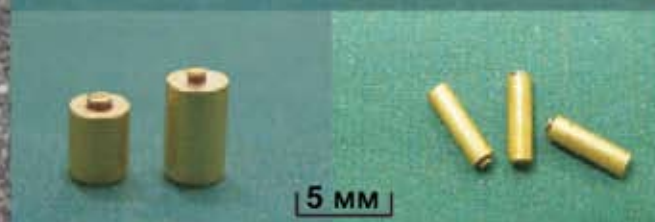
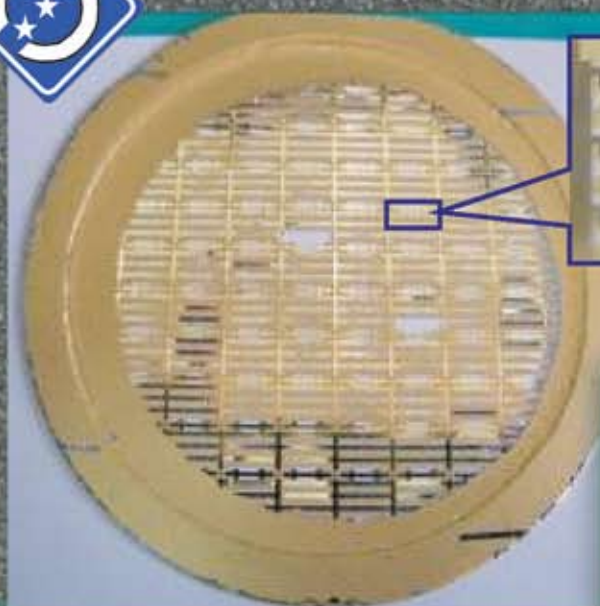


ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ



50 лет НИИ «ОРИОН»



К статье «Развитие полупроводниковых
СВЧ-технологий в НИИ "Орион"»

1–2(90) 2011

ДВЕНАДЦАТАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

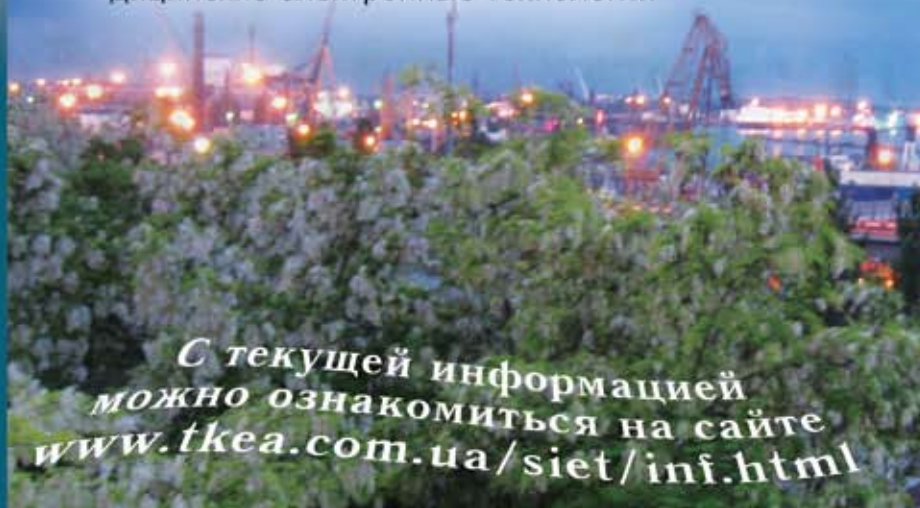


СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

23—27 мая 2011 года
Украина, г. Одесса

Реквизиты для связи
e-mail <tkea@optima.com.ua>
тел. +38 (048) 728-49-46,
728-18-50.

- Информационные технологии и системы искусственного интеллекта
- Компьютерные системы и сети
- Защита информации в широкополосных системах и компьютерных сетях
- Радиотехнические, телекоммуникационные и телевизионные системы
- Проектирование, конструирование, производство и контроль электронных средств
- Функциональная электроника. Микро- и нанотехнологии
- Проблемы экологического мониторинга и биомедицинские электронные технологии



С текущей информацией
можно ознакомиться на сайте
www.tkea.com.ua/siet/inf.html

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

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер КВ 13418-2302ПР

Зарегистрирован в ВАК Украины по разделам «Физико-математические науки», «Технические науки»

Реферируется в УРЖ «Джерело» (г. Киев) и в реферативном журнале ВИНТИ (г. Москва)



Журнал издается при поддержке
НПП «Карат» (г. Львов),
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

- В Украине** Отделения связи. «Каталог видань України». Индекс 23785.
Подписное агентство «Идея», www.idea.com.ua. Индекс 11146.
Подписное агентство «KSS», www.kss.kiev.ua. Индекс 20363.
- В России** Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141.
- В Белоруссии** Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ». Индекс 71141.
- В редакции «ТКЭА»** можно подписаться с любого номера.

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

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

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

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корецкая.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.

Печ. л. 9,0+1,0. Уч.-изд. л. 9,3. Тираж 500 экз. Заказ № 85.

Издательство «Политехперіодика»

(65044, г. Одесса-44, а/я 17).

Отпечатано в типографии издательства «ART-V»
(65091, г. Одесса, ул. Комитетская, 24а).

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2011 № 1–2 (90)

Год издания 35-й

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Д.т.н. Н. М. Вакив (г. Львов)
Д.т.н. В. Н. Годованюк (г. Черновцы)
К.т.н. А. А. Даиковский (г. Киев)
Н. В. Кончиц (г. Киев)
Д.ф.-м.н. В. Ф. Мачулин (г. Киев)
Д.т.н. Г. А. Оборский (г. Одесса)
Е. А. Тихонова (г. Одесса)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. С. Г. Антошук (г. Одесса)
Д.т.н. А. А. Ацеулов (г. Черновцы)
Д.т.н. В. В. Баранов (г. Минск)
К.т.н. Э. Н. Глушеченко,
зам. гл. редактора (г. Киев)
Д.т.н. В. В. Данилов (г. Донецк)
К.т.н. И. Н. Еримичой,
зам. гл. редактора (г. Одесса)
К.т.н. А. А. Ефименко,
ответственный секретарь (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк (г. Киев)
Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)
Д.т.н. В. П. Малахов (г. Одесса)
К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)
Д.т.н. И. Ш. Невлюдов (г. Харьков)
Д.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)
К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)
К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)
Д. ф.-м. н. М. И. Самойлович (г. Москва)
Д.т.н. В. С. Ситников (г. Одесса)
Д.х.н. В. Н. Томашик (г. Киев)
Д.т.н. В. М. Шокало (г. Харьков)
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 26.04 2011 г.)

Электронные средства: исследования, разработки

Волоконно-оптические демультиплексоры с повышенной стойкостью к механическим воздействиям. *Дементьев С. Г., Ключник Н. Т., Кузнецов В. А., Яковлев М. Я.*

3

Автоматизированная диагностика химических источников тока. *Дзензерский В. А., Беда М. А., Житник Н. Е., Лесничий В. Н., Пласин С. В., Ткаченко Ю. А.*

6

Сенсоэлектроника

Радиационная стойкость нитевидных кристаллов SiGe, используемых для сенсоров физических величин. *Дружинин А. А., Островский И. П., Ховерко Ю. Н., Литовченко П. Г., Павловская Н. Т., Павловский Ю. В., Цмоць В. М., Поварчук В. Ю.*

10

Увеличение чувствительности сенсоров изменения показателя преломления среды на основе поверхностного плазмонного резонанса. *Ушенин Ю. В., Самойлов А. В., Христосенко Р. В.*

12

Температурная зависимость рабочих характеристик пьезоэлектрических сенсоров на основе поливинилиденфторида. *Ревенюк Т. А., Федосов С. Н. Автотрассовый газоанализатор. Девятко Г. А., Кучменко В. А., Лацис С. А., Орлов М. А., Партышев В. А., Подольский В. Я.*

15

17

Функциональная микро- и нанoeлектроника

Роль пластической деформации в получении нанокремния. *Смынткина В. А., Кулинич О. А., Яцунский И. Р., Марчук И. А.*

22

Некоторые особенности ограничителя тока на полевом транзисторе. *Каримов А. В., Джуряев Д. Р., Ёдгорова Д. М., Рахматов А. З., Абдулхаев О. А., Каманов Б. М., Тураев А. А.*

25

Обеспечение тепловых режимов

Моделирование температурных режимов в элементах микроэлектронных устройств. *Гаврыш В.И., Косач А.И.*

27

Проектирование радиаторов с оптимальными массогабаритными параметрами. *Шило Г. Н., Огренич Е. В., Гапоненко Н. П.*

30

Система охлаждения испарительно-конденсационного типа для рентгеновских трубок. *Гершуни А. Н., Нищик А. П.*

34

Режим работы двухкаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства, обеспечивающий минимальную интенсивность отказов. *Сочеслав Д.П.*

39

Технологические процессы и оборудование

Высокочастотный реактор с асимметричными электродами для плазмохимического травления полупроводников. *Дудин С. В., Лисовский В. А., Дахов А. Н., Плетнёв В. М.*

42

Оборудование для формирования омических контактов полупроводниковых приборов на основе соединений A_3B_5 . *Александров С. Б., Крупальник К. М., Корнилов Н. А., Кондратьева Т. А.*

49

Материалы электроники

3D-нанокмпоzиты — опаловые матрицы с включениями металлического Со и слоистые структуры «опаловая матрица — Со/Іг». *Самойлович М. И., Ринкевич А. Б., Белянин А. Ф., Пащенко П. В.*

53

Эффективные сцинтилляционные материалы на основе твердых растворов $ZnS_{1-x}Te_x$ и перспективы их применения. *Катрунов К. А., Лалаянц А. И., Гальчинецкий Л. П., Старжинский Н. Г., Жуков А. В., Галкин С. Н., Брылёва Е., Зеня И. М., Трубаева О. Г.*

60

К истории науки и техники

Развитие полупроводниковых СВЧ-технологий в НИИ «Орион». *Болтовец Н. С., Мальцев С. Б.*

65

Аннотации к статьям номера

69

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2010

73

Електронні засоби: дослідження, розробки

Волоконно-оптичні демультиплексори з підвищеною стійкістю до механічної дії. Демєнтьєв С. Г., Ключник М. Т., Кузнецов В. А., Яковлев М. Я. (3)

Автоматизована діагностика хімічних джерел струму. Дзензерський В. О., Беда М. О., Житник М. Я., Лісничий В. М., Пласкін С. В., Ткаченко Ю. О. (6)

Сенсоелектроніка

Радіаційна стійкість ниткоподібних кристалів SiGe, що використовуються для сенсорів фізичних величин. Дружинін А. О., Острівський І. П., Ховерко Ю. М., Литовченко П. Г., Павловська Н. Т., Павловський Ю. В., Цмоць В. М., Поварчук В. Ю. (10)

Збільшення чутливості сенсорів зміни показника заломлення середовища на основі поверхневого плазмонного резонансу. Ушенін Ю. В., Самойлов А. В., Христосенко Р. В. (12)

Температурна залежність робочих характеристик п'єзоелектричних сенсорів на основі полівініліденфториду. Ревенюк Т. А., Федосов С. Н. (15)

Автотрасовий газоаналізатор. Дев'ятко Г. О., Кучменко В. А., Лацис С. А., Орлов М. О., Партишев В. О., Подольський В. Я. (17)

