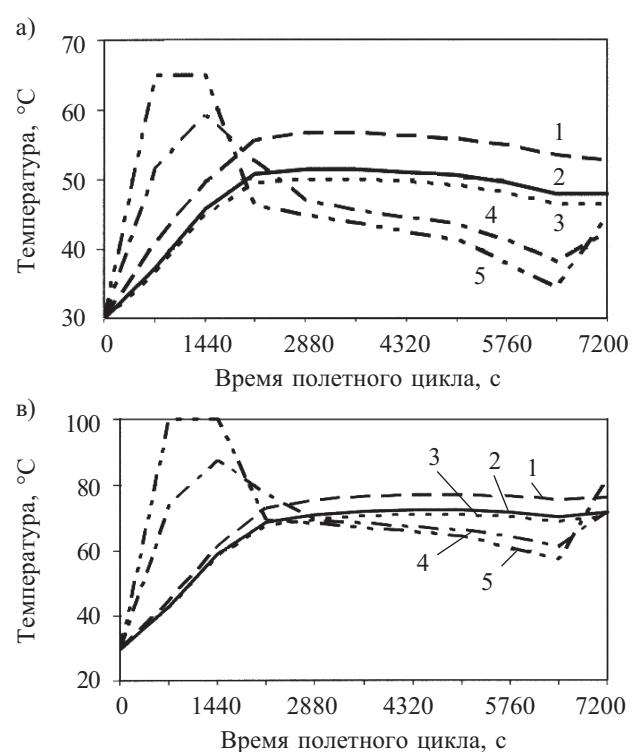


Рис. 4. Результаты моделирования для различных температурных уровней площадки «взлет — набор высоты до 10000 м»:

- а — 65°C; б — 80°C; в — 100°C
- (1 — нагретая зона; 2 — воздух в блоке; 3 — корпус; 4 — экран; 5 — воздух в подкапотном пространстве)

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

$$\frac{d}{d\tau} t_0 = \frac{\sigma_{1-0}}{C_v} (t_1 - t_0) - \frac{\sigma_{2-0}}{C_v} (t_0 - t_2); \quad (1)$$

$$\frac{d}{d\tau} t_1 = \frac{-\sigma_{1-0}}{C_z} (t_1 - t_0) - \frac{\sigma_{2-1} + 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{(t_1 + 273)^4 - (t_2 + 273)^4}{t_1 - t_2} \epsilon_{pr} \psi S_z}{C_z} \times \\ \times (t_1 - t_2) + \frac{P_z}{C_z}; \quad (2)$$

$$\frac{d}{d\tau} t_2 = \frac{\sigma_{2-0}}{C_k} (t_0 - t_2) + \frac{\sigma_{2-1} + 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{(t_1 + 273)^4 - (t_2 + 273)^4}{t_1 - t_2} \epsilon_{pr} \psi S_z}{C_k} \times \\ \times (t_1 - t_2) + \frac{\sigma_{2-3} + 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{(t_3 + 273)^4 - (t_2 + 273)^4}{t_3 - t_2}}{C_k} \times \\ \times (t_1 - t_2) + \frac{\sigma_{2-ot}}{C_k} (t_{vo}(\tau) - t_2); \quad (3)$$

$$\frac{d}{d\tau} t_3 = - \frac{\sigma_{2-3} + 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{(t_3 + 273)^4 - (t_2 + 273)^4}{t_3 - t_2} \epsilon_{pr} \psi S_{ek}}{C_{ek}} \times \\ \times (t_3 - t_2) + \frac{\sigma_{3-ot}}{C_{ek}} (t_{vo}(\tau) - t_3) + \frac{\sigma_{3-ob}}{C_{ek}} (t_{kd}(\tau) - t_3), \quad (4)$$

где  $\tau$  — время полетного цикла, с;

$t_0$  — температура воздуха внутри блока,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_1$  — температура нагретой зоны блока,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_2$  — температура корпуса блока,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_3$  — температура экрана,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{vo}(\tau)$  — температура воздуха в отсеке, изменяющаяся во времени,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{kd}(\tau)$  — температура кожуха двигателя, изменяющаяся во времени,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$C_v$  — теплоемкость воздуха в блоке, Дж/К;

$C_z$  — теплоемкость нагретой зоны блока, Дж/К;

$C_k$  — теплоемкость корпуса блока, Дж/К;

$C_{ek}$  — теплоемкость экрана, Дж/К;

$\sigma_{1-0}$  — тепловая проводимость между нагретой зоной и воздухом в блоке, Вт/К;

$\sigma_{2-0}$  — тепловая проводимость между корпусом блока и воздухом в блоке, Вт/К;

$\sigma_{2-1}$  — тепловая проводимость между корпусом блока и нагретой зоной, Вт/К;

$\sigma_{2-3}$  — тепловая проводимость между корпусом блока и экраном, Вт/К;

$\sigma_{2-ot}$  — тепловая проводимость между корпусом блока и воздухом в отсеке, Вт/К;

$\sigma_{3-ob}$  — тепловая проводимость между экраном и воздухом в отсеке, Вт/К;

$\sigma_{3-ob}$  — тепловая проводимость между экраном и оболочкой (коржухом) двигателя, Вт/К;

$\epsilon_{pr}$  — приведенная степень черноты;

$\psi$  — средний угловой коэффициент;

$S_z$  — эффективная площадь излучения нагретой зоны,  $\text{м}^2$ ;

$S_{ek}$  — площадь поверхности экрана,  $\text{м}^2$ ;

$P_z$  — тепловая мощность, выделяемая элементами нагретой зоны, Вт.

В результате расчета получены следующие значения тепловых проводимостей между рассматриваемыми телами:

$\sigma_{2-ot} = 0,594$ ;  $\sigma_{3-ob} = 0,540$ ;  $\sigma_{3-ot} = 0,420$ ;  $\sigma_{2-0} = 0,409$ ;

$\sigma_{2-1} = 0,394$ ;  $\sigma_{1-0} = 0,113$ ;  $\sigma_{2-3} = 0,064$ .

### Анализ результатов моделирования и выводы

Анализ полученных в результате моделирования графиков позволяет сделать следующие выводы. Для рассмотренного низкотемпературного профиля изменения температуры воздуха в подкапотном пространстве (рис. 4, а) снижение температуры нагретой зоны могло бы достигаться за счет увеличения тепловой проводимости от нагретой зоны к воздуху в блоке и корпусу (возможно, путем введения дополнительных радиаторов повышенной степени черноты, теплоотводящих шин и др.). Для высокотемпературного профиля (рис. 4, в) было бы целесообразным уменьшать тепловую проводимость от воздуха в подкапотном пространстве к корпусу блока, что может быть реализовано посредством нанесения слоя высокоеффективного изолятора (например, термоизола) на наружную поверхность корпуса. Однако для того, чтобы выбрать один из указанных способов снижения температуры нагретой зоны, необходимо знать, какой режим превалирует в каждом конкретном случае.

Сопоставление приведенных тепловых проводимостей подтверждает рациональность выбора системы амортизации крепления блока: она не только поглощает динамические механические нагрузки, но и предохраняет блок от непосредственного теплового влияния двигателя.

Сопоставление графиков роста температуры воздуха в подкапотном пространстве, экрана и корпуса блока в первый высокотемпературный период (участок от 0 до 1440 с на рис. 4) позволяет сделать вывод о том, что отсутствие прямого лучистого теплообмена между корпусом блока и двигателем вследствие установки экрана снижает перегрев нагретой зоны и воздуха в блоке.

В целом, проведенная расчетная оценка условий работы радиоэлектронных компонентов в составе блока СИД-3-148 показала, что температура нагретой зоны блока при всех рассмотренных уровнях изменения температуры воздуха в подкапотном пространстве не достигает критических значений.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение.— М.: Мир, 2001.

2. Федоренко Р. П. Введение в вычислительную физику.— М.: МФТИ, 1984.

3. Метьюз Д., Финк К. Численные методы. Использование MATLAB.— М.: Издательский дом «Вильямс», 2001.

4. Перепека В. И. Расчет нестационарного режима теплонагруженных ЭРЭ в герметичном блоке // Тепловые режимы и охлаждение РЭА.— 2007.— № 1.— С. 44—49.

К. т. н. Б. М. РАССАМАКИН, к. т. н. В. А. РОГАЧЕВ,  
к. т. н. С. М. ХАЙРНАСОВ, к. т. н. В. И. ХОМИНИЧ, И. Е. ГРЕНЮК

Украина, г. Киев, НТУУ “Киевский политехнический институт”,  
ЦКБ «Арсенал»  
E-mail: lab-hp@tefntuu.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
21.05 2008 г.

Оппонент В. Е. МАРТЬИНОВ  
(НПП «Хартрон-ЮКОМ», г. Запорожье)

## ТЕРМОВАКУУМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА МС-2-8

*Дано описание установки ТВК-2,5 для испытаний аппаратов и приборов космического назначения. Приведены результаты термовакуумных испытаний оптико-электронных приборов, выполненных с целью определения их орбитальной надежности.*

Термовакуумные воздействия являются одними из наиболее существенных факторов при эксплуатации оптико-электронных приборов (ОЭП) космического назначения, влияющих на их надежное функционирование в полете, поэтому термовакуумные испытания проводятся, как правило, на каждом этапе разработки ОЭП. По результатам этих исследований дорабатывается конструкция и формулируются требования к узлам и системам ОЭП, уточняются расчетные оптико-механические параметры. Длительные комплексные термовакуумные воздействия позволяют установить степень работоспособности ОЭП в целом и выполнить отработку вероятных нештатных ситуаций в космосе. Поэтому основная часть исследовательских и метрологических работ

при испытаниях ОЭП проводится в наземных лабораторных условиях на экспериментальных стендах [1–5].

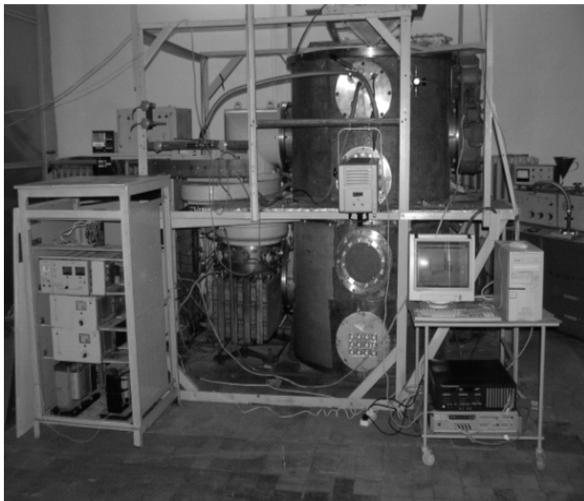
В настоящей работе описаны проведенные авторами термовакуумные испытания теплового макета малогабаритного космического аппарата (КА) с установленными на нем ОЭП, являющимися составной частью микроспутника МС-2-8.

### Моделирование условий космического пространства

В соответствии с общепринятыми необходимыми и достаточными требованиями [4, 5], направленными на полное исследование тепловых режимов космической аппаратуры, установка ТВК-2,5 воспроизводит основные условия космического пространства: вакуум, низкую температуру и высокую степень теплового поглощения окружающей среды.

В состав лабораторного стенда ТВК-2,5 входят: вакуумная установка, криогенная система, имитатор солнечного излучения (ИСИ), имитатор излучения Земли (ИИЗ), автоматизированная многоканальная система измерения температуры (АМСИТ), блок измерения интенсивности излучения, опорно-подвесная система (рис. 1).

а)



б)

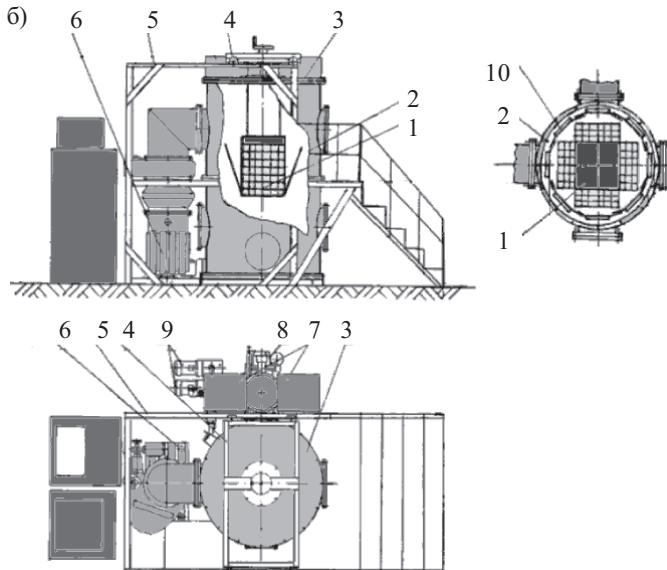


Рис. 1. Общий вид (а) и структурно-функциональная схема (б) установки ТВК-2,5:  
1 — макет КА; 2 — вакуумная камера; 3 — крышка; 4 — тележка; 5 — рама; 6—9 — насосы; 10 — криоэкраны

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

Основные технические характеристики установки ТВК-2,5:

полезный объем вакуумной камеры	2,5 м <sup>3</sup> ;
пределный вакуум	10 <sup>-6</sup> мм рт. ст;
хладоноситель	жидкий азот;
минимальная температура криоэкронов	80 К;
степень черноты криоэкронов	≥0,92;
плотность потока внешнего излучения	1000—4000 Вт/м <sup>2</sup> ;
диапазон длин волн излучения	0,25—2,5 мкм;
потребляемая мощность стенда	≤10 кВт;
габаритные размеры стенда	8×8×3 м.

Внутри вакуумной камеры (ВК) макет КА закрепляется на опорно-подвесной системе. С помощью насосной системы откачки в вакуумной камере создается необходимое рабочее давление, затем в систему трубопроводов криогенных экранов (КЭ) поступает жидкый азот. После охлаждения КЭ до температуры жидкого азота включается имитатор солнечного или земного излучения (возможно одновременное их включение и параллельная работа). АМСИТ непрерывно измеряет температуру макета и КЭ, обрабатывает эту информацию и выводит ее на компьютер. Непрерывный контроль за величиной теплового потока излучений ИСИ и ИИЗ осуществляется с помощью датчика типа ФОА-035.

Вакуумная установка конструктивно состоит из вакуумной камеры и системы откачки. ВК представляет собой цилиндр с внутренним диаметром 1 м и высотой 2,5 м. Крышка плотно прилегает к фланцу обечайки камеры, создавая в камере герметичность. На поверхности фланца имеются вакуумные разъемы и отверстия для подключения к системам откачки и азотоснабжения, каналам электропитания блоков аппаратуры, линий связи датчиков температуры и теплового потока. Для подвода «солнечного» излучения к объекту испытания в стенке камеры имеются два иллюминатора из кварцевого стекла типа КВ диаметром 200 мм. Внутри камеры расположена криогенная система.

Система откачки ТВК-2,5 состоит из двух подсистем — форвакуумной и высоковакуумной, обеспечивающих различную степень вакуума в камере. Форвакуумная подсистема состоит из трех насосов типа 2НВР-5ДМ, натекателей, клапанов и создает предварительное разрежение 1—0,1 торр. Дальнейшее понижение давления в камере обеспечивается высоковакуумными насосами: турбомолекулярным ТМН-500, двумя магниторазрядными НОРД-250 и гетероионным 01АГМ-4000. При этом в объеме камеры получается безмасляный «чистый» вакуум со свойствами, приближенными к космическому пространству. Контроль степени вакуума производится вакуумметрами типа ВИТ-2М и ВМБ-5 с преобразователями ПМТ-2, ПМИ-2 и ПММ-32-1.

Криогенная система установки применяется с целью имитации процесса полного поглощения космическим пространством теплового излучения объекта. Криосистема выполнена из отдельных алюминиевых криопанелей — верхней, нижней и восьми боковых, охлаждаемых жидким азотом. Единичная боковая криопанель представляет собой замкнутую по периметру алюминиевую трубу, к поверхно-

сти которой приварены три алюминиевые пластины. Труба каждой панели имеет верхний и нижний штуцеры, соединяющие их с кольцевым раздаточным и отводящим азотоколлекторами, которые соединены последовательно трубопроводами с верхней и нижней криопанелями. Для обеспечения наилучшего моделирования «черного» космоса лицевая часть криопанелей покрыта терморегулирующей черной эмалью АК-512 с коэффициентом поглощения солнечного излучения  $A_s \geq 0,93$ . Поверхности панелей, обращенные к стенкам вакуумной камеры, не окрашены, обладают высокой отражательной способностью и имеют относительную степень черноты  $\epsilon \leq 0,2$ . Конструктивная схема криогенной системы обеспечивает практически равномерную температуру поверхностей боковых криоэкронов с разбросом  $\pm 3$  К в тангенциальном направлении. Температура поверхностей боковых криопанелей составляет 80 К, верхней и нижней криопанелей — соответственно 120 и 80 К, что с достаточной степенью приближения моделирует «холодное» космическое пространство.

Автоматизированная многоканальная система измерения температуры предназначена для сбора информации от температурных датчиков и обработки ее на персональном компьютере. АМСИТ изготовлена в соответствии с разработанной НТУУ «КПИ» конструкторской документацией и прошла натурную апробацию при тепловакуумных испытаниях тепловой модели микроспутника МС-1-ТК-ТВ [4], микроспутника «EgypSat» и измерителя координат солнца [5]. АМСИТ имеет до 200 входных измерительных каналов.