Функціональна мікро- і наноелектроніка

Роль пластичної деформації в одержанні нанокремнію. Сминтина В. А., Кулініч О. А., Яцунський І. Р., Марчук І. О. (22)

Деякі особливості обмежувача струму на польовому транзисторі. Карімов А. В., Джуряєв Д. Р., Йодгорова Д. М., Рахматов А. З., Абдулхасєв О. А., Каманов Б. М., Тураєв А. А. (25)

Забезпечення теплових режимів

Моделювання температурних режимів в елементах мікроелектронних пристроїв. Гавриш В. І., Косач А. І. (27)

Проектування радіаторів з оптимальними масогабаритними параметрами. Шило Г. М., Огреніч Є. В., Гапоненко М. П. (30)

Система охолодження випарувально-конденсаційного типу для рентгенівських трубок. Герішуні О. Н., Ніщик О. П. (34)

Режим роботи двохкаскадного термоелектричного охолоджуючого пристрою, що забезпечує мінімальну інтенсивність відмов. Сочеслав Д. П. (39)

Технологічні процеси та обладнання

Високочастотний реактор з асиметричними електродами для однорідного плазмохімічного травлення напівпровідників. Дудін С. В., Лісовський В. О., Дахов О. М., Плетнієв В. М. (42)

Обладнання для формування омичних контактів напівпровідникових приладів на основі сполук A_3B_5 . Александров С. Б., Крупальник К. М., Корнілов Н. О., Кондрат'єва Т. О. (49)

Матеріали електроніки

3D-наноккомпозити — опалові матриці з включеннями металічного Со та слоїсті структури «опалова матриця — Со/Іг». Самойлович М. І., Ринкевич А. Б., Белянін А. Ф., Пащенко П. В. (53)

Ефективні сцинтиляційні матеріали на основі твердих розчинів $ZnS_{1-x}Te_x$ та перспективи їх застосування. Катрунов К. О., Лалайяц О. І., Гальчинецький Н. Г., Старжинський Н. Г., Жуков О. В., Галкін С. Н., Брильова К., Зєня І. М., Трубаєва О. Г. (60)

До історії науки і техніки

Розвиток напівпровідникових НВЧ-технологій у НДІ «Орион». Болтовець Н. С., Мальцев С. Б. (65)

Electronic means: investigations, development

Fiber-optic demultiplexers with high mechanical resistance. Dementyev S. G., Klyuchnik N. T., Kuznetsov V. A., Yakovlev M. Ya. (3)

Automated diagnosis of chemical current sources. Dzenzerskiy V. A., Plaksin S. V., Beda M. A., Zhitnik N. E., Lesnichiy V. N., Tkachenko Yu. A. (6)

Sensoelectronics

Stability to irradiation of SiGe whisker crystals used for sensors of physical values. Druzhinin A. A., Ostrovskiy I. P., Khoverko Yu. N., Litovchenko P. G., Pavlovskaya N. T., Pavlovskiy Yu. V., Tsmots V. M., Povarchuk V. Yu. (10)

Increase in sensitivity of sensor units of environment refraction index change based on superficial plasmon resonance. Ushenin Yu. V., Samoylov R. V., Khristosenko R. V. (12)

Temperature dependence of working characteristics of piezoelectric sensors based on polyvinylidene fluoride. Revenyuk T. A., Fedosov S. N. (15)

Alignment gas analyzer. Devyatko G. A., Kuchmenko V. A., Latsis S. A., Orlov M. A., Partyshev V. O., Podolskiy V. Y. (17)

Functional micro- and nanoelectronics

Plastic deformation in nanostructure silicon formation. Smyntyna V. A., Kulnich O. A., Yatsunki I. R., Marchuk I. A. (22)

Some features of a current limiter on the field-effect transistor. Karimov A. V., Djurayev D. R., Yodgorova D. M., Rakhmatov A. Z., Abdulkhayev O. A., Kamanov B. M., Turayev A. A. (25)

Ensuring of thermal modes

Simulation of temperature conditions in the elements of microelectronic devices. Gavrysh V. I., Kosach A. I. (27)

Mass and overall optimization of radiator design. Shilo G. N., Ogrenich E. V., Gaponenko N. P. (30)

Cooling evaporating-condensation type system for X-ray tubes. Gershuni A. N., Nishchik A. P. (34)

The operating mode of the two-cascade thermoelectric cooling device providing the minimum failure rate. Socheslav D. P. (39)

Technological processes and equipment

RF reactor with asymmetrical electrodes for reactive ion etching of semiconductors. Dudin S. V., Lisovskiy V. A., Dahov A. N., Pletniy V. M. (42)

The equipment for ohmic contacts formation in semi-conductor devices based on A_3B_5 connections. Aleksandrov S. B., Krupal'nik K. M., Kornilov N. O., Kondratyeva T. O. (49)

Materials of electronics

3D-nanocomposites — the opal matrices with metal Co inclusions and the layered structures "opal matrices — Co/Ir". Samoylovich M. I., Rinkevich A. B., Belyanin A. F., Paschenko P. V. (53)

Effective scintillation materials based on solid solutions $ZnS_{1-x}Te_x$ and perspectives of their application. Katrunov K. A., Lalayantz A. I., Gal'chinskii N. P., Starzhinskiy N. V., Zhukov A. V., Galkin S. N., Brilyova Ye., Zhenya I. M., Trubaeva O. G. (60)

To a history of science and engineering

Microwave technologies development in SRI "Orion". Boltovets N. S., Maltsev S. B. (65)

С. Г. ДЕМЕНТЬЕВ, к. т. н. Н. Т. КЛЮЧНИК,
В. А. КУЗНЕЦОВ, к. т. н. М. Я. ЯКОВЛЕВ

Россия, г. Москва, ЦНИТИ «Техномаш-ВОС»
E-mail: optdevice@yandex.ru

Дата поступления в редакцию
30.09 2010 г.

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

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДЕМУЛЬТИПЛЕКСОРЫ С ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТЬЮ К МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Рассмотрены возможности создания сплавленных одномодовых демультиплексоров с повышенной стойкостью к механическим воздействиям. Исследованы зависимости резонансных частот механических колебаний участка сплавления от конструктивных параметров демультиплексоров.

В последние годы широкое распространение получили волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) со спектральным уплотнением каналов (WDM). Для их построения используются специальные оптические устройства — мультиплексоры/демультиплексоры, представляющие собой спектрально-селективные разветвители. Необходимо отметить, что в качестве мультиплексоров и демультиплексоров используются одни и те же обратимые оптические устройства спектрального уплотнения, которые далее будем называть демультиплексорами.

Из всех типов демультиплексоров наиболее широко применяются двухканальные демультиплексоры с уплотнением по волнам длиной 1310 и 1550 нм, выполненные на основе одномодовых сплавленных биконических разветвителей типа 1×2 [1]. Такие устройства отличаются достаточно высоким уровнем оптических характеристик при относительно низкой стоимости изделий.

В настоящее время двухканальные демультиплексоры начинают активно применять для построения локальных систем передачи информации, а также в аппаратуре различных подвижных объектов. Использование двухканальных демультиплексоров позволяет решить задачу организации дуплексных систем связи с передачей информации по одному оптическому волокну (ОВ) одновременно в обоих направлениях.

В зависимости от назначения и места установки демультиплексоры могут подвергаться механическим воздействиям — вибрации и ударам. Такие воздействия наиболее критичны для сплавленных биконических разветвителей из-за хрупкости материала (кварцевого стекла) их световодной структуры.

Анализ характеристик элементной базы ВОСП, выпускаемой в настоящее время рядом зарубежных фирм и отечественных предприятий, показывает, что эксплуатационные характеристики промышленных демультиплексоров не в полной мере соответствуют требованиям устойчивости к механическим воздей-

ствиям. Поэтому разработка процессов создания демультиплексоров с повышенной стойкостью к механическим воздействиям является актуальной.

В настоящей работе рассмотрены возможности создания таких демультиплексоров на основе сплавленных одномодовых разветвителей.

Принцип работы и анализ механических характеристик двухканального демультиплексора

Двухканальный одномодовый демультиплексор представляет собой волоконный биконический разветвитель и состоит из двух сплавленных боковыми поверхностями оптических волокон (рис. 1). На участке сплавления волокон сформирована общая суженная зона, ограниченная с двух сторон плавными коническими переходами, которая является областью связи [1]. Сплавленная волоконная структура зафиксирована с помощью клеевой композиции на подложке или в капилляре из кварцевого стекла. Биконическая структура на длине l (между зонами фиксации волокон) обычно остается не покрытой защитным полимерным слоем, что необходимо для достижения малых вносимых потерь и требуемого коэффициента изоляции. Уровень оптической мощности, переданной из одного волокна в другое, зависит от длины волны излучения λ_i , передаваемого по i -му волокну, и длины области связи l_f .

Анализ одномодового биконического разветвителя, приведенный в [2], основывается на рассмотрении распространяющихся в нем двух (четной и нечетной) фундаментальных мод [3, 4]. В результате такого анализа определяются значения мощности оптического излучения P_1 и P_2 в выходных каналах разветвителя и коэффициент связи, определяющий степень взаимодействия между собственными модами волновода с постоянным поперечным сечением и постоянным показателем преломления на длине взаимодействия.

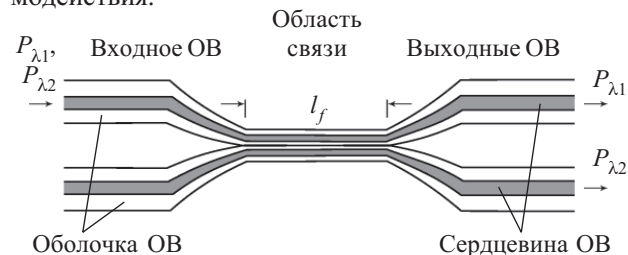


Рис. 1. Схематическое изображение одномодового демультиплексора

Так как для реального сплавленного разветвителя значение l_f фиксировано, а коэффициент связи зависит от длины волны излучения, такой разветвитель будет обладать спектрально-селективными свойствами. Изготавливая разветвитель с областью связи определенной длины, добиваются объединения или разделения волн различной длины.

Оптические волокна, из которых изготавливаются демультиплексоры, могут иметь микротрещины, вызванные технологическими причинами. Вибрационные воздействия обуславливают дополнительные напряжения в структуре кварцевого стекла, что увеличивает микротрещины и приводит к разрушению световодных элементов и, в итоге, к выходу демультиплексора из строя. Наибольшую опасность представляет случай, когда частота вибрации совпадает с собственными частотами колебаний световодных элементов, т. е. когда возникают резонансные явления. Поэтому при проектировании и изготовлении элементов и узлов, подвергаемых вибрационным воздействиям, необходимо обеспечить условие, при котором низшая резонансная частота конструкции превышает верхнюю частоту диапазона внешнего воздействия (обычно 10—2000 Гц).

Одним из путей повышения механической стойкости оптических разветвителей и демультиплексоров на основе сплавленных волокон является заливка биконического участка полимерным материалом с низким показателем преломления. Однако это приводит к изменению заданных оптических параметров устройства и к увеличению их температурной чувствительности. Поэтому в настоящей работе рассмотрены пути повышения механической стойкости демультиплексоров, основанные на выборе оптимальной геометрии биконического перехода и усилия натяжения волокон, обеспечивающих достаточно высокие значения собственных частот механических колебаний сплавленной биконической структуры.

Анализ механических характеристик сплавленной биконической структуры проводился в соответствии с моделью, предложенной в [5]. Такая структура, представленная на **рис. 2**, включает в себя участок длиной l_f с постоянным радиусом поперечного сече-

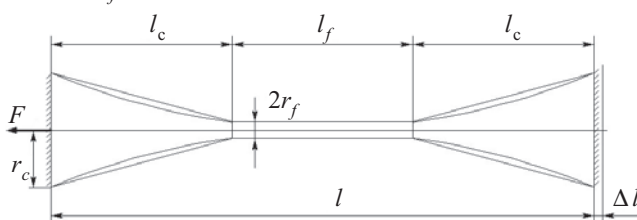


Рис. 2. Модель сплавленной биконической структуры для расчета собственных частот сплавленного разветвителя

ния r_f , два участка длиной l_c в виде усеченных конусов с радиусом большего основания r_c . Удлинение Δl обусловлено осевым усилием F , обеспечивающим натяжение сплавленной волоконной структуры.

Низшая резонансная частота собственных колебаний биконического участка сплавленного разветвителя определяется выражением

$$f_r = \frac{1}{4l^2} \sqrt{\frac{g F}{\gamma C}},$$

где g — ускорение свободного падения;

γ — удельный вес материала биконической структуры (для кварцевого стекла $\gamma/g = 2,245 \cdot 10^{-9} \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{мм}^4$);

C — коэффициент, зависящий от геометрических параметров сплавленной биконической структуры.

Анализ зависимостей, приведенных на **рис. 3**, показывает, что для получения достаточно больших значений собственных частот в сплавленной биконической структуре (свыше 2000 Гц) необходимо при ее формировании обеспечить натяжение с усилием не менее 0,2 Н. При радиусе $r_f = 10$ мкм относительное удлинение центральной части биконической структуры составит $\Delta l_f / l_f > 0,9\%$ при величине механического напряжения более 670 МПа. Достаточно высокие значения указанных характеристик делают весьма проблематичным обеспечение надежности сплавленной биконической структуры.

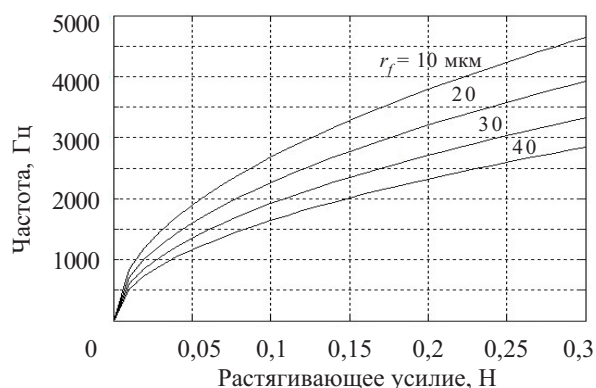


Рис. 3. Расчетная зависимость частоты колебаний биконического участка сплавленного разветвителя от растягивающего усилия для различных значений r_f при $l = 38,5$ мм и $l_f = 11,5$ мм

Увеличения резонансной частоты механических колебаний конструкции сплавленных демультиплексоров, а следовательно, и повышения их стойкости к вибрационным воздействиям также можно достигнуть при меньших значениях усилия натяжения за счет уменьшения длины сплавленного биконического участка. Однако при этом существуют ограничения, обусловленные возрастанием вносимых потерь.

Экспериментальные исследования

Изготовление экспериментальных образцов демультиплексоров проводилось на установке, структурная схема которой представлена на **рис. 4**.

Для фиксации оптических волокон 2 используются узлы прижима 3, установленные на подвижных каретках 4, осуществляющих растяжку участка сплавления. В качестве высокотемпературного нагревателя 6 используется керамический микронагреватель, что позволяет повысить стабильность температуры в зоне нагрева и улучшить воспроизводимость процесса. Измерение оптической мощности в выходных каналах разветвителя осуществляется с помощью устройства контроля, включающего в себя источник 1 и два приемника излучения 8.

Для изготовления демультиплексоров использовалось одномодовое оптическое волокно типа SMF-28 с диаметром (сердцевина/оболочка) 8/125 мкм, диаметр

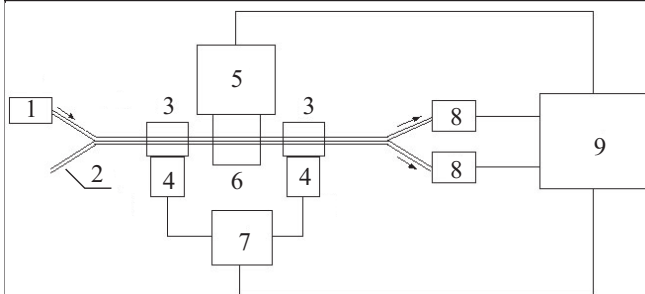


Рис. 4. Структурная схема установки для изготовления сплавленных разветвителей:

1 — источник излучения; 2 — оптические волокна; 3 — узлы прижима волокон; 4 — подвижные каретки; 5 — блок питания нагревателя; 6 — высокотемпературный нагреватель; 7 — блок электропривода; 8 — фотоприемники; 9 — блок управления

ром модового пятна 9,2 мкм на волне длиной 1310 нм и числовой апертурой $NA = 0,14$.

Основными технологическими параметрами при изготовлении разветвителей являются температура нагрева и скорость растяжения зоны сплавления, задаваемые с помощью блока управления 9.

Температура нагрева зоны сплавления волокон составляла 1500–1600°C, скорость растяжения выбиралась в пределах от 10 до 60 мкм/с.

После завершения процесса формирования демультиплексора сплавленный участок волокон закреплялся на подложке из кварцевого стекла с помощью акриловой полимерной композиции с добавлением наполнителя, обеспечивающего низкое значение температурного коэффициента расширения. При этом путем выбора места фиксации волокон обеспечивалась заданная длина l свободного от полимерной композиции биконического участка. При фиксации волокон на подложке также контролировалось усилие натяжения F .

В соответствии с приведенной методикой были изготовлены экспериментальные образцы демультиплексоров с различной длиной биконического участка l при фиксированном значении усилия натяжения F .

Для определения резонансных частот механических колебаний сплавленного участка демультиплексора использовался вибростенд, обеспечивающий вибрационное воздействие на исследуемый образец в диапазоне частот 0–11000 Гц.

Результаты исследований конструкции демультиплексора при усилии натяжения 0,01 Н, исходной длине биконического участка 50 мм приведены на рис. 5.

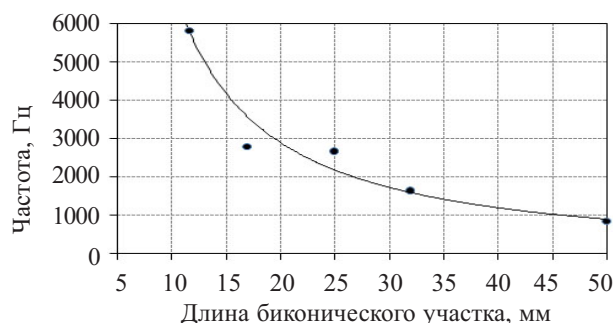


Рис. 5. Экспериментальная зависимость собственной частоты механических колебаний конструкции демультиплексора от длины биконического участка

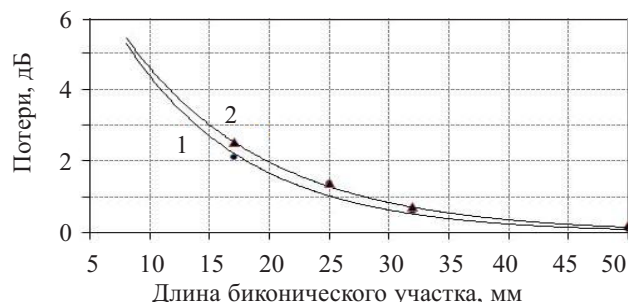


Рис. 6. Экспериментальная зависимость потерь, вносимых демультиплексором, от длины биконического участка для канала волны длиной 1310 мкм (1) и 1550 мкм (2)

Одной из основных характеристик демультиплексора являются вносимые им потери мощности. Зависимость таких потерь от длины биконического участка представлена на рис. 6.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что путем уменьшения длины биконического участка за счет уменьшения расстояния между зонами фиксации волокон можно повышать резонансную частоту механических колебаний конструкции демультиплексора. В частности, при усилии натяжения волокон 0,01 Н уменьшение длины биконического участка до 27 мм позволило повысить значение собственной частоты механических колебаний от 900 до 2000 Гц. При этом вносимые потери увеличились всего на 0,8 дБ. Коэффициент оптической изоляции изменялся в пределах 17–19 дБ. Дальнейшее уменьшение длины биконического участка, соответствующее возрастанию собственной частоты механических колебаний, приводило к резкому возрастанию потерь.

Стойкость демультиплексоров с уменьшенной длиной биконического участка к воздействию вибрации с виброускорением до 20g в диапазоне частот от 10 до 2000 Гц подтверждена экспериментально.

Проведенный анализ механических характеристик сплавленных биконических структур волоконно-оптических двухканальных демультиплексоров позволил определить пути повышения их стойкости к механическим воздействиям, а также увеличения собственной частоты механических колебаний конструкции демультиплексоров.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Рождественский Ю. В. Сплавные волоконно-оптические мультиплексоры/демультиплексоры и их применение в телекоммуникационных системах // Фотон-экспресс. — 2004. — №1. — С. 16–18. [Rozhdestvenskii Yu. V. // Foton-ekspress. 2004. N1. S. 16]
2. Деметьев С. Г., Ключник Н. Т., Кузнецов В. А., Яковлев М. Я. Волоконно-оптические демультиплексоры для систем передачи информации // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2010. — № 2. — С. 43–46. [Dement'ev S. G., Klyuchnik N. T., Kuznetsov V. A., Yakovlev M. YA. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2010. N 2. P. 43]
3. Иванов А. Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. — М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999. [Ivanov A. B. Volokonnaya optika. Komponenty, sistemy peredachi, izmereniya. M. Kompaniya SAIRUS SYSTEMS, 1999]
4. Marcuse D. Theory of dielectric optical wave-guides. — Boston: Academic Press, 1991.
5. Suhir E. Vibration frequency of a fused biconical taper (FBT) lightwave coupler // Journal of lightwave technology. — 1992. — Vol. 10, N 7. — P. 898–902.

Д. т. н. В. А. ДЗЕНЗЕРСКИЙ, М. А. БЕДА, Н. Е. ЖИТНИК,
В. Н. ЛЕСНИЧИЙ, д. ф.-м. н. С. В. ПЛАКСИН, Ю. А. ТКАЧЕНКО

Украина, г. Днепропетровск, Институт транспортных систем и технологий
НАНУ «Трансмаг»
E-mail: tkachenko@westa-inter.com

Дата поступления в редакцию
31.08 2010 г.

Оппонент к. т. н. Б. А. ДЕМЬЯНЧУК
(ОНУ им. Мечникова, г. Одесса)

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ДИАГНОСТИКА ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

Предложен метод диагностики, основанный на анализе хронопотенциограмм, отображающих кинетику электрохимического процесса в источнике тока в результате подачи на него тестового импульса, с последующей компьютерной обработкой результатов.