Для измерения температуры в качестве первичных измерительных преобразователей применяются контактные термоэлектрические и терморезистивные датчики. Термоэлектрическими датчиками являются медь-константановые термопары с диаметром проводов 0,16/0,1 мм, а в качестве терморезистивных датчиков используются термопреобразователи типа ТСМ 2-3 (ПС У 14242882-98).

Работа системы осуществляется под управлением программного обеспечения «RB-КПИ-ИИС», разработанного в НТУУ «КПИ» и ориентированного на эффективное и оперативное управление системой, предварительную обработку и графическое представление экспериментальных данных. Программа обеспечивает интерактивный ввод исходной информации и вывод результатов эксперимента в файл и на экран ПК.

Опорно-подвесная система состоит из наружного и внутреннего каркасов из черненого алюминиевого профиля. Внутренний каркас дискретно перемещается в объеме ВК в двух горизонтальных направлениях. Наружный несущий каркас своими краями опирается на верхние торцы боковых криоэкронов. К внутреннему подвижному каркасу шпильками прикрепляется испытуемый макет КА. Перемещение макета в вертикальном направлении можно осуществлять за счет изменения длины резьбы шпилек, а в горизонтальном — с помощью подвижного каркаса. При проведении испытаний ось светового пучка ИСИ или ИИЗ отьюстирована таким образом,

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

что пучок направлен по нормали к облучаемой плоскости макета КА.

### Испытательное оборудование и проведение исследований

В состав испытательного оборудования входит:

1. Два оптических иллюминатора термовакуумной камеры —  $\varnothing 190$  мм для ОЭП «МСУ» и  $\varnothing 120$  мм для ОЭП «ССИК»;
2. Остов теплового макета КА (рис. 2) с имитаторами внешних и внутренних тепловых излучений, с макетом платформы КА для закрепления ОЭП с двумя кронштейнами-стаканами;
3. Имитатор теплового излучения Земли;
4. Радиоэлектронная аппаратура для контроля параметров и технических характеристик ОЭП;
5. Тестирующий оптический стенд, состоящий из источника света, коллиматора и диафрагмы для за светки входных «зрачков» «МСУ» и «ССИК» через оптические иллюминаторы термовакуумной камеры.

Во время испытаний определялись величины смещения фокальных плоскостей «МСУ» и «ССИК» в условиях, имитирующих открытый космос, и с учетом рабочих характеристик пассивной системы термостабилизации ОЭП.

Расположение (топология) датчиков температуры на поверхностях макета и линз ОЭП, а также иллюминаторов камеры показаны на рис. 3—6.

В ходе испытаний в рабочем объеме камеры поддерживалось давление не более  $5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.; температура стенок криоэкраний вакуумной камеры — минус (180—155)°С. Режим минимальных тепловых

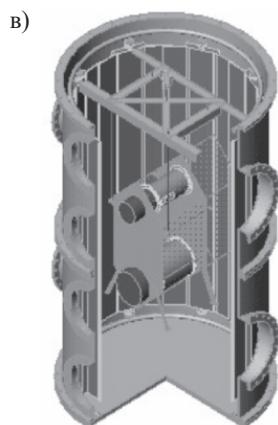
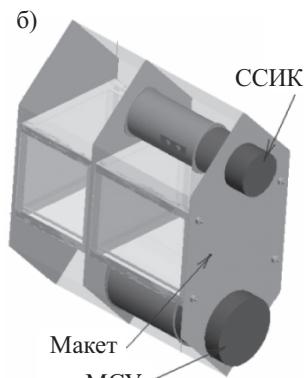


Рис. 2. Тепловой макет КА:  
а — общий вид; б — размещение ОЭП «МСУ» и «ССИК» на макете; в — расположение макета в вакуумной камере

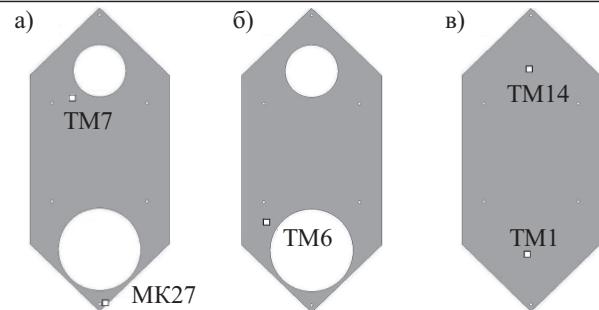


Рис. 3. Расположение термодатчиков на базисной (а) и установочной (б) плитах и на основании (в) макета КА

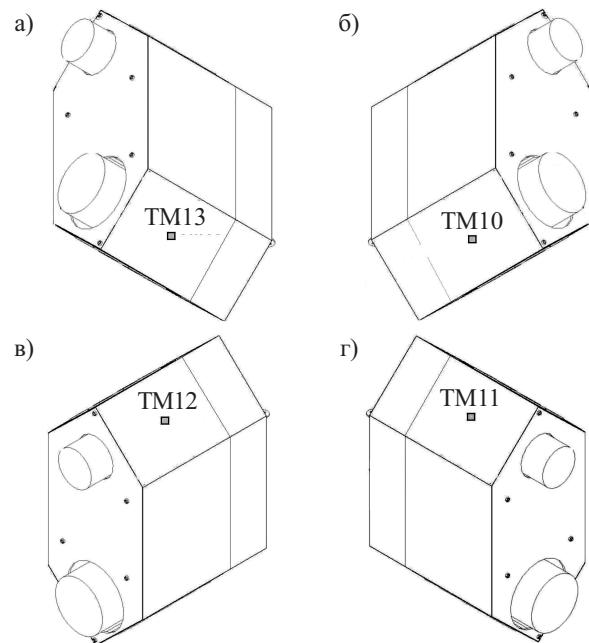


Рис. 4. Расположение термодатчиков на боковых экранах корпуса макета КА

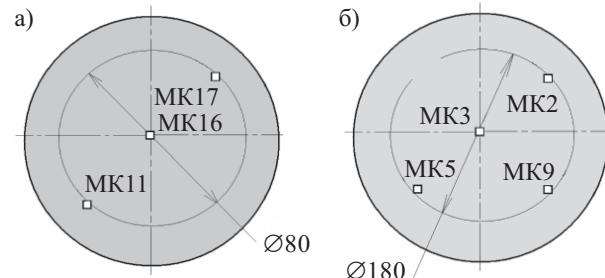


Рис. 5. Расположение термодатчиков на линзах ОЭП «ССИК» (а) и «МСУ» (б)

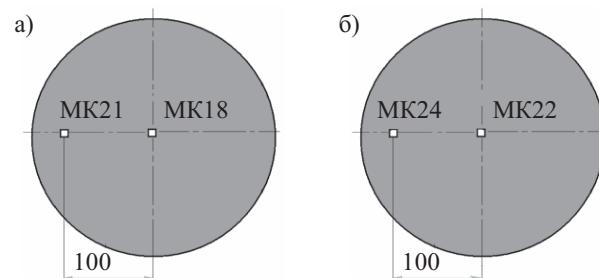


Рис. 6. Расположение термодатчиков на внутренней (а) и наружной (б) поверхностях верхнего иллюминатора

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

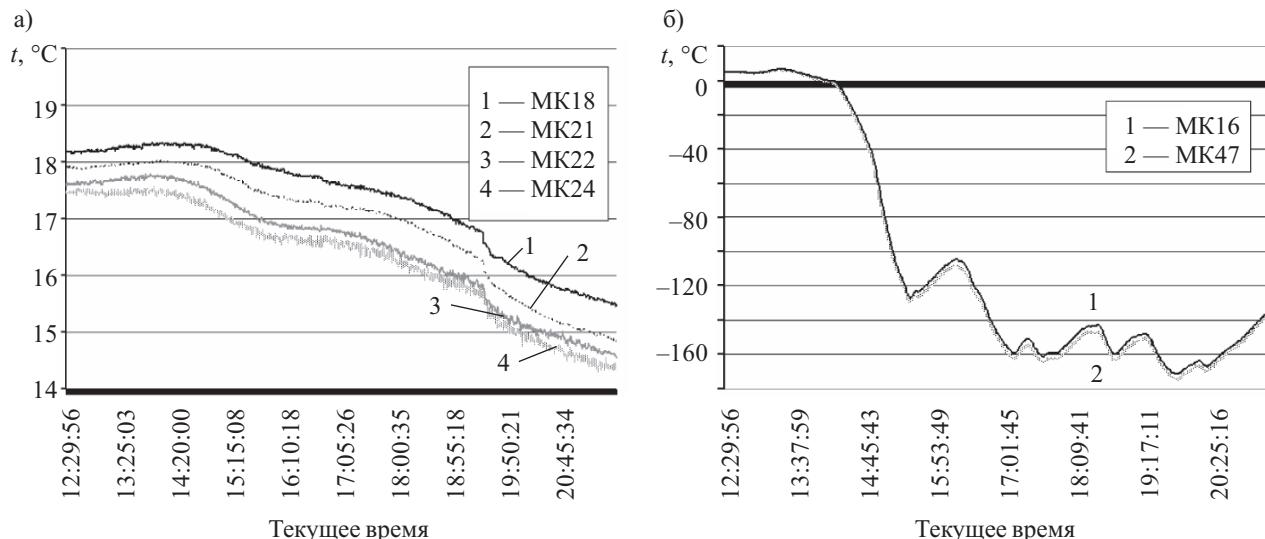


Рис. 7. Значения температуры на иллюминаторе (а) и на криоэкранах (б)

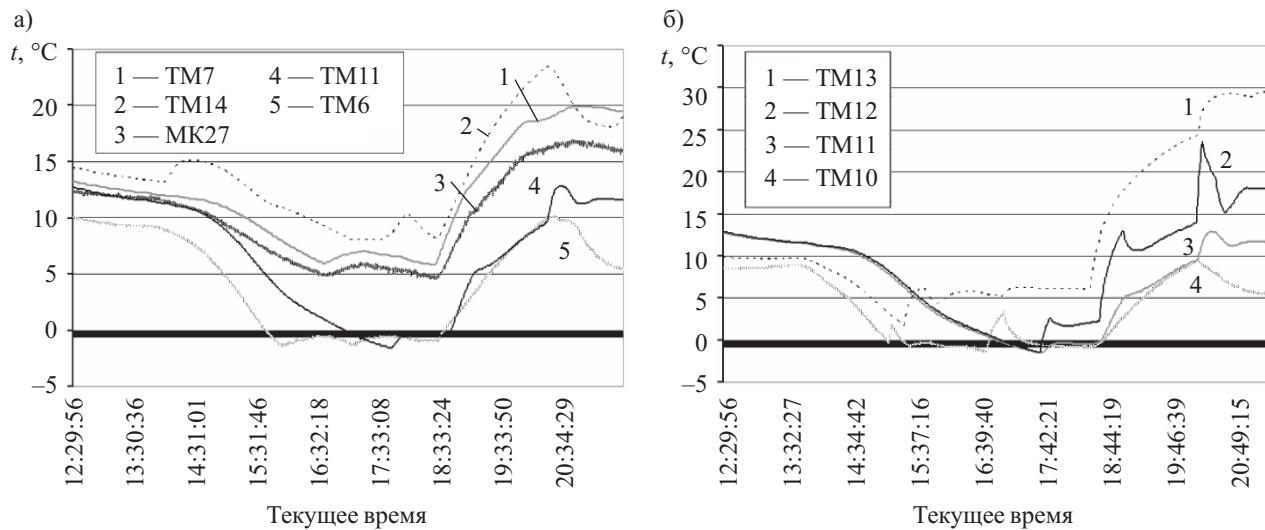


Рис. 8. Значения температуры на базисной и установочной плитах и на основании (а) и на боковых экранах корпуса (б)

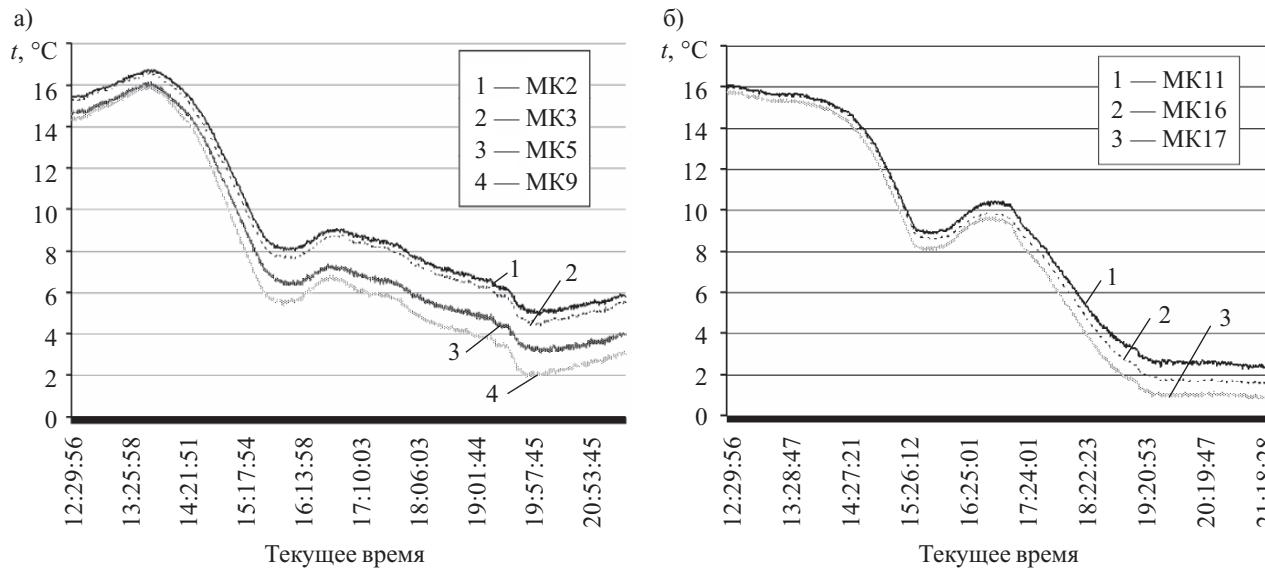


Рис. 9. Значения температуры на линзах ОЭП «МСУ» (а) и «ССИК» (б)

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

потоков обеспечивался при температуре базисной плиты  $(4\pm2,5)^\circ\text{C}$ , установочной —  $(0\pm2,5)^\circ\text{C}$ ; режим максимальных тепловых потоков — при  $(19\pm2,5)^\circ\text{C}$  на базисной плите и  $(6\pm2,5)^\circ\text{C}$  на установочной.

Имитаторы теплового излучения Земли располагались внутри камеры, имели световые зоны для оптической связи с ОЭП и воспроизводили собственное и отраженное излучения Земли.

Испытания проходили в следующей последовательности:

- в нормальных условиях измерялись положения фокальных плоскостей ОЭП «МСУ» и «ССИК»;
- определялись положения фокальных плоскостей ОЭП «МСУ» и «ССИК» в камере;
- осуществлялся выход термовакуумной камеры на рабочий режим с достижением давления  $5\cdot10^{-3}$  мм рт. ст.;
- осуществлялся выход ОЭП «МСУ» и «ССИК» в установившийся тепловой режим в выключенном состоянии при температуре платформы  $-5^\circ\text{C}$  и достижение интенсивности теплового излучения  $200 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ;
- включались системы термостабилизации ОЭП «МСУ» и «ССИК», настроенные на температуру  $20^\circ\text{C}$ ;
- определялось время выхода ОЭП в установившийся тепловой режим;
- определялась величина смещения фокальных плоскостей ОЭП «МСУ» и «ССИК» с помощью оптического стендса.

Результаты исследований представлены на рис. 7—9. Здесь показаны значения температуры  $t_i$  основных узлов, элементов макета и ОЭП для любого момента времени проводимых испытаний.

При тепловых испытаниях установившимся считался режим в камере, когда средняя температура на криоэкранах (рис. 7, б) составляла  $-160^\circ\text{C}$ , что соответствовало времени 17:22 и являлось началом отсчета для снятия рабочих оптических характеристик «МСУ» и «ССИК». В этот момент на поверхностях установочной и базисной плит поддерживались минимально допустимые по условиям опыта температуры соответственно 0 и  $4^\circ\text{C}$ , отвечающие показаниям термодатчиков ТМ6, ТМ7, МК27. Их графические зависимости представлены на рис. 8. В этом режиме линзы постепенно охлаждались, причем для

«ССИК» процесс охлаждения шел интенсивнее, чем для «МСУ», из-за различия в размерах. Для линз обоих приборов в этом режиме температура не становилась ниже  $1^\circ\text{C}$  (рис. 9). Минимальный по тепловым потокам режим длился около одного часа и считался завершенным в 18:22.

Наибольшие значения температуры на установочной и базовой плитах были достигнуты в 20:19 и составили соответственно 6 и  $19^\circ\text{C}$  (рис. 8), что отвечало режиму максимальных тепловых потоков излучений. Несмотря на то, что указанный режим длился около часа, температура на поверхностях плит не стабилизировалась, и испытание завершилось в 21:19. Из анализа рис. 8, 9 видно, что наиболее «холодными» поверхностями в испытаниях оказались линзы ОЭП. Температура стекол иллюминаторов камеры за период испытаний постепенно снижалась, однако была не ниже  $14^\circ\text{C}$  (рис. 7, а).

\*\*\*

Тепловые испытания оптико-электронных приборов «МСУ» и «ССИК», установленных на тепловом макете космического аппарата, с реализацией средних температур эксплуатации спутника МС-2-8 в двух основных режимах показали нормальное функционирование ОЭП в условиях, имитирующих открытый космос.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Козлов Л. В., Нусинов М. Д., Акишин А. И. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды. — М.: Машиностроение, 1971.