В связи с расширением сферы использования химических источников тока (ХИТ) с появлением таких потребителей как системы телекоммуникаций и связи, гибридный и электротранспорт, автономные электростанции малой и средней мощности возникает задача не только существенно увеличить объем производства ХИТ, но и повысить их качественные показатели. Последнее неразрывно связано с созданием более современных методов и средств диагностики состояния ХИТ как в процессе производства, так и в период их эксплуатации.

Благодаря широкому внедрению импульсных методов формирования и зарядки ХИТ повысился интерес к импульсным (нестационарным) методам диагностики, обеспечивающим более широкие информационные возможности, чем традиционные методы, и позволяющим совмещать процессы формирования, зарядки и энергообеспечения с процессами контроля и измерения текущих параметров ХИТ. Варианты технической реализации и информационной достоверности импульсных методов диагностики ХИТ проанализированы в [1—3]. Однако их явное преимущество, связанное с увеличением числа измеряемых параметров, теряется при использовании трудоемких ручных методов обработки и анализа результатов измерений.

Необходимость разработки методов автоматизированной диагностики состояния химических источников тока и создания на их основе систем мониторинга определяет актуальность работ в этой области. Одним из путей решения такой задачи является разработка метода автоматизированной обработки результатов измерения совокупности текущих параметров ХИТ.

В настоящей работе предлагается метод, основанный на анализе хронопотенциограмм (ХПГ), отображающих кинетику электрохимического процесса в источнике в результате подачи на него тестового импульса.

Реакция ХИТ на токовый импульс постоянной величины как функция напряжения на клеммах источника тока от времени содержит достаточно полную и объективную информацию о кинетических параметрах процесса, которая может быть использована для определения параметров ХИТ. Обоснование связи кинетических параметров электрохимического процесса с параметрами ХИТ применительно к свинцово-кислотным аккумуляторам, а также требования к параметрам импульса тока приведены в [4].

Изучение кинетики процессов в ХИТ импульсным методом позволило выделить ряд параметров, которые могут быть использованы как базовые для диагностики химического источника тока, а также как информационно-управляющие при реализации адаптивных режимов зарядки ХИТ [5]. Совокупность одновременно измеряемых информационных параметров и алгоритм адаптивной зарядки ХИТ с их использованием описаны в [5, 6].

Графическая форма реального отклика ХИТ на токовый импульс в виде функциональной зависимости напряжения от времени приведена на рис. 1 и отображает кинетику электрохимического процесса

Из рисунка видно, что при анализе ХПГ можно получить следующие параметры: U_{pc} — напряжение разомкнутой цепи; U_{a1} , U_{a2} — падение напряжения на активном внутреннем сопротивлении ХИТ в моменты подачи и снятия импульса, соответственно; U_{pk} — концентрационная составляющая напряжения поляризации; U_{ex} — электрохимическая составляющая напряжения поляризации; $U_n = U_{ex} + U_{pk}$ — полное напряжение поляризации; t_{ex} — время протекания электрохимической стадии процесса; t_u — длительность импульса тока; t_{cp} — длительность спада потенциала с момента снятия импульса тока; U_{cnpk} — конечное значение напряжения спада при $t_{cp} = n\tau$, где τ — постоянная времени разряда электрохимической системы, n — коэффициент, учитывающий точность определения параметра.

Для постоянной времени разряда ХИТ τ справедливо соотношение $\tau = R_n C_n$, где R_n — сопротивление поляризации, C_n — псевдоемкость химического источника тока.

С другой стороны, величину τ , а следовательно, и псевдоемкость можно определить из времени спада t_{cp} , полученного из ХПГ химического источника тока. Значение поляризационного сопротивления опреде-

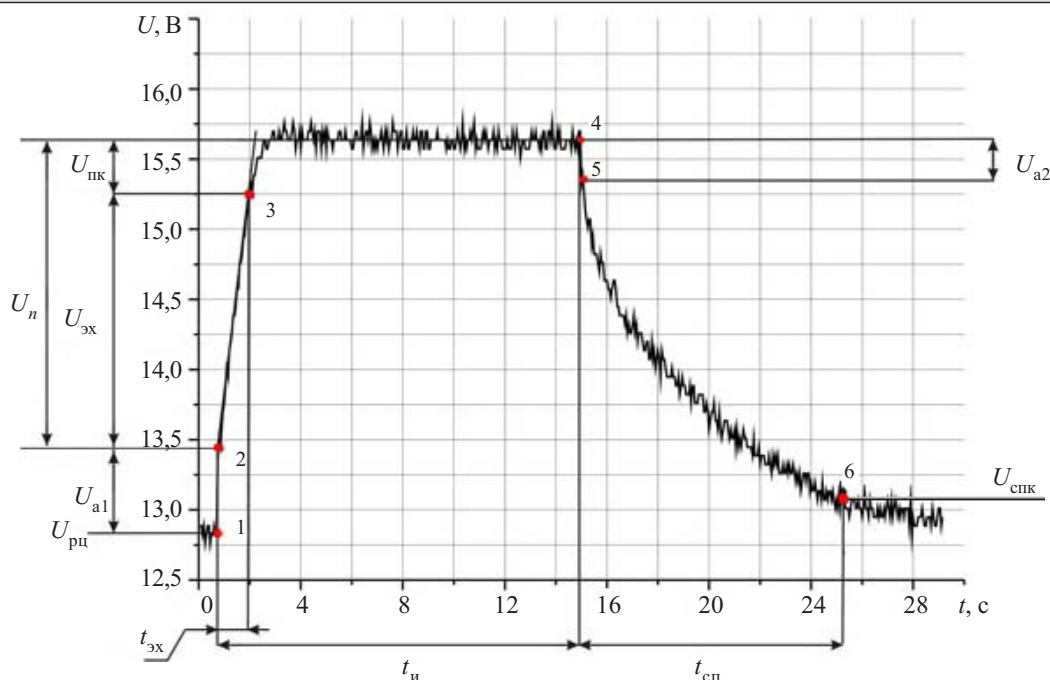


Рис. 1. Хронопотенциограмма свинцово-кислотной аккумуляторной батареи

ляли из отношения величины падения напряжения U_n на поляризационном сопротивлении к величине зарядного тока I_3 . В результате получено выражение для определения псевдоемкости C_n

$$t_{сп} = n\tau = n \frac{U_n}{I_3} C_n,$$

откуда

$$C_n = \frac{t_{сп} I_3}{n U_n}.$$

Установившееся значение напряжения на ХИТ принимается равным $U_{рц}$. Псевдоемкость C_n является «фарадеевой», т. е. она обусловлена электрохимической реакцией и эквивалентна количеству запасенной источником химической энергии, которое пропорционально его электрической емкости, выраженной в ампер-часах.

Определение параметров связано с нахождением координат информационных точек, обозначенных на рисунке, ограничивающих участки хронопотенциограммы, которые соответствуют определенным стадиям электрохимического процесса. Координаты точек являются информационными признаками, и их определение, как видно из рисунка, в большинстве случаев осложнено наличием шумов как электрохимической природы, сопровождающих процессы в ХИТ, так и вносимых измерительной аппаратурой. Оптимальными методами анализа параметров, измеренных в условиях шумов больших уровней, могут быть математические методы обработки сигналов.

Для автоматизации процесса определения параметров ХИТ был разработан метод обработки хронопотенциограмм в среде Mathcad [7], который позволяет программно рассчитывать параметры ХИТ с последующей записью их в табличной форме.

Расчет производился по алгоритму, блок-схема которого показана на рис. 2, следующим образом.

1. Вначале производилось считывание данных измеренной хронопотенциограммы из текстового файла, выбор данных из нужных столбцов и их преобразование.

2. Сглаживание ХПГ с целью выделения полезного сигнала из шумов осуществлялось двумя различными фильтрами: medsmooth-сглаживание — с помощью скользящей медианы и ksmooth — с использованием гауссова ядра. Коэффициент сглаживания для фильтров выбирался из условия сохранения полезного сигнала.

3. Массив данных, сглаженный при помощи фильтра ksmooth, линейно интерполировался, а полученная функция дифференцировалась.

4. На кривой продифференцированных данных максимальное значение соответствовало координатам точки 2, а минимальное — координатам точки 4 (см. рис. 1).

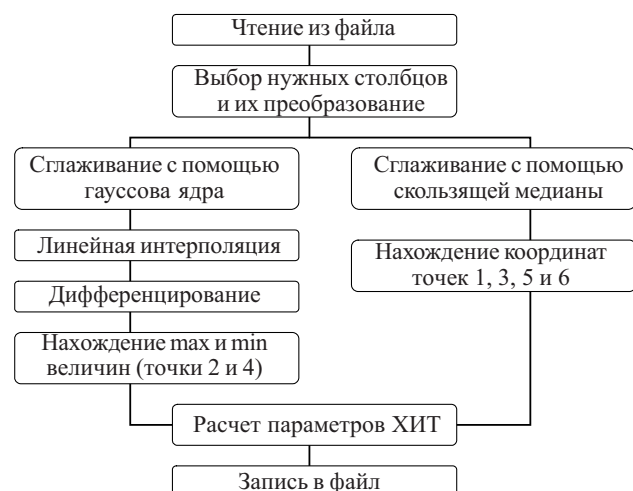


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета информационных параметров ХИТ

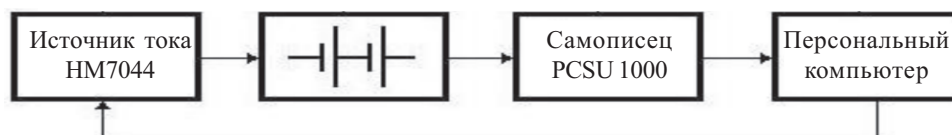


Рис. 3. Блок-схема установки для определения параметров батарей

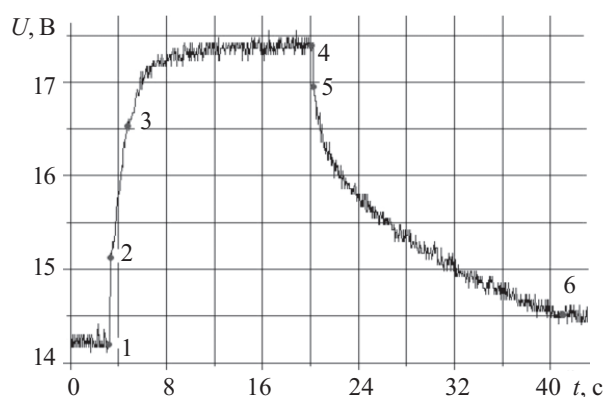
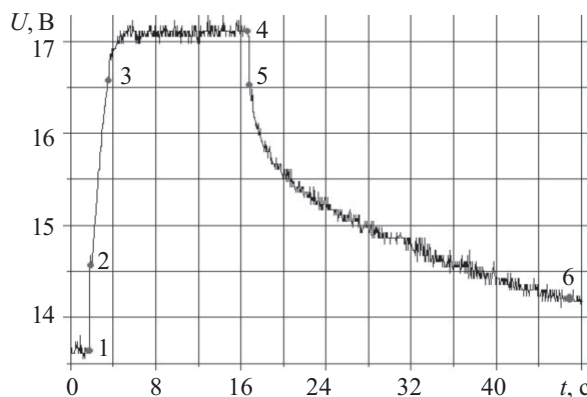


Рис. 4. ХПГ аккумуляторных батарей 6СТ-65А (а) и 6СТ-74А(Е) (б)

5. Координаты точек 1, 3, 5 и 6 рассчитывались из массива данных, обработанных фильтром medsmooth. Специфика такого сглаживания заключается в получении ступенчатого сигнала с ровными участками, что позволяет упростить и сделать более точным нахождение координат точек. Точки 1 и 5 находились из условия равенства координат двух соседних точек, а точки 3 и 6 — из условия, что значения координат по напряжению этих точек и следующих за ними N точек равны. Для повышения точности определения параметров ХИТ в полученные данные вносились поправки с учетом коэффициента сглаживания.

6. С помощью полученных значений координат (t_i , Y_{ii}) соответствующих точек производился расчет информационных параметров ХИТ и запись их в файл. Расчет параметров производится по сглаженному массиву данных Y_{ii} . При этом были использованы следующие обозначения: t — время дискретизации, t_1 — t_6 — найденные программой численные значения координат точек 1—6. Тогда

- напряжение разомкнутой цепи $U_{pc} = Y_{t1}$;
- падение напряжения на активном внутреннем сопротивлении во время подачи импульса $U_{a1} = Y_{t2} - Y_{t1}$;

— электрохимическая составляющая напряжения поляризации $U_{ex} = Y_{t3} - Y_{t2}$;

— концентрационная составляющая напряжения поляризации $U_{pk} = Y_{t4} - Y_{t3}$;

— падение напряжения на активном внутреннем сопротивлении в момент снятия импульса $U_{a2} = Y_{t4} - Y_{t5}$;

— конечное значение напряжения спада $U_{cпк} = Y_{t6}$;

— время протекания электрохимической стадии процесса $t_{ex} = (t_3 - t_2)t$;

— длительность спада потенциала с момента снятия импульса тока $t_{cп} = (t_6 - t_4)t$;

— крутизна участка, отражающего электрохимическую стадию процесса $k = U_{ex} / t_{ex}$.

Разработанный метод был апробирован при определении параметров свинцово-кислотных аккумуляторных батарей, имеющих различный срок эксплуатации и степень заряженности.

Блок-схема экспериментальной установки для автоматизированного определения параметров батарей приведена на рис. 3.

Для примера рассмотрим результаты определения параметров батареи 6СТ-65А, бывшей в эксплуатации, и новой аккумуляторной батареи 6СТ-74А(Е)

Результаты обработки информационных параметров ХИТ

Папараметры ХИТ	Батарея 6СТ-65А			Батарея 6СТ-74А (Е)		
	Ручная обработка	Программная обработка		Ручная обработка	Программная обработка	
		Результаты	Погрешность, %		Результаты	Погрешность, %
U_{pc} , В	14,17	14,22	0,4	13,65	13,67	0,2
U_{a1} , В	0,94	0,91	3,3	0,90	0,88	2,3
U_{ex} , В	1,50	1,44	4,2	2,05	1,88	9,04
U_{pk} , В	0,75	0,87	13,8	0,77	0,69	11,6
U_{a2} , В	0,56	0,66	15,2	0,67	0,63	6,4
$U_{cпк}$, В	14,73	14,49	1,66	14,32	14,86	3,6
t_{ex} , с	1,65	1,50	10	1,66	1,50	10,7
$t_{cпк}$, с	18,6	20,9	11	29	27,4	5,8
k , В/с	0,91	0,96	5,2	1,24	1,25	0,8

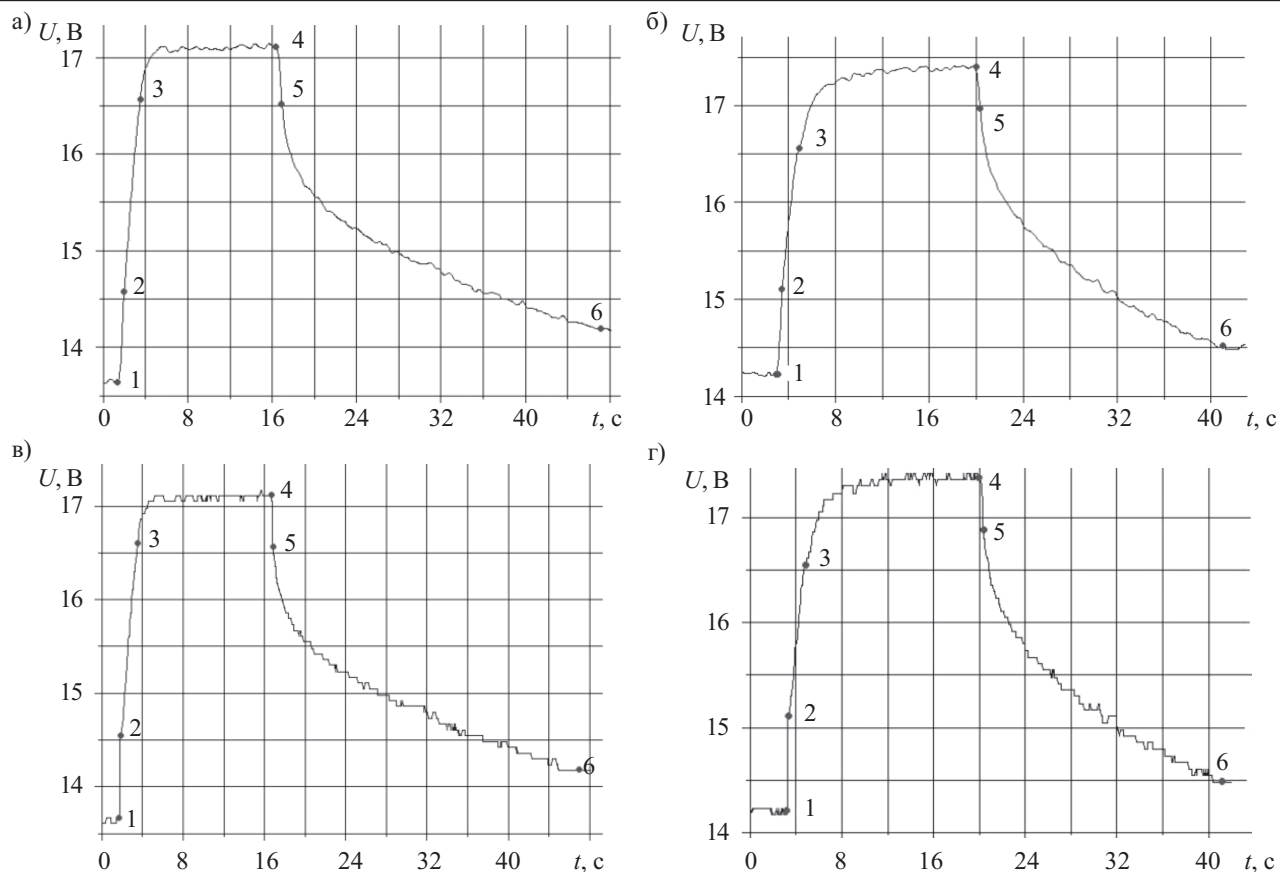


Рис. 5. ХПГ аккумуляторных батарей 6СТ-65А (а, в) и 6СТ-74А(Е) (б, г), сглаженные с использованием функций ksmooth (а, б) и medsmooth (в, г)

(ЗАО «Веста-Днепр»). Хронопотенциограммы этих батарей приведены на **рис. 4**. Те же ХПГ, обработанные по предлагаемому алгоритму, приведены на **рис. 5**, а результаты обработки значений параметров, полученных из этих ХПГ, отражены в **таблице**. При этом значение погрешности определяли из выражения

$$100\% - \frac{P_o}{P_o} \cdot 100\%,$$

где P_o и P_o — результаты ручной и программной обработки соответственно. За 100% принималось значение, полученное при ручной обработке.

Сравнение результатов ручной и программной обработки подтверждает приемлемую точность определения параметров, которая зависит от степени зашумленности участка ХПГ в окрестности вычисления координат точки.

Разработанный метод автоматизированной диагностики химических источников тока основан на программной обработке полученных из хронопотенциограммы и отфильтрованных из шумов кинетических параметров электрохимического процесса при подаче на ХИТ импульса тока. Математическая обработка значений кинетических параметров позволяет получить текущие параметры ХИТ на основе установленной между ними связи. Метод может быть использован в системах автоматизированного контроля параметров ХИТ при их производстве и в процессе эксплуатации.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Сиденко С. В., Безручко К. В., Давидов А. О. Диагностирование аккумуляторов энергоустановок летательных аппаратов импульсным током // Вісник Дніпропетровського ун-ту: серія «Ракетно-космічна техніка». — 2007. — № 9/2. — С. 126—132. [Sidenko S. V., Bezruchko K. V., Davidov A. O. // Visnik Dnipropetrovsk'kogo un-tu: seriya «Raketno-kosmichna tekhnika». 2007. N 9/2. S. 126]
2. Патент 78327 України. Спосіб контролю стану свинцевого аккумулятора / В. О. Дзензерський, М. Я. Житник, С. В. Плаксін та ін. — 15.03.2004. [Patent 78327 Ukrayini / V. O. Dzenzers'kii, M. YA. Zhitnik, S. V. Plaksin ta in. 15.03.2004]
3. Hariprakash B., Martha S. K., Jaikumar Arthi, Shukla A. K. On-line monitoring of lead-acid batteries by galvanostatic non-destructive technique // Journal of Power Sources. — 2004. — Vol. 137. — P. 128—133.
4. Дзензерский В. А., Житник Н. Е., Плаксин С. В., Соколовский И. И. Контроль состояния стартерных свинцовых аккумуляторов хронопотенциометрическим методом // Електротехніка та електроенергетика. — 2005. — № 1. — С. 13—18. [Dzenzerskii V. A., Zhitnik N. E., Plaksin S. V., Sokolovskii I. I. // Elektrotekhnika ta elektroenergetika. 2005. N 1. P. 13]
5. Житник Н. Е., Миропольский Ю. Л., Плаксин С. В. и др. Информационные параметры для реализации адаптивной зарядки вторичных химических источников тока // Технологія і конструювання в електронній апаратурі. — 2008. — № 5. — С. 40—42. [Zhitnik N. E., Miropol'skii Yu. L., Plaksin S. V. i dr. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature. 2008. N 5. P. 40]
6. Дзензерский В. А., Житник Н. Е., Плаксин С. В. и др. Метод многопараметрического контроля адаптивной зарядки вторичных химических источников тока // Електроніка і зв'язь. — 2010. — № 2. — С. 51—56. [Dzenzerskii V. A., Zhitnik N. E., Plaksin S. V. i dr. // Elektronika i svyaz'. 2010. N 2. P. 51]
7. Макаров Е. Г. Mathcad: учебный курс. — СПб.: Питер, 2009. [Makarov E. G. Mathcad: uchebnyi kurs. SPb. Piter. 2009]

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, к. ф.-м. н. И. П. ОСТРОВСКИЙ,
к. т. н. Ю. Н. ХОВЕРКО, д. ф.-м. н. П. Г. ЛИТОВЧЕНКО,
Н. Т. ПАВЛОВСКАЯ, к. ф.-м. н. Ю. В. ПАВЛОВСКИЙ,
д. ф.-м. н. В. М. ЦМОЦЬ, к. ф.-м. н. В. Ю. ПОВАРЧУК

Украина, НУ «Львовская политехника»;

Дрогобычский гос. педагогический ун-т имени Ивана Франко;
г. Киев, Институт ядерных исследований НАНУ, Институт физики НАНУ
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
08.07 2010 г.