2. Мартынов Д. А. Моделирование тепловых воздействий при проведении испытаний оптико-электронных приборов в вакууме // Оптический журнал. — 1994. — № 11. — С. 23—26.

3. Копяткевич Р. М., Альтов В. В., Мишин Г. С. Тепловые режимы радиоэлектронных приборов космических аппаратов // Тр. Второй российской национальной конференции по теплообмену. — 1999. — Т. 1. — С. 129—132.

4. Рассамакин Б. М., Рогачев В. А., Хоминич В. И. и др. Экспериментальное моделирование тепловых режимов малогабаритных космических аппаратов и их внешних тепловых потоков. Часть 1. Термовакуумная установка ТВК-2,5 // Космічна наука і технологія. — 2002. — Т. 8, № 1. — С. 37—41.

5. Рассамакин Б. М., Рогачев В. А., Хайрнасов С. М. и др. Экспериментальное моделирование тепловых режимов эксплуатации оптико-электронного измерительного прибора для микроспутника // Там же. — 2003. — Т. 9, № 4. — С. 34—39.

### НОВЫЕ КНИГИ

#### НОВЫЕ КНИГИ



Динеш С. Дьюб. Электронника: Схемы и анализ. — М.: Техносфера, 2008. — 432 с.

Разработка и анализ электронных приборов и схем составляют неотъемлемую часть университетского курса физики. Книга представляет краткое, но всестороннее изложение данной темы. Освещены физические аспекты работы биполярных и полевых транзисторов, все схемы проанализированы с первооснов. Глава о производстве интегральных схем выделяет эту книгу из ряда аналогичных изданий. Простота и основательность изложения, большое количество примеров, задач и иллюстраций делают ее незаменимым пособием для студентов технических вузов

Е. Г. КОСТИН, д. т. н. А. В. ДЕМЧИШИН

Украина, г. Киев, Институт ядерных исследований,  
Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича  
E-mail: kostin@kinr.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
20.05 2008 г.

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

## ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК TiN И TiO<sub>2</sub> В ОБРАЩЕННОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ МАГНЕТРОНЕ МЕТОДОМ РЕАКТИВНОГО РАСПЫЛЕНИЯ

*Рассмотрена возможность контроля условий получения стехиометрических пленок TiN и TiO<sub>2</sub> по спектральным характеристикам плазмы магнетронного разряда и по изменению разрядного напряжения.*

Магнетронное распыление — один из наиболее применяемых методов осаждения функциональных покрытий в оптике и микроэлектронике. Метод позволяет с высокой эффективностью использовать материал катода, проводить распыление при относительно низких напряжениях (300—600 В) и обеспечивает достаточно высокую скорость осаждения пленок [1].

Обращенные (инвертированные) цилиндрические магнетроны отличаются от прямых магнетронов тем, что в них распыляются внутренние поверхности полых цилиндрических катодов и осаждение происходит со всех сторон на протяженные образцы сложной формы, размещенные внутри катода.

Целью настоящей работы является исследование параметров разряда и оптических спектральных характеристик плазмы обращенного цилиндрического магнетрона [2] для установления их взаимосвязи с парциальным давлением реактивных газов (азот и кислород), а также с составом и свойствами напыленных пленок нитрида и оксида титана.

### Экспериментальная установка

Разработанный магнетрон схематически представлен на **рис. 1**. Он состоит из водоохлаждаемого титанового катода 1 в виде полого цилиндра (диаметр 230 мм, высота 200 мм), вращаемой магнитной системы 2, 3, системы стержневых анодов 5 из немагнитной стали, вращаемых совместно с магнитной системой. В центре катода расположен держатель образца 4. Тубус 8 служит для вывода оптического излучения из разрядной плазмы.

Магнитная система набрана из постоянных магнитов 2 из SmCo, расположенных на магнитопроводе 3. Вращение (6 об/мин) магнитной системы и анодов осуществляется через герметичный ввод.

Постоянные магниты создают на поверхности катода арочное магнитное поле 7 величиной 0,03—0,05 Т. В целом, арочное поле образует над поверхностью катода замкнутую линию, имеющую форму

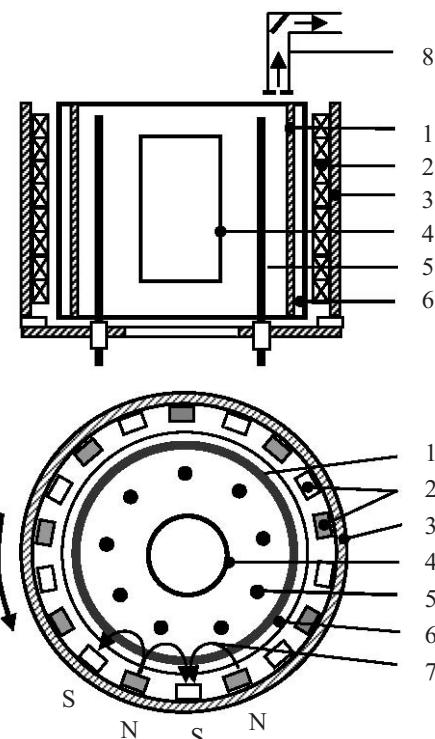


Рис. 1. Обращенный цилиндрический магнетрон:  
1 — катод; 2 — постоянные магниты; 3 — магнитопровод; 4 — образец (подложка); 5 — аноды; 6 — водоохлаждаемая полость; 7 — линии магнитного поля; 8 — тубус

меандра. Такую же форму имеет зона эрозии на катоде. Мощность разряда магнетрона — до 6 кВт.

При движении магнитов зона эрозии вращается вместе с магнитным полем, что обеспечивает равномерность распыления катода без образования эрозионных углублений. Это повышает коэффициент полезного использования материала катода до 80%, что является преимуществом по сравнению с планарными магнетронами.

Вторым преимуществом является стабильность параметров разряда во времени. Известно, что в планарном магнетроне по мере образования углублений на катоде концентрация плазмы в углублениях увеличивается, напряжение разряда ( $U_p$ ) и энергия ионов снижаются, изменяется скорость распыления и распределение толщины покрытия по поверхности подложки. Следствием этого является нарушение

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

воспроизводимости процесса распыления, т. к. в процессе работы для разной степени эрозии катода необходима будет различная корректировка тока разряда ( $I_p$ ).

Постоянство электрических параметров разряда особенно необходимо при реактивном осаждении пленок соединений, т. к. для многих соединений стехиометрический состав пленки получается в узком интервале значений  $U_p$  и потока реактивного газа. Величина этого «рабочего интервала» зависит, в том числе, и от геометрических размеров магнетронных систем и используемых мощностей разряда [3].

Третье преимущество рассматриваемого магнетрона состоит в том, что его геометрическая конфигурация создает более высокую, чем у планарных магнетронов, направленность потока распыляемого вещества на подложку.

Вакуум в камере получали турбомолекулярным насосом ТМН-500 и двухступенчатым форвакуумным агрегатом АВР-60 с насосом Рутса, что позволяло сохранять постоянную скорость откачки при напуске газов до давления  $8-9 \cdot 10^{-3}$  торр. Остаточное давление в камере —  $5 \cdot 10^{-6}$  торр. Плазмообразующим газом служил аргон, реактивными — азот и кислород. Каждый газ по отдельному каналу подавался от баллона со сжатым газом в камеру через регулируемый игольчатый клапан (натекатель). Перед натекателями размещались манометры, регистрирующие давление газов на входе натекателей с точностью 1%.

Нагрев образца перед напылением осуществлялся радиационным нагревателем, расположенным над магнетроном. Механизмом вертикального перемещения образец опускался в полость катода для напыления. Предварительный нагрев обеспечивал десорбцию паров воды с поверхности подложки, улучшение адгезии и уменьшение внутренних механических напряжений в покрытиях. Держатель образца мог быть цилиндрическим или в форме призмы, на гранях которой располагались плоские подложки размером  $60 \times 100$  мм.

При получении пленок химических соединений необходим контроль содержания реактивного газа в вакуумной камере. Точный контроль по давлению с помощью вакуумметров в этом случае затруднен, т. к. давление реактивного газа существенно (иногда почти на порядок) меньше, чем давление плазмообразующего газа. Разделить вклады двух газов и газов остаточной атмосферы в общем давлении, регистрируемом вакуумметром, с достаточной точностью невозможно. Поэтому эффективным методом контроля может быть спектральный анализ оптического излучения разрядной плазмы магнетрона. Для его осуществления в работе применялся разработанный в Институте физики НАН Украины оптический спектрометр Plasma Spec.

Излучение плазмы выходило через тубус 8 с поворотным алюминиевым зеркалом в кварцевое окно вакуумной камеры. Стенки тубуса защищают зеркало и окно от запыления. Входная диафрагма на торце тубуса имеет отверстие  $\varnothing 2$  мм. При таком диаметре поворотное зеркало не изменяло коэффици-

ент отражения вследствие запыления в течение 20 ч. С другой стороны окна излучение через собирающую линзу поступало на вход оптоволоконного кабеля и по нему в оптический спектрометр. Дифракционная решетка спектрометра раскладывала излучение в спектр, который регистрировался линейкой приборов с зарядовой связью (ПЗС-линейкой). Сигналы с ПЗС-линейки выводились на компьютер. Регистрировался как спектр в целом, так и выбранные линии спектра в диапазоне длины волны 350—820 нм и временем записи 5 мс.

### Результаты эксперимента

По обзорным спектрам разряда проведена идентификация линий излучения и выбраны отдельно расположенные линии  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $Ti$ ,  $Ar$ . Для идентификации линий и выделения накладывающихся линий ( $Ti$  с  $Ar$ ,  $N_2$ ,  $O_2$  и  $Ar$  с  $N_2$ ,  $O_2$ ) в камере зажигали тлеющий разряд в чистом азоте, аргоне или кислороде между вспомогательными электродами в режиме практически отсутствующего распыления электродов. По динамике изменения интенсивности выбранных линий (4 линии одновременно) наблюдали за процессом напыления и контролировали постоянство скорости напуска реактивного газа и аргона в рабочем интервале.

На рис. 2 представлены зависимости интенсивности  $F$  некоторых спектральных линий  $Ti$ ,  $Ar$  и  $N_2$  от величины потока азота  $Q(N_2)$  в камеру.

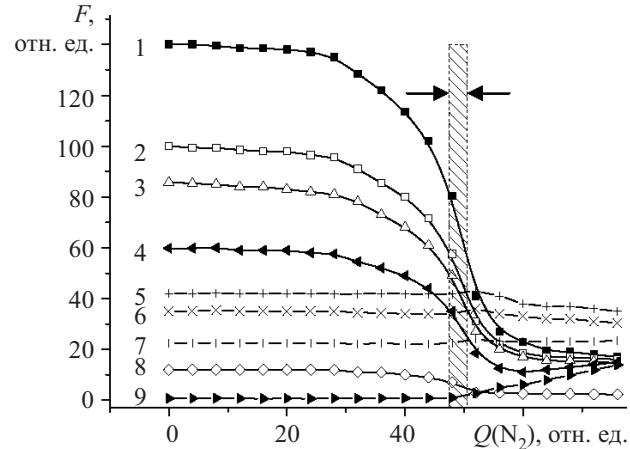


Рис. 2. Зависимости интенсивности излучения линий  $Ti$ ,  $Ar$ ,  $N_2$  от величины потока азота при постоянном токе разряда:  $Ti$ : 1 — 468,2 нм; 2 — 501,4 нм; 3 — 521,04 нм; 4 — 375,29 нм; 5 — 455,24 нм;  $Ar$ : 5 — 603,2 нм; 6 — 687,13 нм; 7 — 641,6 нм;  $N_2$ : 9 — 357,7 нм (стрелками показана область осаждения пленок TiN)

Видно, что характер всех линий  $Ti$  (1, 2, 3, 4, 8) идентичен: интенсивность излучения уменьшается с ростом потока  $N_2$  до некоторого минимума. Это связано с хемосорбцией азота на поверхности титанового катода и образованием нитридов, что вызывает уменьшение скорости распыления титана, а также с меньшим коэффициентом распыления титана ионами азота по сравнению с ионами аргона. В результате уменьшается концентрация атомов титана в разрядном промежутке магнетрона и, соответственно,

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

интенсивность его излучения. Кроме того, при росте концентрации  $N_2$  в плазме уменьшение интенсивности линий титана может происходить из-за потерь энергии электронов на возбуждение электронно-колебательных полос молекулярного азота и его диссоциацию.

Интенсивность спектральной линии Ti 375,29 нм (кривая 4) после снижения до минимума снова возрастает. Это связано с тем, что вблизи этой линии Ti есть линия  $N_2$  375,54 нм. Увеличение вклада ее краев в интенсивность линии Ti регистрируется спектрометром. При малых потоках азота в камеру интенсивность этой линии  $N_2$  незначительна. Одной из отдельно расположенных линий молекулярного азота является линия с длиной волны 357,69 нм. Ее поведение с ростом  $Q(N_2)$  представлено кривой 9. Интенсивность этой линии остается низкой во всей области потоков, вплоть до рабочего интервала (заштрихован), и растет только в зоне, где стехиометрия пленок больше 1. Сколько-нибудь значительных пиков других линий азота в спектре при потоке меньшем, чем поток в рабочем интервале, не обнаружено. Поэтому для контроля состава пленок  $TiN_x$  были выбраны не линии азота, а интенсивные линии Ti (468,19 и 503,59 нм) без близко расположенных линий других элементов.

После пробных напылений пленок  $TiN_x$  контроля их по цвету, микротвердости и рентгенограммам был выбран узкий рабочий интервал (см. рис. 2) потока реактивного газа, в котором эти свойства получаемых пленок соответствовали стехиометрическому соединению TiN. Рабочий интервал потока азота находится вблизи точки перелома интенсивности излучения линии азота (кривая 9) и перед минимумом интенсивности излучения линий Ti. В дальнейшем этот поток контролировался по уровню интенсивности излучения выбранных линий Ti. Интенсивность  $F=700$  отн. ед. в пределах рабочего интервала потока азота изменялась на  $\pm 40$  отн. ед., т. е. на  $\pm 5\text{--}6\%$ .

Постоянство потока Ar контролировалось по интенсивности его линий. Для этого необходимо выбирать линии Ar не слишком близкие к линиям Ti. Так, например, пик Ar с длинами волн 430,01, 433,35 и 434,52 нм близки к пикам Ti с длинами волн, соответственно, 430,05, 433,79 и 434,43 нм. В этом случае может происходить кажущееся уменьшение пика Ar из-за вклада краев близкой линии Ti, которая уменьшается при напуске  $N_2$ . Нами выбраны отдельно расположенные линии Ar 420,07 и 696,54 нм.

Контроль стехиометрического состава напыляемых пленок TiN и  $TiO_2$  можно также проводить путем измерения разрядных характеристик. При реактивном распылении режим разряда задается тремя независимыми величинами: током разряда  $I_p$ , потоком  $Q(P)$  плазмообразующего газа и потоком  $Q(R)$  реактивного газа. Напряжение разряда, давление в камере и интенсивность излучения линий  $N_2$ ,  $O_2$ , Ti, Ar являются функциями этих величин. Поэтому величину  $U_p$  как функцию потока реактивного газа можно использовать для контроля получения стехиометрических пленок при неизменном токе разряда  $I_p$ .

При обоих методах контроля необходимо откачивать камеру до практически предельного давления остаточных газов, чтобы их фоновое давление было фиксированным, и тренировать катод магнетрона перед напылением. Это связано с влиянием фоновых остаточных газов и поверхностных загрязнений катода на величины  $U_p$  и  $F$ .

На рис. 3 показано изменение величин  $U_p$  и  $F(Ti)$  от времени после включения разряда при тренировке катода и от  $Q(N_2)$ . Видно, что сразу после включения напряжение разряда повышенное, а интенсивность излучения понижена, причем значительно, по сравнению с указанной выше точностью ее поддержания в рабочей точке. Другими словами, примеси остаточных газов влияют на  $F(Ti)$  аналогично напуску  $N_2$ . Присутствие течи, а следовательно, и кислородсодержащих примесей ( $H_2O$ ,  $O_2$ ) в остаточном газе, приводит к появлению пурпурного оттенка у пленок TiN и росту их электросопротивления. Эти примеси реагируют с титаном активнее азота из-за выгодного соотношения величин энталпии образования соединений. Величина энталпии образования при 298 К для TiN — 337,7,  $TiO$  — 542,7,  $TiO_2$  — 849,1 кДж/моль, энтропия — соответственно 30,31; 34,8; 72,32 Дж/(моль·К) [4].

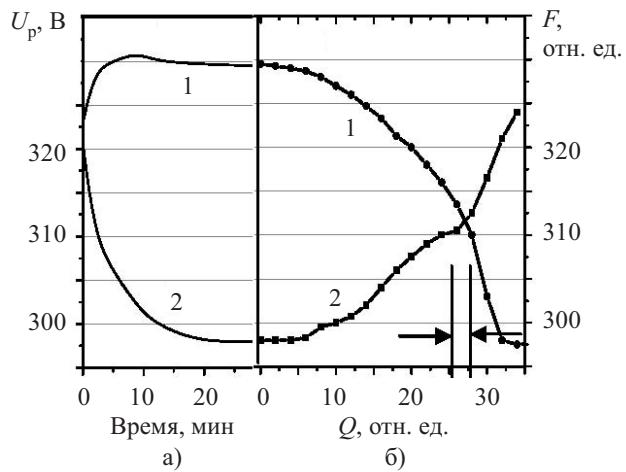


Рис. 3. Зависимости интенсивности линии Ti 468,2 нм (1) и напряжения разряда (2) от времени после включения разряда (а) и от потока азота (б) при  $I_p=15$  А (стрелками показана область осаждения пленок TiN)

Изменения на зависимостях  $U_p$  и  $F(Ti)$  от потока азота можно сопоставить с составом получаемых пленок. В области рабочего интервала потока азота, указанного стрелками, начинается резкое возрастание  $U_p$  и более быстрый спад (судя по изменению наклона кривой 1) интенсивности  $F(Ti)$ . В этой же области (см. рис. 2, кривая 9) начинается рост интенсивности  $F(N_2)$  линии азота с длиной волны 357,7 нм, вызванный увеличением парциального давления азота в камере. Он свидетельствует о насыщении азотом осаждаемой пленки титана (образованием TiN) и понижением скорости откачки азота этой пленкой.

Таким образом, контроль процесса осаждения пленок TiN можно осуществлять, поддерживая по-

ток азота таким, чтобы величина  $U_p$  находилась вблизи точки перегиба кривой 2 разрядного напряжения.

Минимум на кривой 1 находится правее рабочего интервала потока азота и соответствует уменьшению поступления атомов Ti в плазму (уменьшению скорости эрозии катода) из-за образования на катоде нитридов. Так как катод бомбардируется аргоном, он находится в условиях ионной очистки от хемосорбирующегося на нем азота. Поэтому нитридизация катода наступает позже, чем осаждаемой пленки. При осаждении в условиях правее выделенного на рис. 3 рабочего участка пленки постепенно начинают приобретать красноватый оттенок до коричневого и бурого цвета в области минимума на кривой 1, что характерно для субстехиометрического соединения  $TiN_x$  при  $X > 1$ .

Скорость осаждения пленок TiN на расстоянии от катода 95 мм составляет 39 нм/мин, на расстоянии 60 мм — 96 нм/мин.

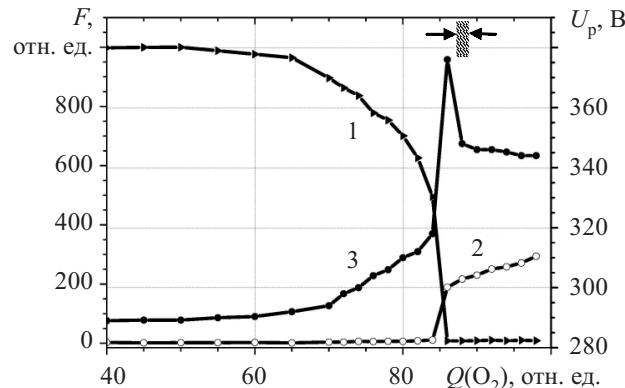


Рис. 4. Зависимости интенсивности линий Ti 468,2 нм (1), O<sub>2</sub> 777,82 нм (2) и напряжения разряда (3) от потока кислорода при  $I_p=15$  А  
(стрелками показана область осаждения пленок TiO<sub>2</sub>)

На рис. 4 показаны зависимости  $U_p$  и интенсивности спектральных линий Ti и O<sub>2</sub> от потока кислорода. В отличие от аналогичных кривых для азота, здесь  $U_p$  характеризуется существенно большим ростом и узким максимумом перед областью получения стехиометрических пленок TiO<sub>2</sub>. В области пика  $U_p$  интенсивность линии Ti падает до незначительной величины, а интенсивность линии O<sub>2</sub> скачкообразно растет. Последнее обстоятельство указывает на то, что насыщение основной массы осаждаемой пленки кислородом происходит очень быстро в этой области значений потока кислорода. Из-за слабой интенсивности линий Ti в рабочем интервале потока кислорода контроль процесса осаждения пленок TiO<sub>2</sub> проводился по разрядному напряжению после прохождения им точки максимума или по интенсивности линии O<sub>2</sub> после прохождения участка скачкообразного роста. Отметим, что поверхность анодов, которые расположены ближе, чем образец, к эмитирующему атомы титана катоду, остается проводящей и способной поддерживать горение разряда.

Скорость осаждения пленок TiO<sub>2</sub> на расстоянии от катода 95 мм составляет 7 нм/мин, на расстоянии 60 мм — 22 нм/мин.

### Свойства пленок

Микротвердость пленок нитрида титана была измерена на приборе Микрон ГАММА, позволяющем определять микротвердость по кривой нагружения. Чтобы избежать влияния подложки, измерения проводились при малых нагрузках. Максимальная глубина проникновения индентера составляла 1 мкм при толщине пленок 3—4 мкм. Микротвердость по Виккерсу составила от 17,6 до 22,8 ГПа. На рис. 5 показан «коридор» этих значений и данные [5, 6] по зависимости микротвердости от состава соединения  $TiN_x$ . Здесь видно, что полученные пленки имеют состав  $0,92 \leq X \leq 1$ . При приложении к подложке отрицательного потенциала  $U_p=-200$  В микротвердость пленок составила 20—23 ГПа, что указывает на уплотнение структуры под воздействием вытягиваемых на подложку ионов. Отметим, что рентгенофазовый анализ всех пленок в указанном диапазоне микротвердости показывает наличие только фазы TiN.

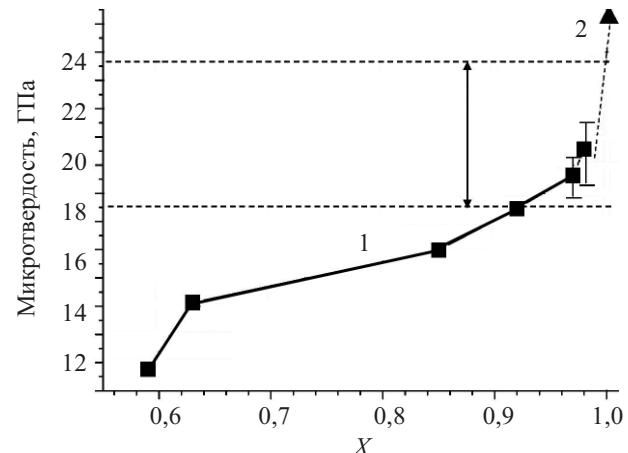


Рис. 5. Зависимость микротвердости пленок TiN<sub>x</sub> от состава:  
1 — данные [5]; 2 — данные [6]; стрелки показывают диапазон данных настоящей работы

На рис. 6 представлены относительные интенсивности  $J(hkl)/J(111)$  дифракционных пиков рентгенограмм порошка природного минерала TiN осборнита [7] и пленки TiN на стеклянной подложке. Зерна пленки нитрида титана ориентированы в направлениях <111> и <311> перпендикулярно поверхности подложки и произвольно в ее плоскости. Ориентация <311> проявляется не всегда и с ростом температуры подложки исчезает. Подача отрицательного потенциала на подложку приводит к совершенствованию ориентации <111>, что выражается в уменьшении разброса углов между направлением <111> и нормалью к поверхности подложки.

Методом эллипсометрии определен показатель преломления пленок TiO<sub>2</sub> на длине волны 600 нм. Он составил 2,37 для пленок толщиной 55—70 нм и уменьшался до 2,33 для пленок толщиной 250—300 нм. Рентгенофазовый анализ пленок TiO<sub>2</sub> показал, что они имеют решетку анатаза. В работах [8, 9] для планарных магнетронов постоянного тока показатель преломления пленок TiO<sub>2</sub> составил 2,3 и 2,32,

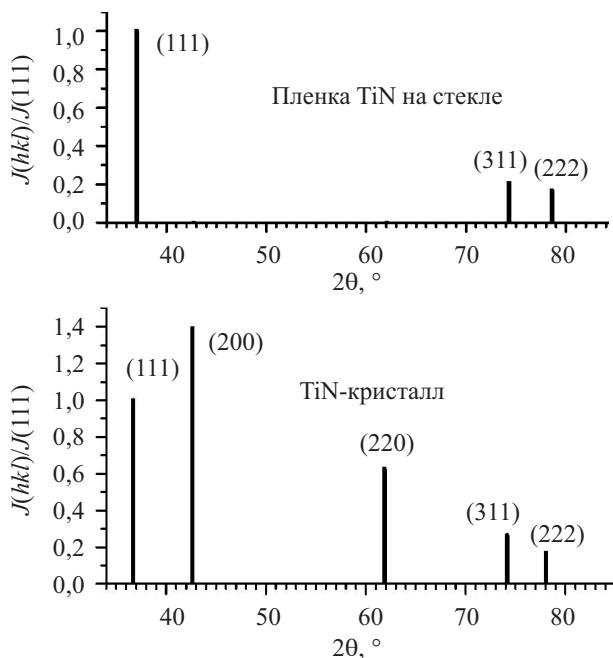


Рис. 6. Интенсивность дифракционных пиков рентгенограмм порошка природного минерала TiN осборнита и пленки TiN на стеклянной подложке (Излучение  $\text{CuK}\alpha$ ,  $\theta$  — угол дифракции)

соответственно. Поскольку полученные нами пленки однофазны (фазы рутила и брукита на рентгенограммах отсутствуют), то по показателю преломления можно оценить относительную плотность пленок. Для этого используем формулу Клаузуса–Маскотти [10]:

$$(n^2-1)/[(n^2+1)\cdot N]=\text{const},$$

где  $n$  — показатель преломления;

$N$  — плотность молекул.

Показатель преломления бесспористого поликристаллического анатаза 2,52 [11]. Тогда относительная плотность пленок при  $n=2,37$  и  $n=2,33$  составляет 95% и 93%, соответственно.

### Заключение

По спектрам излучения плазмы магнетронного разряда в аргоне с добавлением азота и кислорода проведена идентификация линий газовых компонентов и распыляемого вещества катода (титана) в диапазоне значений длины волны 350—820 нм.

Исследовано влияние величины потока реагирующих газов ( $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ) на напряжение разряда обра-

щенного цилиндрического магнетрона и на интенсивность излучения атомов Ti и молекул реагирующих газов. По характеру изменения интенсивности спектральных линий и напряжения разряда определены оптимальные условия синтеза покрытий TiN и  $\text{TiO}_2$  стехиометрического состава. Оптический контроль с помощью спектрометра с ПЗС-линейкой является более информативным, т. к. позволяет одновременно регистрировать поведение сразу нескольких компонентов газовой среды, в то время как электрические разрядные характеристики достаточно сложны в интерпретации.

На примере пленок  $\text{TiO}_2$  показано, что в обращенном цилиндрическом магнетроне постоянного тока можно осуществлять осаждение пленок изолирующих материалов. При этом не требуются высокочастотные источники питания и сложные устройства для их согласования с разрядной камерой.

Приведенные результаты исследований могут быть полезны для создания технологии получения стехиометрических пленок бинарных соединений.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Данилин Б. С., Сырчин В. К. Магнетронные распылительные системы.— М.: Радио и связь, 1992.
2. Декларац. пат. 1994. Циліндричний магнетрон з внутрішньою бічною розпорошувальною поверхнею / Гончаров А. А., Демчишин А. В., Костін Є. Г. та ін.— 2003.— Бюл. № 9.
3. Сейдман Л. А. Получение пленок нитрида титана реактивным магнетронным распылением // Электронная техника. Сер. Полупроводниковые приборы.— 1985.— Вып. 2.— С. 69—75.
4. NIST Chemistry Webbook, N 69.— National Institute of Standards and Technology, 1998.— <http://webbook.nist.gov>.
5. Самсонов Г. В. Нитриды.— Киев: Наукова думка, 1969.
6. Stoun D. S., Yoder K. B., Sproul W. D. Hardness and elastic modulus of TiN based on continuous indentation technique and new correlation // Journal of Vac. Sci. and Technol. A: Vacuum, Surfaces, and Films.— 1991.— Vol. 9.— P. 2543—2547.
7. Чичагов А. В. Информационно-вычислительная система по кристаллической структуре минералов // Кристаллография.— 1990.— Т. 35, № 1.— С. 610—616.
8. Munz W. D., Heimbach J., Reineck S. R. Reactive high rate sputtering of oxides. Thin Sol. Films.— 1981.— Vol. 86.— P. 175—181.
9. Davis J. A., Sproul W. D., Christie D. J. High power pulse reactive sputtering of  $\text{TiO}_2$  // 47 Annual Conference Proceeding.— USA, Dallas.— 2004.— P. 215—218.
10. Фейнман Р., Лейтон Р., Сенду М. Фейнмановские лекции по физике: Физика сплошных сред. Т. 7.— М.: Мир, 1966.
11. Kingery W. D., Bowen H. K., Uhlmann D.R. Introduction to Ceramics.— New York: Wiley, 1976.

К. ф.-м. н. Н. Б. ГОРЕВ, к. ф.-м. н. И. Ф. КОДЖЕСПИРОВА,  
к. ф.-м. н. Е. Н. ПРИВАЛОВ

Украина, г. Днепропетровск, Институт технической механики  
НАНУ и НКАУ  
E-mail: gorev57@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
04.04 2008 г.

Оппонент к. т. н. В. А. МОСКАЛЮК  
(НТУУ «КПИ», г. Киев)

## ВОЛЬТ-ФАРАДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННЫХ СТРУКТУР GaAs

*Выявлены особенности вольт-фарадных характеристик ионно-имплантированных структур GaAs, обусловленные наличием глубоких центров захвата.*

Ионная имплантация — один из важнейших методов изготовления приборов и интегральных схем на основе GaAs. Поскольку имплантация легирующей примеси производится непосредственно в полуизолирующую подложку, компенсированную глубокими центрами, эти центры могут оказывать заметное влияние на характеристики ионно-имплантированных структур, в том числе и на вольт-фарадную характеристику, которая широко используется для определения параметров полупроводниковых структур и приборов на их основе.

Существующие методы расчета барьера емкости ионно-имплантированных структур основаны на предположении, что на границе между областью обеднения барьера Шоттки и нейтральным каналом концентрация свободных носителей изменяется скачком от нуля до концентрации легирующей примеси  $N_d$  [1], которое перестает выполняться при смыкании этой области обеднения с областью объемного заряда на границе имплантированного слоя с подложкой [2]. Целью данной работы является выявление особенностей вольт-фарадных характеристик ионно-имплантированных структур, обусловленных наличием глубоких центров.

Низко- и высокочастотная барьера емкость  $C_{LF}$  и  $C_{HF}$  следующим образом выражается через напряженность электрического поля  $E_b$  на границе «металл—полупроводник»:

$$C_{LF} = \epsilon \epsilon_0 S \frac{\delta E_b}{\delta V_{rev}}, \quad C_{HF} = \epsilon \epsilon_0 S \frac{\delta E_b}{\delta V_{rev}} \Big|_{\delta n_t = 0}, \quad (1)$$

где  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;  
 $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная;  
 $S$  — площадь барьера контакта;  
 $V_{rev}$  — обратное напряжение на барьере Шоттки;  
 $\delta E_b$  и  $\delta n_t$  — соответственно изменения напряженности электрического поля  $E_b$  и концентрации захваченных носителей  $n_t$  при изменении  $\delta V_{rev}$  обратного напряжения на барьере Шоттки.

Определим зависимость напряженности электрического поля  $E_b$  на границе «металл—полупроводник»

«ник» от обратного напряжения  $V_{rev}$  на барьере Шоттки. Для этого рассмотрим структуру, полученную имплантацией донорной примеси в полуизолирующую подложку, содержащую мелкие доноры с концентрацией  $N_s$  и компенсирующие их глубокие электронные центры захвата акцепторного типа с концентрацией  $N_p$ , параметр Шокли–Рида которых (концентрация свободных носителей в случае, когда уровень Ферми совпадает с энергетическим уровнем глубокого центра) равен  $n_1$ . Профиль концентрации имплантированной донорной примеси имеет гауссов вид:

$$N_d(x) = N_p \exp \left\{ - \left[ \left( x - R_p \right) / \sigma \sqrt{2} \right]^2 \right\},$$

где  $x$  — координата, отсчитываемая от поверхности полупроводника;

$N_p$  — максимальная концентрация имплантированных доноров;

$R_p$  — средняя проекция пробега ионов;

$\sigma$  — среднеквадратичное отклонение проекции.

На поверхность структуры нанесен контакт Шоттки, к которому приложено обратное напряжение  $V_{rev}$ . Распределение напряженности электрического поля  $E$  в структуре описывается уравнением Пуассона:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0} [n + n_t - N_d(x) - N_s], \quad (2)$$

где  $q$  — заряд электрона;

$n$  — концентрация свободных носителей;

$n_t$  — концентрация захваченных носителей;

$$n_t = N_p n / (n + n_t).$$

Поскольку к барьера приложено обратное напряжение, ток, протекающий через барьер, пренебрежимо мал и, следовательно, квазиуровень Ферми в нейтральной части подложки постоянен. Согласно диодной теории барьера Шоттки, которая справедлива для полупроводников с высокой подвижностью, он постоянен и в области обеднения барьера и смещен относительно уровня Ферми в металле на величину  $qV_{rev}$ . В силу постоянства квазиуровня Ферми уравнение непрерывности тока принимает вид

$$\frac{dn}{dx} = \frac{q}{kT} n E, \quad (3)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;

$T$  — абсолютная температура.

## МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

В рамках диодной теории барьера Шоттки граничное условие на границе «металл—полупроводник» ( $x=0$ ) имеет вид

$$V_{rev} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_c}{n(0)} - \Phi_b / q, \quad (4)$$

где  $N_c$  — эффективная плотность состояний в зоне проводимости полупроводника;  
 $n(0)$  — концентрация свободных носителей на границе «металл—полупроводник»;  
 $\Phi_b$  — высота барьера со стороны металла.