Оппонент к. ф.-м. н. И. М. КУПЧАК
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ SiGe, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ СЕНСОРОВ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Приведены результаты исследования влияния облучения γ -квантами дозами до $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ и магнитного поля с индукцией до 14 Тл на электропроводность нитевидных кристаллов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ в интервале температуры 4,2—300 К.

Нитевидные кристаллы $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (при $x = 0,03$) с повышенной концентрацией примесей вблизи перехода «металл — изолятор» используют как чувствительные элементы сенсоров механических и тепловых величин [1, 2]. Важной научно-технической проблемой, которая не до конца решена, является создание сенсоров физических величин, работоспособных в сложных условиях эксплуатации (сильные магнитные поля, низкая температура, радиационное облучение). В [3, 4] приведены результаты исследования влияния сильных магнитных полей и облучения γ -квантами дозами до $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ на электропроводность нитевидных кристаллов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. В этих работах анализируются физические механизмы возникновения радиационных дефектов и их влияние на электропроводность нитевидных кристаллов (НК). С практической точки зрения важным параметром является допустимая доза облучения, т. е. та, которая существенно не влияет на характеристики сенсоров. Поэтому целью настоящей работы было установление возможности создания радиационно стойких сенсоров, работоспособных в условиях сильных магнитных полей. Для этого исследовали влияние магнитного поля с индукцией до 14 Тл и излучения γ -квантов (излучение Co^{60} с дозами до $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$) на электропроводность нитевидных кристаллов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,03$), у которых примеси накапливаются вблизи перехода «металл — изолятор», в интервале температуры 4,2—300 К.

Для исследований были выбраны НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,01—0,03$) с удельным сопротивлением $\rho = 0,008—0,025 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, выращенные методом химических транспортных реакций в закрытой бромидной системе с использованием золота в качестве инициатора роста. Диаметр кристаллов находился в пределах $40 \pm 2 \text{ мкм}$, длина — 2—3 мм. Состав твердого раствора определялся методом микрозондового анализа на установке САМЕВАХ. Точность определения

молярной доли компонентов составляла 0,01—0,03%. Облучение образцов γ -квантами осуществлялось с помощью кобальтовой пушки (излучение Co^{60}). После облучения образцов дозами γ -квантов $6 \cdot 10^{16}$; $2,6 \cdot 10^{17}$; $4 \cdot 10^{17}$; $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ определяли температурную зависимость их электропроводности в интервале температуры 4,2—300 К и низкотемпературное магнетосопротивление в полях до 12 Тл (в Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур, г. Вроцлав, Польша).

Как видно из **рис. 1**, сопротивление кристаллов после облучения практически не изменяется во всем температурном интервале. На магнетосопротивление этих же образцов облучение влияет сильнее (**рис. 2**). Дозовая зависимость изменения сопротивления НК под воздействием облучения, приведенная на **рис. 3**, свидетельствует о том, что доза $2,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ является допустимой для этих материалов при использовании их в качестве радиационно стойких сенсоров. Однако следует отметить, что такие сенсоры не могут использоваться при воздействии сильных магнитных полей, поскольку в облученных кристаллах наблюдается значительное изменение магнетосопротивления.

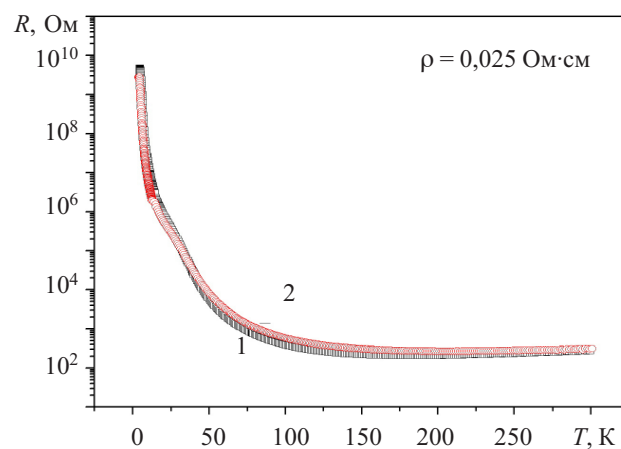


Рис. 1. Температурная зависимость сопротивления необлученных (1) и облученных (2) γ -квантами дозой $2,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, закрепленных на медной подложке

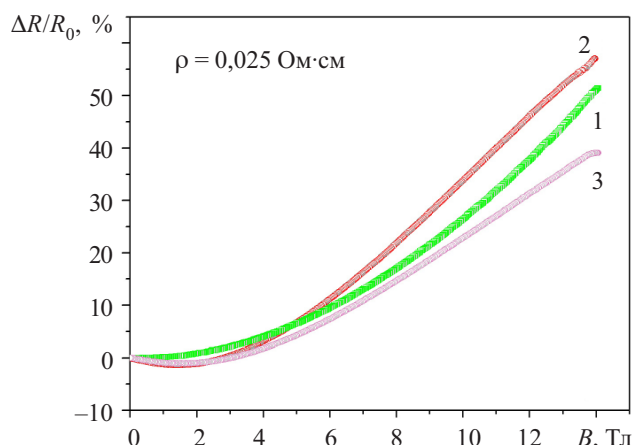


Рис. 2. Магнетосопротивление НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, закрепленных на медной подложке, до (1) и после (2, 3) облучения γ -квантами при разных дозах: 2 — $2,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$; 3 — $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$

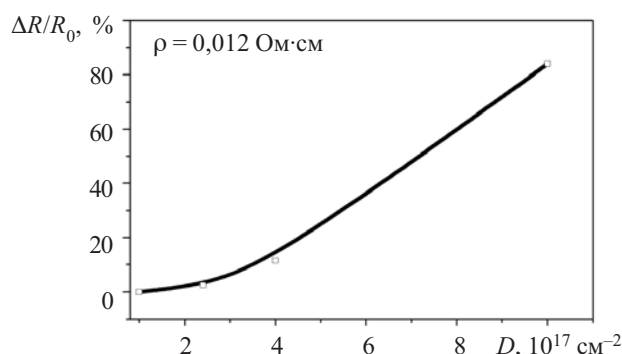


Рис. 3. Зависимость относительного изменения сопротивления НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ от дозы облучения D γ -квантами

Также было исследовано влияние γ -облучения на характеристики чувствительных элементов сенсоров на основе НК. Так, на **рис. 4** приведена температурная зависимость сопротивления облученных разными дозами γ -квантов НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, закрепленных на медной подложке. Как видно, при облучении дозой $2,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ наблюдается существенное изменение сопротивления. Однако причиной этого является не изменение характеристик материала, а разрушение слоя клея, в результате чего кристалл отходит от подложки, т. е. становится свободным. Следовательно, такая доза выводит из строя сенсор. Поэтому для создания радиационно стойких сенсоров на основе НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ необходимо искать другое конструктивное решение закрепления чувствительного элемента.

У нитевидных кристаллов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ при $x = 0,01$ с уровнем легирования, соответствующим переходу «металл — диэлектрик» с диэлектрической стороны, и удельным сопротивлением $\rho_{300\text{K}} = 0,018 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, был обнаружен гигантский пьезорезистивный эффект [5] (коэффициент тензочувствительности $K = 3,5 \cdot 10^4$). На их основе были созданы тензорезисторы, работоспособные при температуре 4,2 К, с диапазоном измеряемой деформации в пределах $\pm 1,26 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. [6]. Такие сенсоры экстремально чувствительны, поскольку в области низких температур тензочувствительность НК $p\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ увеличивается более чем на по-

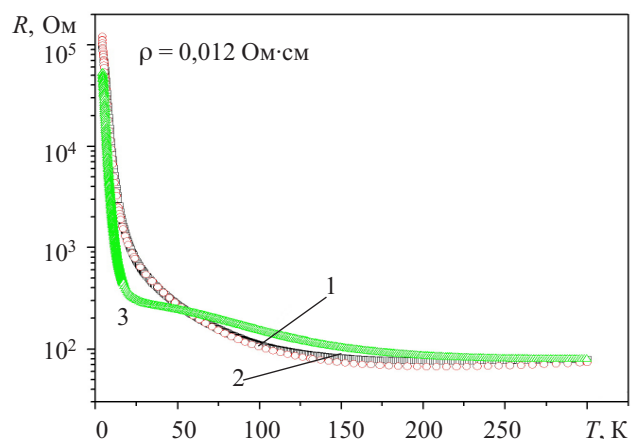


Рис. 4. Температурная зависимость сопротивления НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, закрепленных на медной подложке, необлученных (1) и облученных (2, 3) различными дозами γ -квантов: 2 — $0,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$; 3 — $2,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$

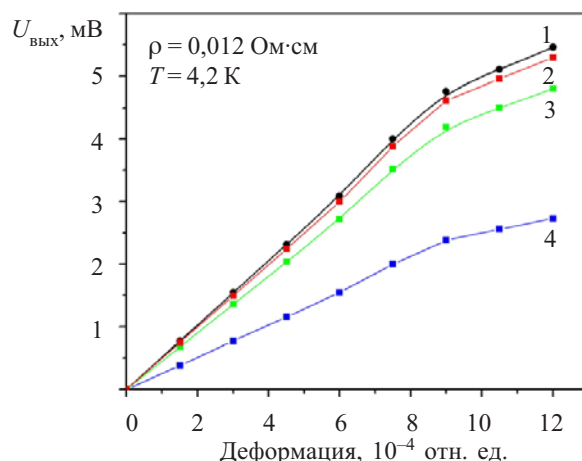


Рис. 5. Градуировочные характеристики неoblученного (1) сенсора деформации на основе НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и облученного (2—4) различными дозами γ -квантов: 2 — $2,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$; 3 — $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$; 4 — $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$

рядок по сравнению с сенсорами на основе сильнолегированных НК. Однако необходимо отметить, что поскольку существует достаточно сильная зависимость от температуры как коэффициента тензочувствительности, так и сопротивления сильнолегированных НК твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, сенсоры деформации на их основе целесообразно использовать, в основном, при фиксированной температуре (например, при 4,2 К). На **рис. 5** приведена градуировочная характеристика такого тензорезистора при температуре 4,2 К и токе питания 5 мА (кривая 1). Точность измерения деформации таким сенсором достигает $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ отн. ед. Вместе с тем, градуировочная характеристика сенсоров деформации изменяется в зависимости от дозы облучения (кривые 2—4).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что НК твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ можно использовать для создания радиационно стойких высокочувствительных сенсоров деформации, работоспособных в сложных условиях эксплуатации (допустимая доза

облучения γ -квантами — $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, магнитное поле с индукцией до 4 Тл).