Еще одно граничное условие, для глубины подложки, имеет вид

$$E \rightarrow 0 \Leftrightarrow n \rightarrow n_{sub}, \quad (5)$$

где  $n_{sub}$  — концентрация свободных носителей в глубине подложки, связанная с  $N_p, N_s, n_1$  условием электронейтральности  $n_{sub} + N_t n_{sub} / (n_{sub} + n_1) = N_s$ .

Уравнения (2), (3) с граничными условиями (4), (5) представляют собой нелинейную краевую задачу, решение которой позволяет найти искомую напряженность электрического поля на границе «металл—полупроводник».

Как правило, для решения нелинейных краевых задач используются различные итерационные методы [3]. В данном же случае специфика задачи позволяет свести ее к задаче Коши, не прибегая к итерациям. Дело в том, что на границе имплантированного слоя и подложки имеется область встроенного объемного заряда (переход «канал—подложка») [2]. В силу того, что дебаевская длина в компенсированной полуизолирующей подложке намного больше дебаевской длины в имплантированном слое, эта область простирается в подложку на значительное расстояние, превосходящее ширину области легирования.

Вне области легирования уравнение (2) принимает вид

$$\frac{dE}{dx} = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0} \left( n + N_t \frac{n}{n + n_1} - N_s \right). \quad (6)$$

Исключив координату  $x$  из уравнений (3) и (6), получим

$$\frac{dE}{dn} = \frac{kT}{\epsilon \epsilon_0} \frac{n + N_t n / (n + n_1) - N_s}{nE}. \quad (7)$$

Уравнение (7) может быть легко решено, и с учетом условия (5) дает следующее соотношение между  $E$  и  $n$ :

$$E = \frac{\sqrt{2}kT}{ql_{sub}} \operatorname{sgn}(n_{sub} - n) \times \left( \frac{n - n_{sub}}{N_t} + \ln \frac{n + n_1}{n_{sub} + n_1} - \frac{N_s}{N_t} \ln \frac{n}{n_{sub}} \right)^{1/2}, \quad (8)$$

$$\text{где } l_{sub} = \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 kT}{q^2 N_t}}.$$

Теперь мы можем выбрать некоторую точку  $x_{in}$  в подложке вне области легирования ( $x_{in} - R_p \gg \sigma$ ), зафиксировать некоторое значение  $n_{in}$  концентрации свободных носителей, найти из (8) соответствующее ему значение напряженности электрического поля  $E(n_{in})$  и затем решить уравнения (2), (3) с начальными условиями

$$E(x_{in}) = E(n_{in}), \quad n(x_{in}) = n_{in}.$$

Это позволяет варьируя  $n_{in}$  получить зависимость  $E_b(V_{rev})$ , а следовательно, и  $C_{LF}(V_{rev})$  в параметрической форме.

Найдем теперь высокочастотную емкость  $C_{HF}$ .

Пусть обратное напряжение  $V_{rev}$  изменилось на малую величину  $\delta V_{rev}$  столь быстро, что концентрация захваченных носителей  $n_t$  измениться не успела, т. е.  $\delta n_t = 0$ . Представим  $E$  и  $n$  при обратном напряжении  $V_{rev} + \delta V_{rev}$  в виде  $E = E_0 + \delta E, n = n_0 + \delta n$ , где  $E_0, n_0$  — решение системы (2), (3) при обратном напряжении  $V_{rev}$ , полученное описанным выше методом. С учетом условия  $\delta n_t = 0$ , линеаризация уравнений (2), (3) дает

$$\frac{d}{dx} \delta E = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0} \delta n; \quad (9)$$

$$\frac{d}{dx} \delta n = \frac{q}{kT} (n_0 \delta E + E_0 \delta n). \quad (10)$$

Линеаризованные граничные условия (4), (5) принимают вид

$$\delta E \rightarrow 0 \Leftrightarrow \delta n \rightarrow 0; \quad (11)$$

$$\delta V_{rev} = -\frac{kT}{q} \frac{\delta n(0)}{n_0(0)}. \quad (12)$$

Если известно решение  $E_0, n_0$ , то численное решение линейной краевой задачи (9)–(12) может быть легко получено стандартными неитерационными методами, например, методом суперпозиции [3], после чего высокочастотная емкость  $C_{HF}$  находится по формуле (1).

Типичные рассчитанные зависимости низко- и высокочастотной барьерной емкости  $C_{LF}$  и  $C_{HF}$  ионно-имплантированной структуры GaAs от обратного напряжения  $V_{rev}$  на барьере Шоттки для различных значений концентрации глубоких центров  $N_t$  при фиксированных параметрах легирования  $N_p, R_p, \sigma$  приведены на **рис. 1** ( $N_p = 1,64 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;  $R_p = 0,123 \text{ мкм}$ ;  $\sigma = 0,051 \text{ мкм}$ ;  $N_s = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ;  $n_{sub} = 10^9 \text{ см}^{-3}$ ;  $\Phi_b = 0,8 \text{ эВ}$ ;  $S = 300 \text{ мкм}^2$ ;  $T = 300 \text{ К}$ ).

Как видно из вольт-фарадных характеристик, глубокие центры оказывают значительное влияние как на низко-, так и на высокочастотную барьерную емкость. Так, на низкочастотной вольт-фарадной зависимости имеется участок роста емкости, наклон которого уменьшается с ростом концентрации глубоких центров. Появление этого участка, как и в случае эпитаксиальных структур [4–6], обусловлено увеличением скорости изменения заряда барьера

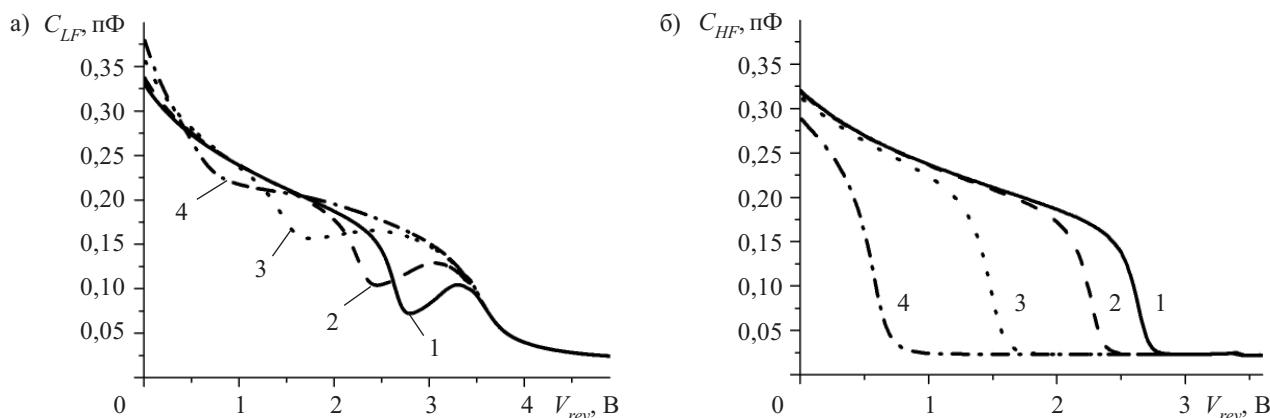


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики низкочастотной (а) и высокочастотной (б) барьерной емкости ионно-имплантированной структуры GaAs для различных значений  $N_t$ :  
1 —  $4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ; 2 —  $10^{16}$ ; 3 —  $3 \cdot 10^{16}$ ; 4 —  $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ;

Шоттки с обратным напряжением с началом интенсивного опустошения глубоких центров. Отличие же от эпитаксиальных структур заключается в том, что с увеличением концентрации глубоких центров этот участок исчезает. Это связано с тем, что ионно-имплантированные структуры содержат глубокие центры не только в полуизолирующей подложке, но и в самом имплантированном слое, и поэтому опустошение глубоких центров с изменением обратного напряжения происходит при всех обратных напряжениях, а не только при которых область объемного заряда барьера Шоттки достигает перехода «канал—подложка».

Что касается высокочастотной вольт-фарадной характеристики, то она имеет участок резкого падения емкости, который с увеличением концентрации глубоких центров сдвигается в сторону более низких обратных напряжений. Такое поведение емкости объясняется резким падением концентрации свободных носителей на границе канала. С увеличением же концентрации глубоких центров канал сужается вследствие расширения области объемного заряда перехода «канал—подложка», и поэтому падение емкости начинается при меньших обратных напряжениях.

\*\*\*

Таким образом, показано, что на вольт-фарадные характеристики ионно-имплантированных структур

GaAs значительное влияние оказывают глубокие центры захвата. Особенности вольт-фарадных характеристик, обусловленные наличием глубоких центров, могут быть использованы для оценки концентрации этих центров по вольт-фарадным измерениям в исходных полупроводниковых пластинах.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия.— М.: Мир, 1991.
2. Костылев С. А., Прохоров Е. Ф., Уколов А. Т. Явления токопереноса в тонкопленочных арсенидгаллиевых структурах.— Киев: Наукова думка, 1990.
3. На Ц. Вычислительные методы решения прикладных граничных задач.— М.: Мир, 1982.
4. Горев Н. Б., Костылев С. А., Макарова Т. В. и др. Вольт-фарадные характеристики тонкопленочных структур  $n$ -GaAs // Физика и техника полупроводников.— 1992.— Т. 26, № 5.— С. 861—867.
5. Kostylev S. A., Prokhorov E. F., Gorev N. B. et al. Low-frequency capacitance-voltage characterization of deep levels in film-buffer layer-substrate GaAs structures // Solid-State Electronics.— 1999.— V. 43, N 1.— P. 169—176.
6. Gonzalez-Hernandez J., Prokhorov E., Gorev N. B. et al. Non-destructive technique for the characterization of deep traps at interlayer interfaces in thin-film multilayer semiconductor structures // Journal of Vacuum Science & Technology B.— 1999.— V. 17, N 5.— P. 2357—2360.

#### НОВЫЕ КНИГИ

##### НОВЫЕ КНИГИ



**Крухмалев В. В., Гордиенко В. Н., Моченов А.Д. и др. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей. Под ред. Гордиенко В. Н. и Крухмалева В. В.— М.: Горячая линия—Телеком, 2008.— 424 с.**

Рассмотрены характеристики первичных электрических сигналов и соответствующих им каналов передачи, принципы организации двусторонних каналов и особенности передачи электрических сигналов по таким каналам. Изложены основы построения систем передачи с частотным и временным разделением каналов. Особое внимание уделено построению цифровых систем передачи с временным разделением каналов на основе импульсно-кодовой модуляции. Раскрыты принципы иерархического построения систем передачи. Рассмотрены вопросы построения цифровых волоконно-оптических систем передачи и систем радиосвязи: радиорелейных и спутниковых систем передачи, систем подвижной радиосвязи. Освещены основы построения телекоммуникационных сетей различного назначения и принципы их взаимодействия. Для студентов, обучающихся по направлению «Телекоммуникации».

Д. ф.-м. н. А. Б. РИНКЕВИЧ, акад. РАН В. В. УСТИНОВ,  
д. ф.-м. н. М. И. САМОЙЛОВИЧ, д. т. н. А. Ф. БЕЛЯНИН,  
к. г.-м. н. С. М. КЛЕЩЕВА, к. т. н. Е. А. КУЗНЕЦОВ

Россия, г. Екатеринбург, Институт физики металлов УрО РАН;  
г. Москва, ЦНИТИ «Техномаш»;  
Нижнетагильская гос. социально-педагогическая академия  
E-mail: samoylovich@technomash.ru, rin@imp.uran.ru

Дата поступления в редакцию  
16.04 2008 г.

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

## НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ОПАЛОВЫХ МАТРИЦ С 3D-СТРУКТУРОЙ, ОБРАЗОВАННОЙ МАГНИТНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

*Изучено влияние электромагнитных волн на нанокомпозиты из опаловых матриц, содержащих наночастицы Ni-Zn- и Mn-Zn-ферритов. Измерения выполнены в интервале частот 26—38 ГГц в магнитных полях напряженностью до 30 кЭ.*

Опаловые матрицы считаются одним из наиболее перспективных классов материалов для применения в приборах оптического и микроволнового диапазонов. В настоящее время активно исследуются линейные и нелинейные оптические свойства опаловых матриц, фотоиндуцированное поглощение в них, коэффициент преломления, а также изменения интенсивности, поляризации и когерентности, проходящие при прохождении через матрицы мощного когерентного излучения [1]. Ранее были подробно изучены структура и физические свойства опаловых матриц, заполненных металлическими или ферромагнитными наночастицами [2], и рассмотрена специфика оптических свойств двух- и трехмерных объектов на основе опаловых матриц [3]. Наибольший интерес вызывают свойства ансамблей различных наносфер и матриц как фотонных кристаллов [4, 5], поскольку опаловые матрицы считаются классом материалов, пригодных для создания сред с отрицательным показателем преломления. Введение в межсферические пустоты опаловых матриц магнитных материалов стало одним из перспективных направлений развития электронной техники. Никель-цинковый и марганец-цинковый ферриты представляются подходящими материалами для такого заполнения благодаря удачному сочетанию таких свойств как высокое удельное электросопротивление, малые диэлектрические потери, высокая температура Кюри и химическая стабильность. Существующие перспективы применения в устройствах наноэлектроники сверхвысоких частот опаловых матриц как магнитных материалов (метаматериалов) привлекают к ним все возрастающее внимание. Однако магнитные свойства наночастиц существенно отличаются от свойств массивного материала, в частности, для них характерно влияние вклада поверхности наночастиц в магнитную анизотропию, процессы суперпарамагнитной релаксации [6, 7].

Высокочастотные и радиочастотные магнитные свойства ансамблей наночастиц имеют определенную специфику [8], поэтому микроволновые свойства рассматриваемых 3D-нанокомпозитов на основе опаловых матриц находятся в связи с их магнитным состоянием. Микроволновые методы исследования представляются перспективными, поскольку дают возможность сравнительно просто оценить динамические и релаксационные параметры таких материалов. В то же время, применяя волноводы и полые резонаторы, работающие на разных типах волн, можно осуществлять различную взаимную ориентацию микроволновых полей и внешнего магнитного поля и таким образом добиться условий наиболее эффективного взаимодействия наночастиц введенного вещества с полями.

Микроволновые свойства наночастиц Ni-Zn-феррита, так же как и магнитные, зависят от размера частиц, а именно — с уменьшением размера частиц намагниченность насыщения уменьшается, а остаточная намагниченность и коэрцитивная сила возрастают. Фокусировка осуществляется в ближнем поле излучения в металлизированной фотонной структуре в условиях отрицательного коэффициента преломления. Одним из наиболее эффективных способов исследования микроволновых свойств является методика магнитного резонанса. Известно, что характеристики резонансной линии, такие как значение поля резонанса, ширина и форма линии, зависят от размера наночастиц.

Для успешного применения магнитных нанокомпозитов на основе опаловых матриц в управляемых магнитным полем электронных приборах СВЧ-диапазона необходимо решить несколько проблем: добиться оптимальных условий взаимодействия волн с матрицей, чтобы обеспечить наибольшую величину эффекта; выбрать схему включения элемента, содержащего полученную матрицу, в СВЧ-тракт; выбрать условия измерений таким образом, чтобы добиться управления с помощью магнитного поля как можно меньшей величины.

В настоящей работе исследованы микроволновые свойства опаловых матриц, содержащих в межсферических пустотах наночастицы Mn-Zn- и Ni-Zn-ферритов. Микроволновые свойства измерены на частотах миллиметрового диапазона, причем использу-

зованы две схемы включения образца матрицы в СВЧ-тракт. В первом случае образец помещается в полый резонатор, и измерения проводятся на частотах, близких резонансным частотам резонатора. При таком включении достигается наибольшая величина изменений СВЧ-сигнала при выполнении условий магнитного резонанса в исследуемой матрице, однако измерения возможны только на дискретных частотах. В другой методике использовано прохождение микроволн через образец опаловой матрицы, который помещался в волновод, что позволяло непрерывно изменять частоту волны в широких пределах. Изменения микроволнового сигнала, прошедшего через нанокомпозит, происходят, в основном, из-за изменения поверхностного импеданса нанокомпозита в условиях магнитного резонанса и из-за поглощения электромагнитной волны в ней. Анализ результатов ведется с учетом структурного и магнитного состояния материала. Процесс эффективного взаимодействия микроволновых полей с наночастицами ферритов представляет интерес для нахождения условий существования отрицательной действительной части магнитной проницаемости.

### Экспериментальные методы

Микроволновые измерения выполнены при комнатной температуре в частотном диапазоне 26—38 ГГц с использованием прямоугольных резонаторов и стандартных волноводов, работающих на моде  $TE_{10}$ . Образец размещался длинной стороной вдоль оси СВЧ-тракта в резонаторе и поперек тракта в волноводе (рис. 1, 2). В схеме, когда образец помещен в резонатор, внешнее постоянное магнитное поле  $H$ , создаваемое электромагнитом, прикладывается перпендикулярно волновому вектору волны  $q$ . Когда образец находится в волноводе, внешнее магнитное поле лежит в плоскости образца параллельно или перпендикулярно волновому вектору микроволнового электрического поля  $E$ .

Относительные изменения  $d_m$  и  $r_m$  во внешнем магнитном поле соответственно модулей коэффициентов прохождения  $|D(H)|$  и отражения  $|R(H)|$  рассчитывались на основании экспериментально полученных значений этих коэффициентов по формулам

$$d_m = [ |D(H)| - |D(0)| ] / |D(0)|;$$

$$r_m = [ |R(H)| - |R(0)| ] / |R(0)|.$$

Необходимость использования двух методик измерения микроволновых характеристик обусловлена

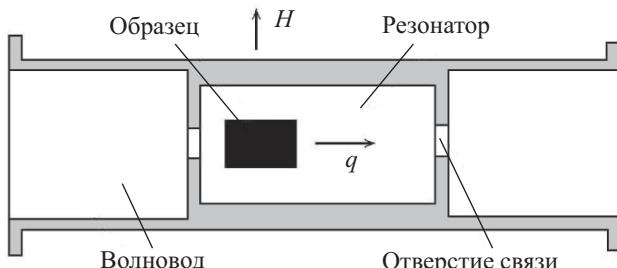


Рис. 1. Схема расположения образца в резонаторе

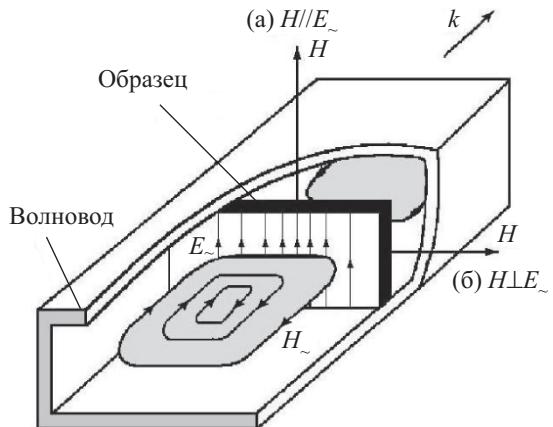


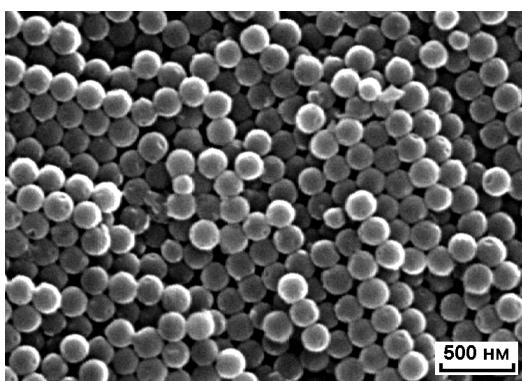
Рис. 2. Схема расположения образца в волноводе

на следующим. В резонаторе можно выполнить измерения вблизи его собственных частот, каждая из которых соответствует определенному типу электромагнитных колебаний. В условиях магнитного резонанса увеличивается поглощение электромагнитной энергии, поэтому полевая зависимость амплитуды принятого сигнала определяется резонансной зависимостью мнимой части магнитной проницаемости образца от напряженности внешнего постоянного магнитного поля. Преимуществом данной методики для определения оптимальных условий использования опаловых матриц, содержащих наночастицы ферритов со структурой типа шпинели, является то, что она позволяет достичь максимально возможных изменений микроволнового сигнала при изменении напряженности внешнего поля.

Достоинство второй методики, когда образец помещается в поперечное сечение волновода, состоит в том, что частота волны может изменяться непрерывно во всем интервале, в котором распространяется волна  $TE_{10}$  и осуществляется одномодовый режим. Для волновода сечением  $7,2 \times 3,6$  мм это частоты от 26 до 38 ГГц. Два варианта расположения вектора внешнего постоянного магнитного поля (варианты (a) и (b) на рис. 2) дают возможность реализовать различную ориентацию полей и выявить различные типы резонансов.

Опаловые матрицы с наносферами  $SiO_2$  диаметром от 200 до 300 нм были синтезированы при выполнении следующих технологических операций. Наночастицы аморфного  $SiO_2$  получали по технологии, основанной на реакции гидролиза тетраэфира ортокремниевой кислоты  $(Si(OCC_2H_5)_4)$  с раствором этанола ( $C_2H_5OH$ ) в присутствии гидрооксида аммония ( $(NH_4)_2O$ ), который служил катализатором. Во время реакции гидролиза на первой стадии образуются мелкие разветвленные наночастицы, которые в процессе поликонденсации превращаются в частицы аморфного диоксида кремния сферической формы. После отстаивания суспензии и удаления гидролизата упорядоченный осадок представляет собой гидрогель с содержанием жидкости до 50—60 вес. %, мелкоподобный, легко ломающийся, что вызывает необходимость последовательно проводить различные виды термообработки с целью упрочнения

а)



б)

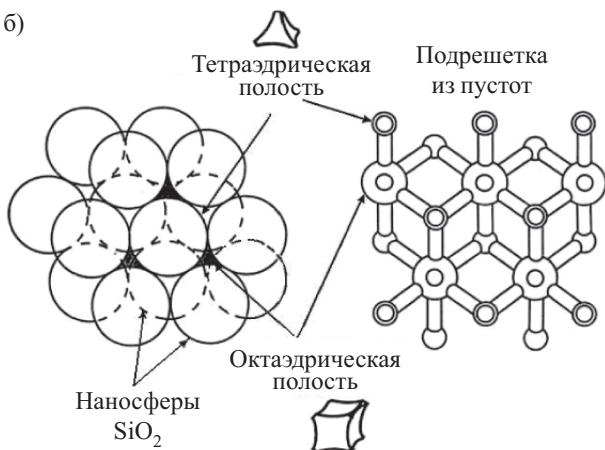


Рис. 3.

а — строение правильной упаковки наносфер  $\text{SiO}_2$  (опаловая матрица); б — схема строения опаловой матрицы и подрешетки пустот в опаловой матрице

полученных опаловых матриц. Контроль правильности упаковки наносфер проводился по форме и ширине полос брэгговского отражения. Строение типичного образца опаловой матрицы высокого качества (с размером наносфер  $\text{SiO}_2$ , равным 200 нм) представлено на рис. 3, а (использован растровый электронный микроскоп LEO1430). В процессе синтеза были сформированы плотнейшие решетчатые упаковки, в которых наносферы образуют тетраэдрические и октаэдрические пустоты: каждую сферу  $\text{SiO}_2$  диаметром  $\approx 200$  нм окружает по 6 октаэдрических пустот размером  $\approx 80$  нм и 8 тетраэдрических размером  $\approx 40$  нм (рис. 3, б).

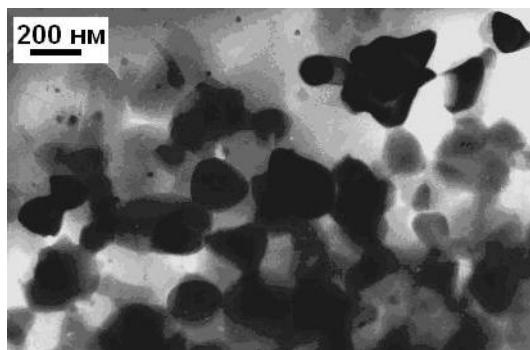
Одним из наиболее простых и широко применяемых способов введения различных химических элементов (и соединений) в опаловые матрицы является метод пропитки. Метод основан на пропитке опаловой матрицы веществом определенного химического состава (прекурсором) с последующей термообработкой, в процессе которой в межсферических пустотах опаловой матрицы формируется необходимый для получения шпинелевой структуры химический состав. Прекурсоры должны обладать хорошей растворимостью в воде (или в других растворителях) и переходить в оксиды (или в другие соединения) при заданных условиях термообработки. В качестве таких веществ можно использовать растворимые соли металлов (в настоящей работе применялись нитраты  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$  и

$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ ). В процессе пропитки водные растворы солей самопроизвольно, за счет капиллярного эффекта, заполняют поры опаловой матрицы. Затем в процессе термообработки происходит частичное термическое разложение нитратов и удаляется несвязанная вода. Данная процедура повторяется многократно (до 10—12 раз) для постепенного заполнения межсферического пространства матрицы оксидами, что позволяет получить заданную структуру.

#### Структурное состояние нанокомпозитов на основе матриц

Структура опаловой матрицы до введения в межсферические пустоты магнитных наночастиц представляет собой упорядоченный ансамбль наносфер, образующих плотно упакованную периодическую структуру. После процедуры заполнения электронной микроскопией было установлено, что большая часть внесенного вещества сосредоточена в пространстве между наносферами. Рентгенофазовый анализ показал, что во введенном в нанопустоты веществе есть несколько железосодержащих фаз. В частности, в нанокомпозите с Ni-Zn-ферритом большинство рефлексов относятся к фазам типа  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  и  $(\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x})\text{Fe}_2\text{O}_4$ , имеющих кристаллическую структуру шпинели. Введенные фазы имеют поликристаллическую структуру с частицами неправильной формы размерами от 5 до 70 нм (рис. 4, использован просвечивающий электронный микроскоп JEM-200CX).

а)



б)

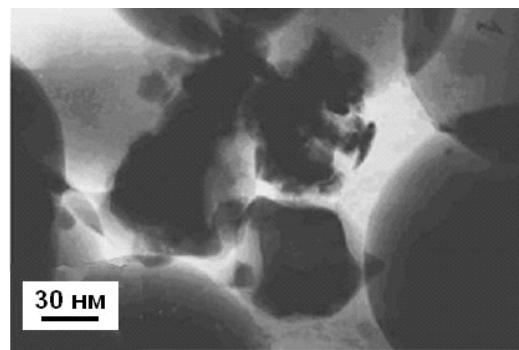


Рис. 4. Структура нанокомпозита, содержащего Mn-Zn-шпинель (а) и Ni-Zn-шпинель (б)

Объемная концентрация внесенных фаз не превышает 3—5%. В дальнейшем будем называть полученный композитный материал как Ni-Zn-феррит, несмотря на возможное присутствие в нем другой магнитной фазы. Сказанное относится и к нанокомпозиту с Mn-Zn-ферритом.

#### Магнитные свойства нанокомпозитов

Магнитные свойства массивных образцов Mn-Zn- и Ni-Zn-ферритов хорошо известны [9]. Такие ферриты выпускаются серийно для целого ряда применений. Например, Mn-Zn-феррит с высокой добротностью марки SM15T имеет начальную магнитную проницаемость  $\mu_0=1500$ , удельный тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta/\mu_0<6\cdot10^{-4}$ , который измеряется на частоте 100 кГц, максимальную магнитную индукцию  $B_s=380$  мТл, коэрцитивную силу  $H_c=40$  А/м. Для Ni-Zn-феррита марки L-81 магнитные характеристики дросселей имеют следующие значения:  $\mu_0=350$ ,  $\operatorname{tg}\delta/\mu_0<25\cdot10^{-6}$  на частоте 700 кГц,  $B_s=330$  мТл,  $H_c=48$  А/м. Никель-цинковый феррит марки SM-2C для высокочастотных применений имеет  $\mu_0=70$ ,  $\operatorname{tg}\delta/\mu_0<1\cdot10^{-4}$  на частоте 10 МГц,  $B_s=350$  мТл,  $H_c=675$  А/м. Рекомендованный диапазон частот для указанного феррита 1—20 МГц. Никель-цинковый феррит фирмы Ferroxcube марки 4B2 для высокочастотных приложений имеет  $\mu_0=250$ ,  $\operatorname{tg}\delta/\mu_0<3\cdot10^{-4}$  на частоте 3 МГц. Однако магнитные параметры опаловых матриц, содержащих наночастицы этих ферритов, могут существенно отличаться от приведенных значений.

Можно предполагать, что нанокомпозиты на основе опаловых матриц найдут применение в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн, а именно на более высоких частотах. Основной интерес вызывает область частот и магнитных полей вблизи условий магнитного резонанса для использования этого класса материалов в управляемых устройствах. Поэтому наибольший интерес представляет кривая намагничивания таких нанокомпозитов, поскольку именно величина намагниченности определяет поле магнитного резонанса.

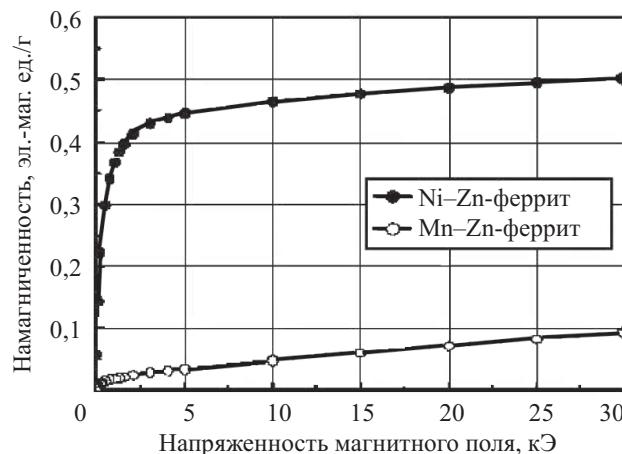


Рис. 5. Кривые намагничивания нанокомпозитов, содержащих Ni-Zn- и Mn-Zn-ферриты, полученные при комнатной температуре

На рис. 5 приведены кривые намагничивания исследуемых материалов при комнатной температуре. Здесь видно, что кривые намагничивания обоих материалов, особенно Mn-Zn-феррита, не имеют полного насыщения в магнитных полях до 30 кЭ. Кроме того, кривые намагничивания имеют участок быстрого возрастания намагниченности в слабых полях. Эти особенности кривых намагничивания указывают на то, что исследуемые материалы при комнатной температуре обладают как ферромагнитным (точнее ферримагнитным) упорядочением, так и суперпарамагнитными свойствами. То, что исследуемые материалы обладают суперпарамагнитными свойствами не является удивительным, поскольку частицы внесенных фаз имеют размеры менее 70 нм, а некоторые из них и менее 10 нм.

Серия кривых намагничивания, измеренных при разной температуре на образце нанокомпозита, содержащего наночастицы Mn-Zn-феррита, показана на рис. 6. Здесь видно, что при снижении температуры намагниченность нанокомпозита возрастает, а ниже температуры 100 К кривые практически совпадают. Быстрый рост намагниченности в самых слабых полях указывает на присутствие ферромагнитной фазы или фаз.

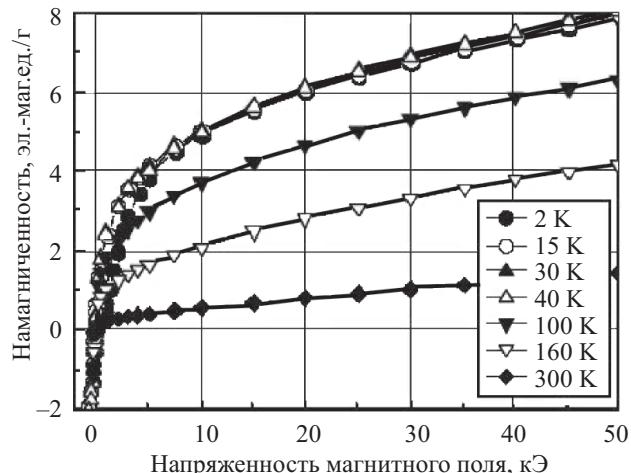


Рис. 6. Кривые намагничивания нанокомпозита, содержащего Mn-Zn-феррит, полученные при разной температуре

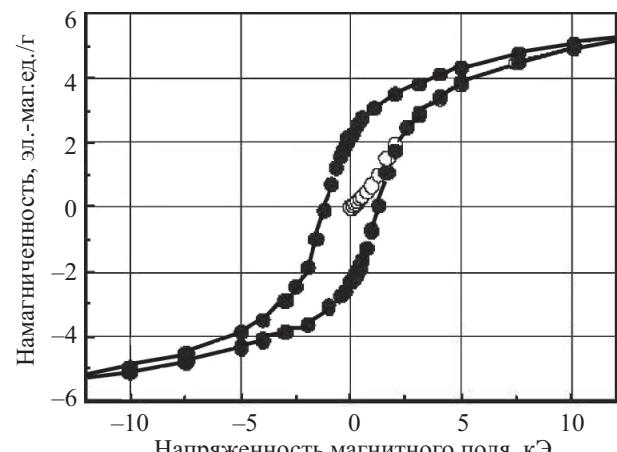


Рис. 7. Петля гистерезиса нанокомпозита, содержащего Mn-Zn-феррит, полученная при температуре 2 К

На образцах нанокомпозита, содержащего Mn–Zn-феррит, были измерены петли магнитного гистерезиса. Измерения выполнялись в интервале температуры от 2 до 300 К. Петля гистерезиса, полученная при  $T=2$  К, показана на **рис. 7**. Из этого рисунка видно, что величина коэрцитивной силы  $H_c$  превышает 1 кЭ, что совершенно необычно для шпинелей. Вероятно, столь большие значения  $H_c$  обусловлены тем, что шпинель находится в нанокомпозите в виде нанодисперсных частиц.

Температурная зависимость коэрцитивной силы для этого нанокомпозита показана на **рис. 8**. При увеличении температуры коэрцитивная сила быстро уменьшается и при температуре выше 100 К она принимает обычные для шпинелей значения в единицы эрстед.

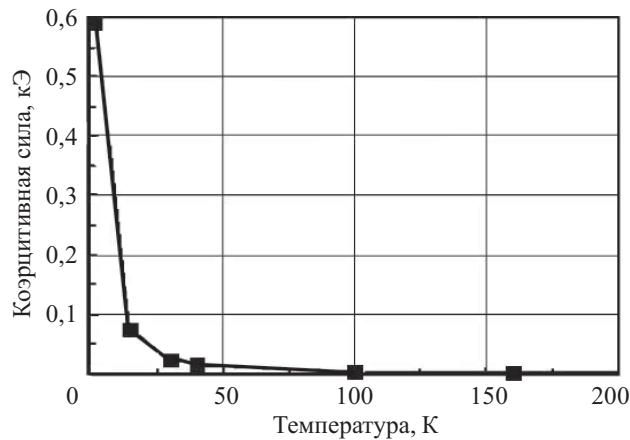


Рис. 8. Температурная зависимость коэрцитивной силы нанокомпозита, содержащего Mn–Zn-феррит

В интервале частот до 1000 Гц были исследованы действительная и мнимая компоненты магнитной восприимчивости. При измерениях амплитуда переменного магнитного поля составляла 4 Э. Наиболее интересные результаты для мнимой компоненты показаны на **рис. 9**. Как видно из рисунка, динамическая восприимчивость при криогенных температурах значительно меньше, чем при комнатной и промежуточных. Как правило, в магнитном поле в несколько килоэрстед восприимчивость меньше, чем в более слабых полях.