Показано, что НК с удельным сопротивлением $\rho_{300\text{K}} = 0,018 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ обеспечивают высокую точность измерения деформации ($\pm 5 \cdot 10^{-6}$ отн. ед.) при температуре 4,2 К.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Дружинин А. О., Островський І. П., Когут Ю. Р. Ниткоподібні кристали кремнію, германію та їх твердих розчинів у сенсорній електроніці. — Львів: НУ «Львівська політехніка», 2010. [Druzhinin A. O., Ostrovs'kii I. P., Kogut Yu. R. Nitkopodibni kristali kremniyu, germaniyu ta yikh tverdikh rozchiniv u sensornii elektronitsi. L'viv. NU «L'viv's'ka politehnika». 2010]
2. Деклар. пат. на корисну модель 4531. Сенсор температури / А. О. Дружинин, І. П. Островський, Н. С. Лях, С. М. Матвієнко. — 2005. — Бюл. № 1. [Deklar. pat. na korisnu model' 4531. / А. О. Дружинин, І. П. Островський, Н. С. Лях, С. М. Матвієнко. 2005. Bull. 1]

3. Дружинин А. О., Островський І. П., Ховерко Ю. М. та ін. Вплив опромінення g-квантами на властивості ниткоподібних кристалів Si-Ge // Фізика і хімія твердого тіла. — 2010. — Т. 11, № 1. — С. 89—92. [Druzhinin A. O., Ostrovs'kii I. P., Khoverko Yu. M. ta in. // Fizika i khimiya tverdogo tila. 2010. Vol. 11, N 1. P. 89]
4. Дружинин А. О., Мар'ямова І. Й., Островський І. П. та ін. Вплив радіаційного опромінення на стрибкову провідність ниткоподібних кристалів Si та Si-Ge // Тези доп. IV Укр. наук. конф. з фізики напівпровідників. — Україна, м. Запоріжжя, 2009. — Т. 1. — С. 192—193. [Druzhinin A. O., Mar'yamova I. I., Ostrovs'kii I. P. ta in. // Tezi dop. IV Ukr. nauk. konf. z fiziki napivprovodnikiv. Ukraine, Zaporizhzhya, 2009. Vol. 1. P. 192]
5. Шкловский Б. И., Эфрос А. А. Электронные свойства легированных полупроводников. — М.: Наука, 1997. [Shklovskii B. I., Efros A. A. Elektronnye svoystva legirovannykh poluprovodnikov. M. Nauka. 1997]
6. Druzhinin A., Ostrovskiy I., Lavitska E. et al. Studies of piezoresistance in Si-Ge whiskers at cryogenic temperatures // Proc. SPIE. — 2003. — Vol. 5136. — P. 243—248.

Ю. В. УШЕНИН, к. ф.-м. н. А. В. САМОЙЛОВ, Р. В. ХРИСТОСЕНКО

Украина г. Киев, Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарева НАНУ
E-mail: samoylovanton@mail.ru

Дата поступления в редакцию
06.10 2010 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. А. ЗАХАРЧЕНКО
(ХФТИ, г. Харьков)

УВЕЛИЧЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СЕНСОРОВ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА

Показано, что использование инфракрасного источника излучения позволяет улучшить чувствительность сенсора по сравнению с источником видимого света.

Поверхностный плазмонный резонанс (ППР) заключается в оптическом возбуждении плазмонов (или волнообразного изменения плотности заряда) в поверхности, разделяющей проводник (например, серебро или золото) и диэлектрик (это может быть газ, жидкость или твердое тело). Резонансный волновой вектор, связанный с оптическим возбуждением поверхностных плазмонов, зависит от комплексного показателя преломления металла и окружающей диэлектрической среды. Этот рефрактометрический метод с успехом использовался для анализа разнообразных веществ, будь то газы (например, ароматические углеводороды) [1], жидкости (например, токсины в жидкой среде) [2] или твердые тела (например, неорганические твердые частицы [3] и органические пленки Langmuir-Blodgett [4]).

Основным преимуществом поверхностного плазмонного резонанса является то, что он позволяет наблюдать изменения комплексного показателя преломления, которые происходят вблизи поверхности сенсора. То есть, любое физическое явление на поверхности, которое приводит к изменению показателя преломления, может быть использовано для получения отклика измерительной системы.

Для регистрации эффекта ППР используют различные принципы: запись интенсивности отраженного света на полувысоте минимума ППР-кривой [5]; применение конвергирующего светового пучка и координатно-чувствительного регистратора [6]; механическое сканирование угла падения [7], при котором применяют как монохроматический лазерный источник излучения, так и источники немонохроматического излучения [8].

Появление новых модификаций приборов [9] свидетельствует об актуальности направления и наличии достаточно большого количества нерешенных задач, требующих непрерывной модернизации сенсоров такого типа и приспособления их к изменяющимся требованиям к чувствительности, точности измерения, воспроизводимости результатов.

В настоящей работе рассматривается один из возможных способов улучшения чувствительности ППР-преобразователей к изменению показателя преломления исследуемой среды, основанный на применении длинноволновых источников возбуждения ППР.

Анализ возможности увеличения чувствительности к изменению показателя преломления внешней среды

Основными объектами анализа в настоящей работе служат приборы серии ПЛАЗМОН [10, 11], которые являются универсальными при регистрации ППР в тех случаях, когда в качестве диэлектрика используют жидкости и газы. В них в качестве источника света используется лазерный светоизлучающий диод

с оптической системой формирования коллимированного пучка.

Прибор ПЛАЗМОН-5 может работать в двух режимах. В первом режиме измеряется интенсивность I отраженного излучения при различных углах падения φ лазерного излучения на систему «призма–золото–диэлектрик». При каких-либо изменениях, происходящих на поверхности золотой пленки, изменяется угловое положение минимума на ППР-кривой $I(\varphi)$, которое фиксируется прибором. В ПЛАЗМОН-5 используется полупроводниковый лазер с длиной волны $\lambda=650$ нм, диапазон изменения углов падения в воздушной среде составляет 17° , при этом разброс измерений угла составляет около $10''$, что позволяет определять изменение показателя преломления на величину $5 \cdot 10^{-5}$. Теоретический расчет, проведенный по [12, с. 379—388] с помощью программы Mathcad 13.1, показывает, что при использовании излучения лазера с длиной волны $\lambda=650$ нм, изменение показателя преломления среды на 0,0001 приводит к смещению углового положения минимума ППР-кривой на $0,0095^\circ$, а при $\lambda=820$ нм — на $0,0076^\circ$. То есть, чем больше длина волны, возбуждающей ППР, тем меньше изменяется угловое положение минимума на ППР-кривой при одинаковых изменениях показателя преломления внешней среды. Таким образом, использование волн большей длины в режиме измерения полной ППР-кривой приводит к ухудшению чувствительности прибора, в данном случае — в 1,25 раза.

Во втором режиме работы прибора сначала измеряют полную кривую $I(\varphi)$ (рис. 1). Затем выбирают рабочую точку на ее спадающей ветви, в соответствии с координатами которой шаговый двигатель при-

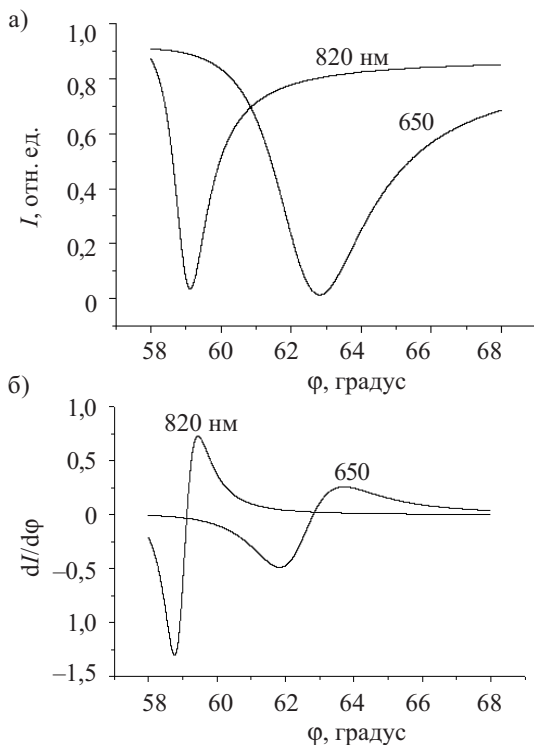


Рис. 1. Зависимость интенсивности I отраженного излучения (а) и $dI/d\varphi$ (б) от угла падения на золотую пленку волн возбуждения резонанса разной длины

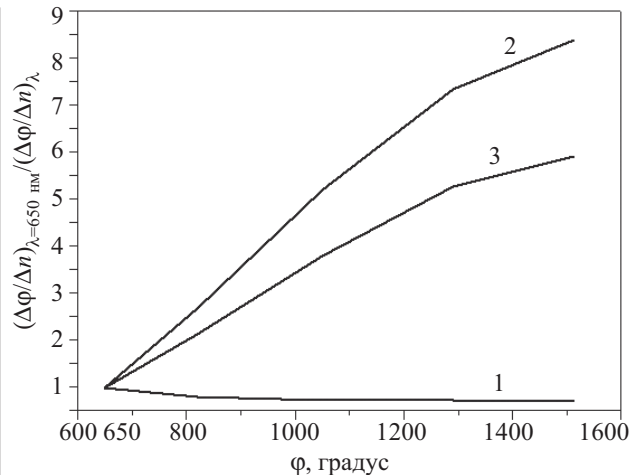


Рис. 2. Изменение чувствительности прибора к изменению n при $\lambda=650$ нм с ростом длины волны возбуждения ППР в различных режимах измерения:

1 — первый режим (по изменению углового положения минимума ППР-кривой); 2 — второй режим (по изменению крутизны ППР-кривой); 3 — реальное увеличение чувствительности прибора

бора устанавливает поворотную систему. Далее измеряется интенсивность отраженного излучения при фиксированном угле падения. При изменении оптических свойств среды над поверхностью золотой пленки ППР-кривая смещается, что приводит к перемещению фиксированной по углу падения рабочей точки вдоль ППР-кривой, а значит и к изменению интенсивности отраженного излучения. Таким образом, чувствительность всей системы в этом режиме определяется крутизной спадающей ветви ППР-кривой, т. е. величиной производной $dI/d\varphi$. Расчетные ППР-кривые для волн разной длины, а также вид первых производных $dI/d\varphi$ представлены на рис. 1.

Из рис. 1, б видно, что абсолютное значение максимума производной для $\lambda=650$ нм равно 0,5 при $\varphi \approx 62^\circ$, а для $\lambda=820$ нм — 1,3 при $\varphi \approx 59^\circ$. Это означает, что во втором режиме измерений при $\lambda=820$ нм за счет изменения формы ППР-кривой (рис. 1, а) можно получить чувствительность к изменению показателя преломления системы в 2,67 раза выше, чем при $\lambda=650$ нм (рис. 2 кривая 2). Но учитывая то, что при увеличении λ вся кривая сдвигается по углу в 1,25 раза меньше, чем при использовании волн длиной 650 нм (кривая 1), получаем общий коэффициент увеличения чувствительности — 2,14 (кривая 3). Также было рассчитано изменение чувствительности прибора с дальнейшим ростом длины волны. Результаты расчета представлены на рис. 2.

Если для решения конкретной задачи не хватает чувствительности прибора на определенной длине волны, то из графиков на рис. 2 можно оценить целесообразность перехода на другую волну возбуждения плазмонного резонанса.