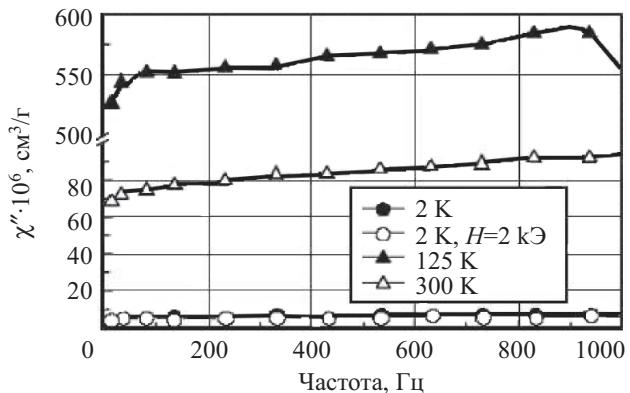


Рис. 9. Частотная зависимость мнимой части магнитной восприимчивости ( $\chi''$ ) нанокомпозита, содержащего Mn–Zn-феррит

Экспериментальные данные, полученные при комнатной температуре  $T=300$  К и, особенно, при  $T=125$  К, свидетельствуют о наличии частотной зависимости как действительной, так и мнимой частей восприимчивости. В целом, результаты, которые показаны на рис. 9, очевидно, не укладываются в простейшее представление о том, что магнитные фазы нанокомпозита состоят из частиц ферримагнетика и суперпарамагнитных частиц [9], а поэтому требуют дальнейшего исследования. Однако для целей данной работы интерес представляет зависимость, полученная при комнатной температуре.

#### Микроволновые измерения в резонаторе

Как отмечалось выше, измерения в резонаторе выполняются вблизи его собственных частот. Резонатор был включен в СВЧ-тракт каскадно, как это показано на рис. 1. Измерения проводились с целью установить спектр магнитного резонанса в магнитных нанокомпозитах, а также создать условия для достижения максимальных микроволновых изменений. Для этого в резонатор помещались образцы магнитных опаловых матриц, что существенно искажало поле в резонаторе и влияло на значения его резонансных частот, несмотря на то, что объем образцов существенно меньше объема резонатора. Были измерены частотные зависимости прошедшего сигнала как без образца, так и с образцом.

В экспериментах было использовано несколько прямоугольных резонаторов различной ширины длиной 50 мм и высотой 3,2 мм. Ширина резонатора, частотная зависимость для которого показана на **рис. 10**, составляла 5,2 мм. Максимумы амплитуды прошедшего через резонатор сигнала, приходящиеся на частоты 35,8 и 34 ГГц, соответствуют модам  $H_{101}$  и  $H_{100}$ . При помещении образца в резонатор резонансные частоты уменьшаются, ширина резонансной линии увеличивается из-за микроволновых потерь в образце. Результаты измерения полевых зависимостей микроволнового сигнала показаны на **рис. 11**. Как видно из рис. 11, *a*, в образце, содержащем Ni–Zn-феррит, изменения микроволново-

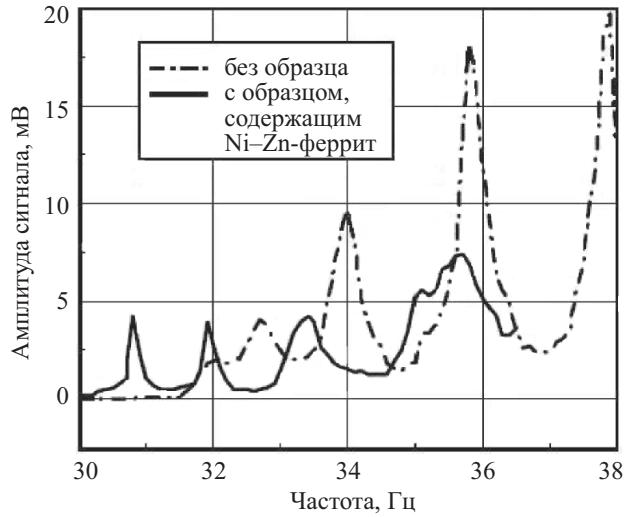


Рис. 10. Частотная зависимость амплитуды сигнала, прошедшего СВЧ-тракт с резонатором

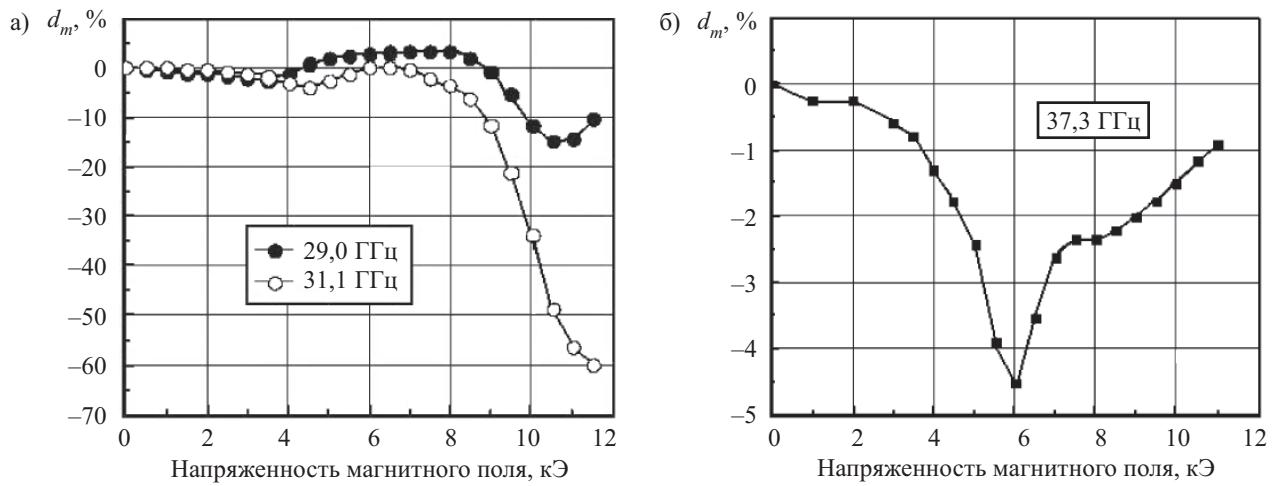


Рис. 11. Микроволновой магнитный резонанс в опаловой матрице, содержащей Ni-Zn- (а) и Mn-Zn- (б) ферриты

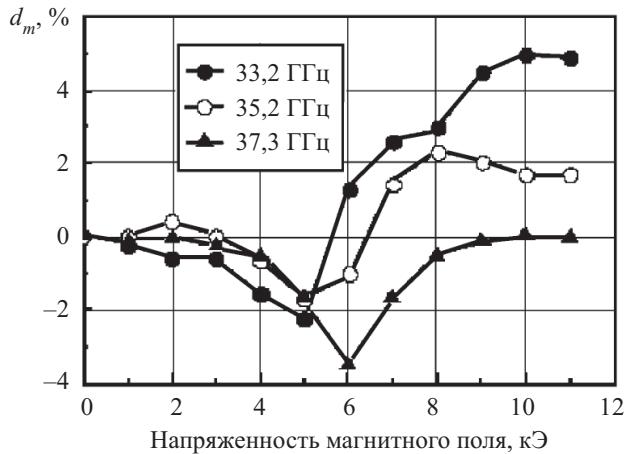


Рис. 12. Магнитный резонанс в опаловой матрице, содержащей Mn-Zn-феррит на нескольких частотах

вого сигнала превышают 60%. Подобные изменения, в принципе, могут найти применение в управляемых электронных приборах миллиметрового диапазона.

Результаты измерения полевой зависимости изменения коэффициента прохождения для нескольких частот показаны на рис. 12. По мере увеличения частоты поле резонанса увеличивается, при этом с ростом частоты увеличивается амплитуда в области резонансной особенности.

В работе [2] отмечалось, что амплитуда резонансной зависимости и форма линии магнитного резонанса для нанокомпозитов изменяются, если измерения производятся несколько раз, что, в принципе, возможно за счет явления магнитной аккомодации. В данной работе было проверено существование подобного эффекта на образцах нанокомпозитов, содержащих наночастицы шпинелей. Результаты двух повторных измерений полевой зависимости изменения коэффициента прохождения, представленные на рис. 13, показали, что для исследуемых нанокомпозитов эффект магнитной аккомодации в магнитном резонансе отсутствует.

#### Микроволновые измерения в волноводе

Измерения были выполнены по схеме, показанной на рис. 2. В этой серии измерений помимо  $d_m$

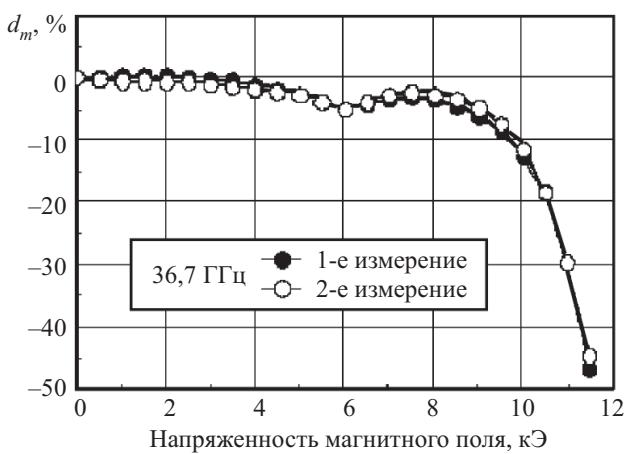


Рис. 13. Повторные измерения магнитного резонанса в опаловой матрице, содержащей Ni-Zn-феррит

определялось еще и относительное изменение  $r_m$  модуля коэффициента отражения. Полученные полевые зависимости изменений коэффициентов прохождения и отражения для нанокомпозита, содержащего Mn-Zn-феррит, при  $H \perp H_\sim$  приведены на рис. 14.

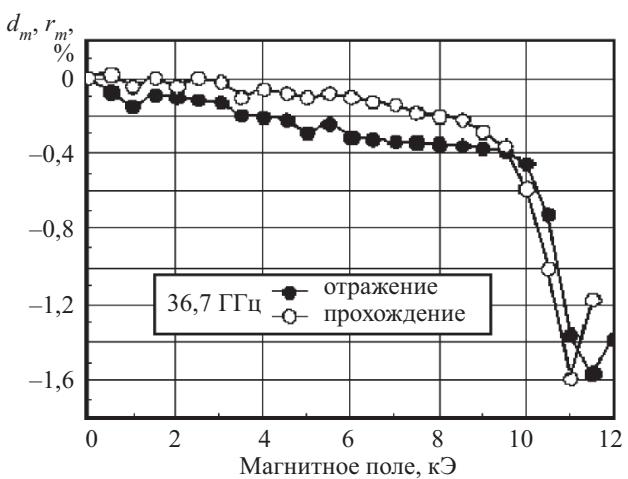


Рис. 14. Магнитный резонанс (36,7 ГГц), измеренный по отражению и прохождению микроволн через образец нанокомпозита, содержащего Mn-Zn-феррит при  $H \perp H_\sim$

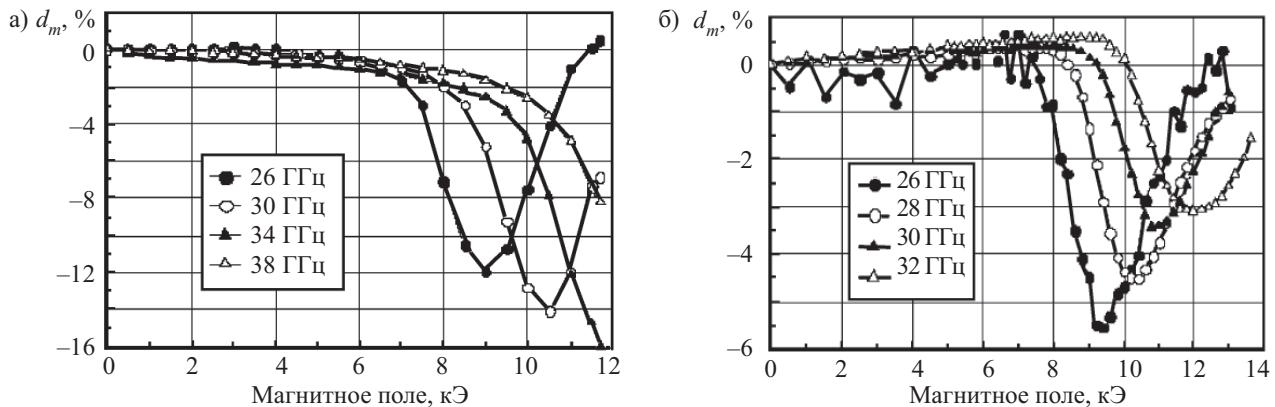


Рис. 15. Магнитный резонанс, измеренный по прохождению микроволн через образец нанокомпозита, содержащего Ni-Zn-феррит при  $H \perp H_\sim$  (a) и  $H // H_\sim$  (б)

Здесь видно, что зависимости практически одинаковы как по величине изменений, так и по форме.

Полевые зависимости изменений прошедшего сигнала для образца, содержащего Ni-Zn-феррит, при  $H \perp H_\sim$  показаны на рис. 15, а. По мере увеличения частоты положение резонансной особенности приходится на более сильные поля; амплитуда резонанса с ростом частоты увеличивается — см. рис. 16.

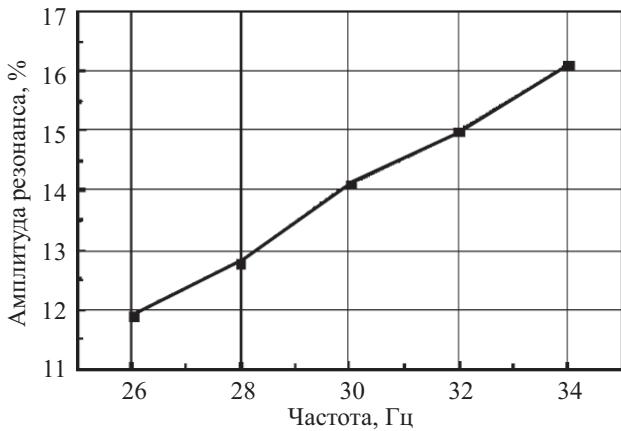


Рис. 16. Частотная зависимость амплитуды магнитного резонанса прошедшего сигнала при  $H \perp H_\sim$  для образца нанокомпозита, содержащего Ni-Zn-феррит

Несколько иная картина наблюдается при  $H // H_\sim$ . Как видно на рис. 15, б, здесь резонансная особенность коэффициента прохождения также присутствует и по мере увеличения частоты смешается в сторону сильных полей, однако при этом амплитуда резонанса уменьшается. Это объясняется следующим.

При  $H // H_\sim$  резонанс будет существовать в том случае, если направление магнитного поля внутри частиц введенного вещества имеет компоненту, перпендикулярную  $H_\sim$ . (Последнее возможно, поскольку форма частиц введенного вещества сложная, и частицы ориентированы к внешнему магнитному полю случайным образом.) По мере роста частоты резонанс приходится на более сильные поля. Одновременно, с приближением поля к состоянию технического насыщения, области неоднородного поля в частицах уменьшаются, а направление вектора внутреннего постоянного магнитного поля, в целом, приближается к направлению внешнего. Поэтому в данной конфигурации полей с ростом частоты амплитуда резонанса уменьшается.

Измерения, выполненные на образце опаловой матрицы, содержащей наночастицы Ni-Zn-феррита, на нескольких частотах при  $H \perp H_\sim$  показали, что в данном случае с ростом частоты амплитуда резонансной особенности возрастает, как и для матрицы, содержащей Mn-Zn-феррит (рис. 17, а).

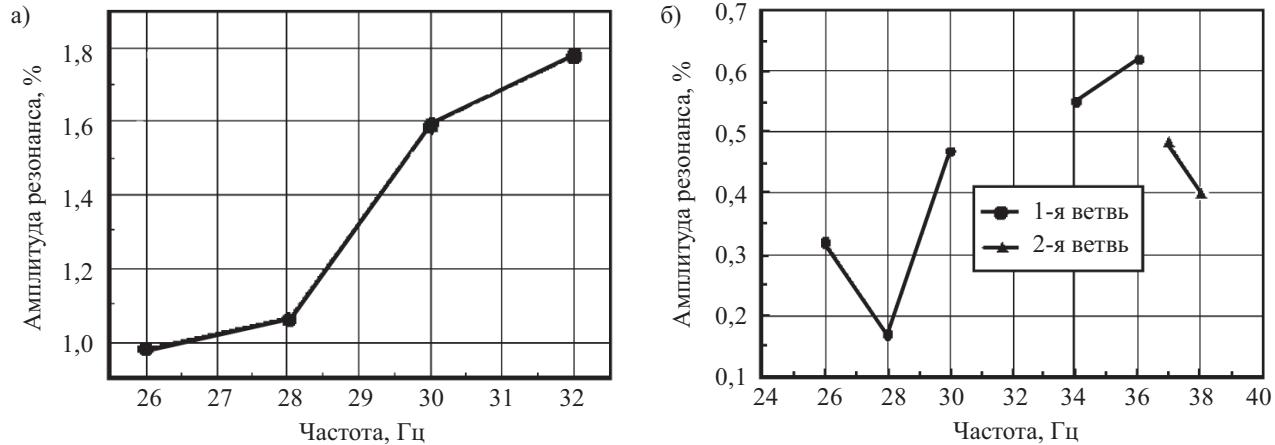


Рис. 17. Частотная зависимость амплитуды магнитного резонанса в опаловой матрице, содержащей Mn-Zn-феррит, при  $H \perp H_\sim$  (а) и  $H // H_\sim$  (б)

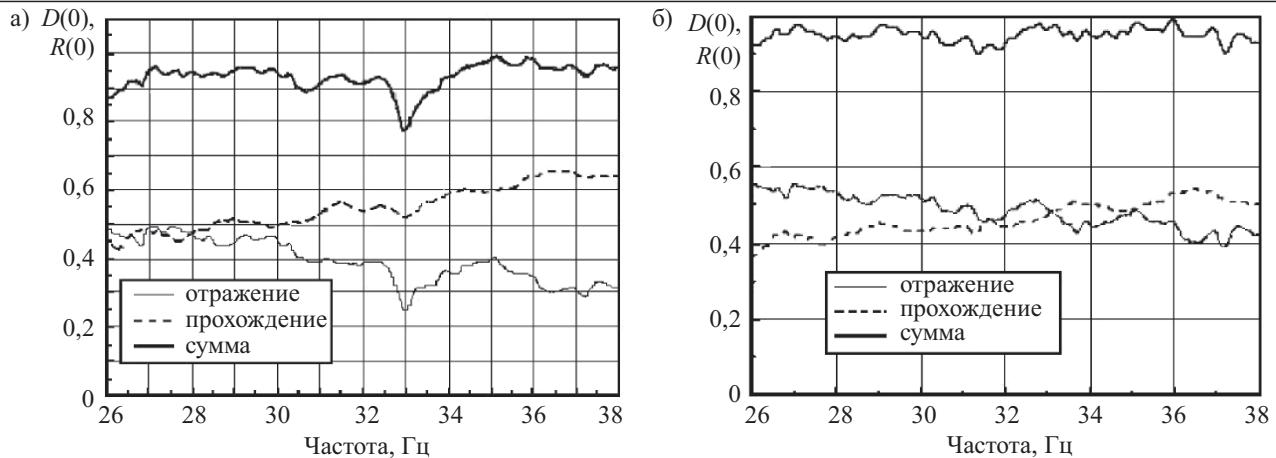


Рис. 18. Частотные зависимости коэффициентов прохождения и отражения по мощности, а также суммы этих коэффициентов для опаловой матрицы, содержащей Ni-Zn-феррит

В ориентации полей  $H//H_0$  частотная зависимость амплитуды резонансов для нанокомпозита, содержащего частицы Mn-Zn-феррита, имеет более сложный характер, как показано на рис. 17, б. Здесь присутствуют резонансы, которые можно отнести к двум различным ветвям спектра магнитного резонанса. Для резонансов, принадлежащих 1-й ветви, с ростом частоты амплитуда резонансов в целом возрастает.

На рис. 18, а показана частотная зависимость коэффициентов прохождения  $D(0)$  и отражения  $R(0)$  по мощности для образца опаловой матрицы, содержащей наночастицы Ni-Zn-феррита. Данные измерения выполнены без приложения постоянного магнитного поля. В целом, в рассматриваемом частотном диапазоне коэффициент прохождения возрастает, а коэффициент отражения убывает с ростом частоты. Здесь показана также сумма коэффициентов  $D(0)+R(0)$ . Отличие суммы от единицы указывает на долю энергии, поглощенную в образце. На частотной зависимости суммы, а также коэффициента отражения, ясно видна особенность в области частоты 33 ГГц, где сильно уменьшается коэффициент отражения и возрастает поглощение электромагнитных волн.

Подобная зависимость для матрицы, содержащей Mn-Zn-феррит, приведена на рис. 18, б. Здесь резкие аномалии частотной зависимости коэффициентов и их суммы отсутствуют, а частотные зависимости  $D(0)$  и  $R(0)$  проявились значительно слабее, чем для матрицы, содержащей Ni-Zn-феррит.

Следует отметить, что в рассмотренной области миллиметровых волн порядок величин коэффициентов, измеренных без внешнего магнитного поля в данной работе и полученных ранее, одинаков.

### Заключение

Экспериментально продемонстрировано эффективное воздействие электромагнитных волн миллиметрового диапазона на 3D-нанокомпозиты из опаловых матриц, содержащих наночастицы Ni-Zn- и Mn-Zn-ферритов. Зависимость коэффициента прохождения микроволн от напряженности магнитного поля определяется магнитным резонансом в магните-

ных нанокомпозитах. Показано, что изменения микроволнового сигнала, прошедшего резонатор с образцом матрицы, содержащей Ni-Zn-феррит, достигают 60%. Измерена частотная зависимость микроволновых изменений. Для ориентации полей  $H\perp H_0$  наблюдалась обычная частотная зависимость амплитуды резонансного пика, когда амплитуда возрастает с ростом частоты. Для ориентации  $H//H_0$  в матрице, содержащей Ni-Zn-феррит, наблюдалось аномальное уменьшение амплитуды резонанса с ростом частоты волны.

Измерена частотная зависимость коэффициентов прохождения и отражения для нанокомпозитов в отсутствие внешнего магнитного поля. Было установлено, что в диапазоне частот от 26 до 38 ГГц коэффициент отражения, в целом, убывает, а коэффициент прохождения, в целом, возрастает при увеличении частоты волны. Частотная зависимость для нанокомпозита, содержащего наночастицы Ni-Zn-феррита, выражена сильнее. Доля поглощенной в образце нанокомпозита мощности без внешнего магнитного поля составляет от 5 до 20%.

Сопоставление изменений микроволнового сигнала при прохождении волной образца магнитной матрицы и при отражении от нее показало, что величина изменений и форма полевой зависимости коэффициентов прохождения и отражения близки друг к другу. Теоретический анализ изменений коэффициентов прохождения и отражения в магнитном поле показал, что изменения коэффициента прохождения и отражения выражаются сходными формулами с использованием добавки, которые получают во внешнем магнитном поле постоянная распространения в образце и его волновое сопротивление.

Установлено, что для получения наибольших изменений микроволнового сигнала следует осуществлять ориентацию полей  $H\perp H_0$ .

Полученные результаты создают предпосылки для разработки управляемых магнитным полем высокочастотных устройств, работа которых будет основана на использовании микроволнового магнитного резонанса в магнитных нанокомпозитах на основе опаловых матриц. Такие устройства конструк-

## МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

тивно достаточно просты и могут быть эффективны в эксплуатации. Рассматриваемые материалы могут также найти применение при создании управляемых аттенюаторов, фазовращателей и других устройств миллиметрового диапазона.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Photonic glasses. Ed. Fuxi Gan, Lei Xu. Imperial College Press. 2006.
2. Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Юрасов Н. И. и др. Металломагнитные диэлектрические нанокомпозиты на основе опаловых матриц // Мат-лы XII Междунар. науч.-техн. конф. "Высокие технологии в промышленности России. (Материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники)".— Россия, г. Москва.— 2006.— С. 32—39.
3. Efros A., Jing Shi, Blair S. et. al. Nanoscale metallic photonic crystals: fabrication, physical properties and applications // NSF Nano-scale Science and Engineering Grantees Conference.— 2002.— P. 253—257.
4. Cole R. M., Sugawara Y., Baumberg J. J. et. al. Easily coupled whispering gallery plasmons in dielectric nanospheres embedded in gold films // Phys. Rev. Letters.— 2006.— Vol. 97.— P. 137401.
5. Астрова Е. В., Боровинская Т. Н., Толмачев В. А., Перова Т. С. Технология создания рисунка в макропористом кремнии и получение полос двумерных фотонных кристаллов с вертикальными стенками // ФТП.— 2004.— Т. 38, вып. 9.— С. 1125—1128.
6. Alves C. R., Aquino R., Depeyrot J. et. al. Superparamagnetic relaxation evidences large surface contribution for the magnetic anisotropy of MnFe204 nanoparticles of ferrofluids // J. Mater Sci.— 2007.— Vol. 42.— P. 2297—2303.
7. Hua Su, Huaiwu Zhang, Xiaoli Tang, Yingli Liu. Effects of nanocrystalline ferrite particles on densification and magnetic properties of the NiCuZn ferrites // J. Mater. Sci.— 2007.— Vol. 42.— P. 2849—2853A.
8. Stancu A., Spinu L., O'Connor C. J. Micromagnetic analysis of the transverse susceptibility of particulate systems // J. Magn. Magn. Mater.— 2002.— Pt. 2.— P. 242—245.
9. Яковлев Ю. М., Гендельев С. Ш. Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике.— М.: Сов. радио, 1975.

## ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



### III Всероссийская научно-техническая конференция «ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ — 2008» МЭС-2008

6—10 октября 2008 г.

Московская обл., санаторий «Истра».

#### Тематика:

- ¤ Теоретические аспекты проектирования микро- и наноэлектронных систем (МЭС)
- ¤ Методы и средства автоматизации проектирования микро- и наноэлектронных схем и систем (САПР СБИС)
- ¤ Опыт разработки цифровых, аналоговых, цифроанalogовых, радиотехнических функциональных блоков СБИС
- ¤ Системы на кристалле перспективной РЭА
- ¤ Выставка и презентация коммерческих продуктов
- ¤ Форум диссертационных работ

#### Организаторы:

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (ИППМ РАН)

Московский государственный институт электронной техники (технический университет) ФГУП «Научно-исследовательский институт микроэлектронной аппаратуры «Прогресс».

Рабочий язык конференции — русский.

#### Контакты:

124681 Москва, ул. Советская, д. 3, Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Оргкомитет МЭС-2008, Борискин Вячеслав Степанович;

тел.: 8(499) 729-95-69;

факс: 8(499) 729-92-08;

E-mail: boriskin@ippm.ru

#### Область интересов конференции:

- ¤ Проектирование цифровых СБИС
- ¤ Проектирование аналоговых и радиотехнических функциональных блоков СБИС
- ¤ Проектирование СБИС со смешанными сигналами
- ¤ Методы структурного синтеза аналоговых, цифровых и смешанных СБИС и СФ блоков
- ¤ Системы на кристалле
- ¤ Наноразмерные схемы и системы
- ¤ Микромеханические системы
- ¤ Специализированные (стойкие к спецвоздействиям, фоточувствительные и т. п.) СБИС
- ¤ Фоточувствительные СБИС
- ¤ Методы цифровой обработки информации
- ¤ Методы высокоуровневого моделирования
- ¤ Методы логического синтеза и логического моделирования в САПР СБИС
- ¤ Методы электрического моделирования в САПР СБИС
- ¤ Методы аналогового и смешанного поведенческого моделирования
- ¤ Методы моделирования радиотехнических СБИС
- ¤ Методы генерации моделей для САПР СБИС
- ¤ Методы автоматизации топологического проектирования в САПР СБИС
- ¤ Методы приборно-технологического моделирования
- ¤ Методы моделирования межсоединений
- ¤ Методы проектирования и моделирования новых приборных структур и схем наноэлектроники

## ПАМЯТКА АВТОРУ ЖУРНАЛА «ТКЭА»

1. Рукопись должна соответствовать тематике журнала и отличаться прикладной направленностью.

Если результаты получены в смежных областях знаний, необходимо показать их применимость в области интересов журнала.

2. При оценке рукописи редакцию будут интересовать следующие аспекты:

- актуальность темы;
- обоснованность постановки задачи;
- новизна информации (в сравнении с работами предшественников);
- убедительность доказательств;
- правомерность выводов;
- возможность практического применения;
- целесообразность (и адекватность тексту) таблиц, иллюстраций, списка использованных источников;
- строгость терминологии;
- композиция рукописи, в т. ч. оправданность объема.

3. Название рукописи должно быть конкретным и, в то же время, по возможности кратким.

4. Приведите мини-аннотацию до 20 слов, отражающую важнейший результат статьи.

5. Обозначьте разделы рукописи. Выделите выводы (резюме, заключение). Кстати, проверьте себя — насколько согласуются поставленная задача, выводы и название статьи.

6. Единицы измерения всех величин должны отвечать современным требованиям, а использованные символы (и аббревиатуры) должны быть пояснены при первом их употреблении в тексте.

7. При ссылке в тексте на численные значения, формулы и иные фактические данные, заимствованные из книг, следует (для удобства поиска) указывать не только саму книгу, но и страницу (например [2, с. 418]).

8. Список «Использованные источники» формируется в порядке их упоминания в тексте. Желательно избегать ссылок на труднодоступные источники (например на материалы конференций) или на недолговечные (например Интернет). Принятое в журнале описание источников показано на сайте [www.tkea.com.ua](http://www.tkea.com.ua).

9. Сопроводите рукопись библиографической карточкой на русском и английском языках с аннотацией до 500 печ. знаков. Укажите ключевые слова, а также индекс рукописи по Универсальной десятичной классификации (УДК).

10. Материалы статьи направляйте по e-mail <[tkea@optima.com.ua](mailto:tkea@optima.com.ua)> (размер письма не должен превышать 1 Мб). Если Вы направляете рукопись по почте, приложите запись статьи на CD.

Текст статьи на русском языке набирается в текстовом редакторе Microsoft Word размером 12, без переносов, с интервалом не менее 1,5. Все слова внутри абзаца разделяются только одним пробелом. Правый край текста выравнивать не обязательно. Использование программы Equation допускается только в случаях, когда Word бессилен.

С точки зрения удобства проведения наборных работ желательно, чтобы объем иллюстраций не превышал 40% общего объема статьи. Иллюстрации должны быть представлены отдельными файлами. Графики и чертежи следует выполнять в черно-белом (битовом) режиме.

Если рисунки выполнялись в программе CorelDraw или Word, то необходимо представить оригинальные файлы (\*.cdr или \*.doc). Рисунки, созданные в других программных пакетах, необходимо экспорттировать в любой из следующих форматов: PCX, JPG, TIF.

В случае, когда автор не может обеспечить высокое качество рисунка в машинном виде, допускается его выполнение вручную с дальнейшим сканированием в битовом режиме с разрешением 300 ppi.

При подготовке цветных иллюстраций желательно фотографировать объекты на однотонном фоне цифровой камерой. Если проводится сканирование изображений, то его необходимо выполнять с разрешением 300 ppi.

11. Снабдите рукопись сведениями об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, место работы, должностное положение, дата рождения, служебный и домашний адреса с указанием почтового индекса, e-mail, телефон, факс).

12. Если считаете необходимым, сопроводите статью экспертым заключением о возможности ее публикации в открытой печати.

XVI Міжнародна спеціалізована виставка  
16th International Trade Exhibition  
Information Communication Technology 2008

ТЕХНОЛОГІЇ ТИСЯЧОЛІТТЯ ®

# ІНФОРМАТИКА І ЗВ'ЯЗОК 2008

[www.informatika.net.ua](http://www.informatika.net.ua)  
[www.pe.com.ua](http://www.pe.com.ua)

12...14 2008  
Листопада November

МВЦ >> Броварський пр-т, 15 >> Київ >> Україна  
IEC >> 15 Brovarskiy Prospekt >> Kyiv >> Ukraine

Організатори >> Organised by



Прем'єр Експо >> 04050, Київ, вул. Пимоненка, 13-Б  
Тел. +380 44 451 4160, Факс: +380 44 451 4161  
E-mail: [Rsologub@pe.com.ua](mailto:Rsologub@pe.com.ua)  
[www.informatika.net.ua](http://www.informatika.net.ua), [www.pe.com.ua](http://www.pe.com.ua)

ITE Group plc >> 105 Salusbury Road London NW6 6RG, UK  
tel: +44 20 7596 5000, fax: +44 20 7596 5111  
e-mail: [enquiry@ite-exhibitions.com](mailto:enquiry@ite-exhibitions.com)

ГОЛОВНЕ УПРАВЛІННЯ ПРОМИСЛОВОСТІ, ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ  
ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСНОЇ ДЕРЖАВНОЇ АДМІНІСТРАЦІЇ  
ТОВ «ЕКСПОСЕРВІС»

## 11 СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА



КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ  
ПРИЛАДИ



ЕЛЕКТРОНІКА  
ІНФОРМАТИКА ЗВ'ЯЗОК



ЕНЕРГЕТИКА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА  
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

22-24 ЖОВТНЯ 2008 року

ХАРКІВ



Організатор  
ТОВ «ЕКСПОСЕРВІС»

Тел./факс:

(057) 758 70 30

758 72 30

758 70 29

E-mail:

expo@kharkov.ukrnet.net

expo@kcci.kharkov.ua

[www.expos.com.ua](http://www.expos.com.ua)



Презентаційно-  
виставковий центр  
«РАДМИР ЕКСПОХОЛ»

вул. Академіка Павлова, 271.  
станція метро «Академіка Павлова»

Номер готовили  
Дніпропетровськ, Екатеринбург, Київ,  
Львів, Москва, Мукачево, Нижній Новгород,  
Нижній Тагіл, Одесса, Харків, Чернівці.



Пишіте  
Подписуйтесь  
Читайте