Эксперимент

Для проверки теоретических расчетов на базе прибора ПЛАЗМОН-5 с длиной волны возбуждения 650 нм был создан прибор с длиной волны 820 нм. Сенсорный чип представляет собой стеклянную пла-

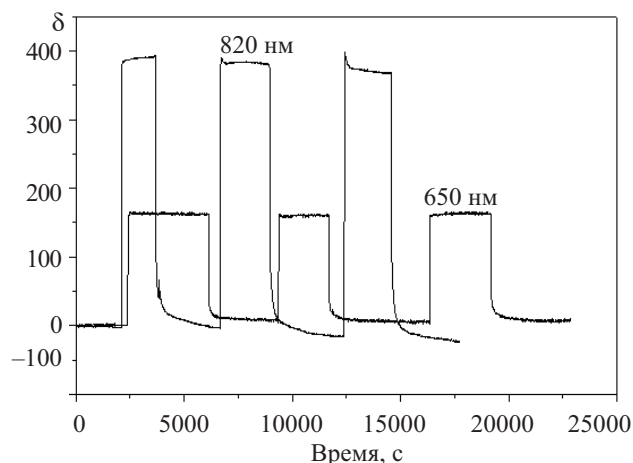


Рис. 3. Экспериментальные кинетические кривые (разность между показаниями прибора в опорном и рабочем каналах) при изменении показателя преломления среды при возбуждении резонанса волнами разной длины

стину размерами $20 \times 20 \times 1$ мм с показателем преломления $n=1,515$, покрытую слоем золота толщиной 50 нм и подслоем хрома толщиной 3 нм для лучшей адгезии. В ходе эксперимента в кювете, где находился чип, трижды производили замену дистиллированной воды с показателем преломления $n=1,33303$ на однопроцентный раствор глицерина в дистиллированной воде с $n=1,33416$. Режим измерений соответствовал левой ветви ППР-кривой. Результаты эксперимента представлены на рис. 3.

Поскольку прибор имеет два оптических канала — опорный и рабочий, по оси ординат откладывали разность δ между показаниями аналогово-цифрового преобразователя на этих каналах. Из рис. 3 видно, что чувствительность к изменению показателя преломления исследуемой среды у прибора с источником излучения волн длиной 820 нм в 2,4 раза выше, чем при $\lambda=650$ нм.

Полученные результаты неплохо согласуются с проведенными расчетами. Несовпадение расчетного и экспериментального коэффициента увеличения чувствительности связано с различием показателей преломления иммерсионной жидкости, материала призмы и стеклянной подложки, которое не было учтено при теоретических расчетах.

Переход к большей длине волны возбуждающего ППР излучения увеличивает чувствительность прибора к изменению показателя преломления диэлектрической среды, позволяет изучать более толстые слои диэлектрика над поверхностью золотой пленки, т. к. при этом увеличивается глубина проникновения затухающего электромагнитного поля в диэлектрик. Кроме того, использование излучения с большей длиной волны позволяет работать с материалами, имеющими сильное поглощение в видимой области спектра и прозрачными в ИК-области.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Aguirre N. M., Perez L. M., Colin J. A., Buenrostro-Gonzalez E. Development of a surface plasmon resonance n-dodecane vapor sensor // *Sensors*.— 2007.— N 7(9).— P. 1954—1961.
2. Gouzya M.-F., Keb M., Kramer P. M. A SPR-based immunosensor for the detection of isoproturon // *Biosensors and Bioelectronics*.— 2009.— Vol. 24, N 6.— P. 1563—1568.
3. Xu H. and Kall M. Modeling the optical response of nanoparticle-based surface plasmon resonance sensors // *Sensors and Actuators. B*.— 2002.— Vol. 87, N 2.— P. 244—249.
4. Rella R., Siciliano P., Quaranta F. et al. Gas sensing measurements and analysis of the optical properties of poly[3-(butylthio)thiophene] Langmuir-Blodgett films // *Sensors and Actuators. B*.— 2000.— Vol. 68.— P. 203—209.
5. Okamoto T., Kamitama T., Yamaguchi I. All-optical spatial light modulator with surface plasmon resonance // *Optics Letters*.— 1993.— Vol. 18 (18).— P. 1570—1572.
6. Knoll W. Optical characterization of organic thin films and interfaces with evanescent waves // *MRS Bulletin*.— 1991.— N. 16.— P. 29—39.
7. Dougherty G. A compact optoelectronic instrument with a disposable sensor based on surface plasmon resonance // *Meas. Sci. Technol.*— 1993.— N 4.— P. 697—699.
8. Hodnik V., Anderluh G. Toxin detection by surface plasmon resonance // *Sensors*.— 2009.— Vol. 9, N 3.— P. 1339—1354.
9. Shinn-Fwu Wang. A small-displacement sensor using total internal reflection theory and surface plasmon resonance technology for heterodyne interferometry // *Sensors*.— 2009.— Vol. 9, N 4.— P. 2498—2510.
10. www.isp.kiev.ua
11. Snopok B. A., Kostyukevich K. V., Rengevich O. V. et al. A biosensor approach to probe the structure and function of the adsorbed proteins: fibrinogen at the gold surface // *Quantum Electronics and Optoelectronics*.— 1991.— Vol. 1, N 1.— P.121—134.
12. Азаам Р., Башара Б. Эллипсометрия и поляризованный свет.— М.: Мир, 1981. [Azaam R., Bashara B. *Ellipsometriya i polarizovannyi svet*. Moscow. Mir. 1981]

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Рощин В. М., Силибин М. В. Технология материалов микро-, опто- и наноэлектроники. Часть 2.— М.: Бином. Лаборатория знаний, 2010 г.— 184 с.

Учебное пособие посвящено технологии получения основных компонентов микро-, опто- и наноэлектроники: металлов, легирующих элементов, диэлектрических материалов, углеродных материалов, металлоорганических соединений и вспомогательных материалов.

Для студентов, обучающихся по направлению "Электроника и микроэлектроника". Полезно также специалистам, работающим в соответствующей области.



Т. А. РЕВЕНЮК, д. ф.-м. н. С. Н. ФЕДОСОВ

Украина, Одесская национальная академия пищевых технологий
E-mail: fedosov@optima.com.ua

Дата поступления в редакцию
23.09 2010 г.

Оппонент д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК
(ИПМ им. И.Н.Францевича, г. Черновцы)

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛИДЕНФТОРИДА

Установлено, что характеристики сенсоров на основе поливинилиденфторида находятся в пределах допустимых норм в диапазоне рабочей температуры $-20...+80^{\circ}\text{C}$ после соответствующего отжига.

Важным направлением развития современной твердотельной электроники является создание пьезо- и пирозлектрических сенсоров на основе полимерных сегнетоэлектрических пленок типа поливинилиденфторида (ПВДФ) и его сополимеров [1, 2]. К числу основных достоинств таких материалов относятся высокие значения пьезо- и пирозлектрических коэффициентов, которые определяют широкие перспективы их практического применения. Гибкость пленок ПВДФ, возможность создания сенсоров большой площади, широкий диапазон рабочих частот, довольно простые способы изготовления тонких пленок и близость их акустического импеданса к импедансу биологической ткани и воды предопределяют преимущества полимерных сегнетоэлектриков в сравнении с другими материалами при разработке, в частности, сенсоров медицинского назначения и гидрофонов [3, 4].

Сенсор на основе ПВДФ сильно поглощает электромагнитное излучение в диапазоне инфракрасных волн длиной порядка 7—20 мкм, что обуславливает перспективность их использования для изготовления датчиков теплового излучения тела человека. Так как пиросенсоры на основе сегнетоэлектрических пленок имеют высокую чувствительность, при конструировании датчиков, работающих на низких частотах (от 0,01 до 1 Гц), необходимо устранять влияние на пиросигнал изменений температуры окружающей среды. Поскольку наиболее важным внешним фактором, влияющим на свойства сенсоров, является температура, целью настоящей работы было определение температурной стабильности основных параметров сенсоров.

Единственным производителем пленок ПВДФ в странах СНГ является ЗАО «Пластполимер-Т» (Россия), однако датчики на основе этих пленок в промышленном масштабе не выпускаются.

В настоящей работе впервые обоснована необходимость проведения отжига пленок после их поляризации с целью обеспечения требуемой температурной и временной стабильности при эксплуатации сенсоров.

Для исследований были изготовлены сенсоры на основе пленок ПВДФ толщиной 25 мкм с алюминиевыми электродами толщиной 0,1 мкм, нанесенными методом испарения и конденсации в вакууме. Пленки были поляризованы в поле коронно-разрядного триода при напряжении 3,6 кВ в течение 200 с при температуре 25°C .

Пьезоэлектрические коэффициенты d_{33} и d_{31} измеряли квазистатическим методом на специально сконструированных устройствах. Пирозлектрические коэффициенты сенсоров измеряли в квазистатическом и динамическом режимах [5]. Импеданс, емкость, диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь измеряли методом диэлектрической спектроскопии на переменном токе. Сенсор помещали в термостат ТО-19 с возможностью поддержания постоянной температуры с точностью $0,5^{\circ}\text{C}$ в диапазоне от -20 до $+100^{\circ}\text{C}$. В качестве основного измерительного прибора был использован автоматический анализатор импеданса 4192А фирмы Hewlett-Packard. Импеданс, емкость и $\text{tg}\delta$ измеряли на частоте 1 кГц. Диапазон частот при измерениях диэлектрической проницаемости ϵ составлял от 100 Гц до 5 МГц. Изменения всех параметров (Δd_{33} , $\Delta\epsilon$, $\Delta\text{tg}\delta$) оценивали относительно их значений при 20°C (d_{33}^* , ϵ^* , $\text{tg}\delta^*$).

Исследования показали, что на температурную стабильность параметров сенсоров существенное влияние оказывает отжиг после поляризации пленок при температуре 80°C . Как видно из рис. 1, в таком случае пьезоэлектрический коэффициент d_{33} становится стабильным при температуре эксплуатации 70°C на протяжении 1000 суток.

В проведенных ранее исследованиях пирозлектричества в ПВДФ [6, 7] было показано, что неотожженные пленки непригодны для изготовления датчиков из-за наличия в них релаксационной составляющей поляризации, приводящей к неконтролируемому уменьшению пироккоэффициента по мере релаксации, и соответственно, к последующей нестабильной

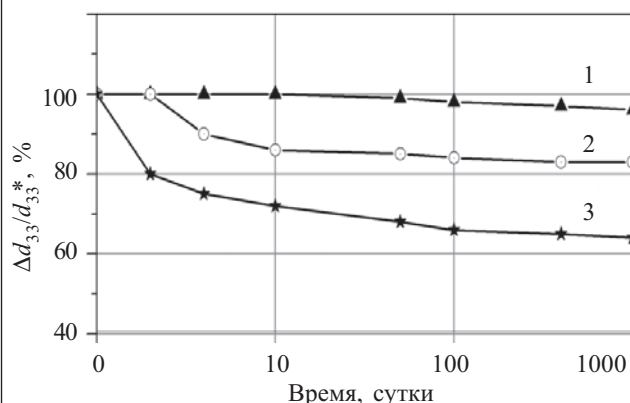


Рис. 1. Зависимость относительного изменения пьезоэлектрического коэффициента d_{33} сенсоров из отожженной пленки от времени при разной температуре эксплуатации (в °C):

1 — 70; 2 — 80; 3 — 100

работе датчиков. Целью отжига пленок после их поляризации является удаление релаксационной составляющей. Также было установлено, что температура 80°C является критической для ПВДФ, поэтому в данной работе она была выбрана в качестве температуры отжига.

Повышение температуры эксплуатации таких сенсоров приводит к некоторому уменьшению пьезоэлектрической активности — на 12% при температуре 80°C и на 26% при температуре 100°C на протяжении первых 10 суток работы. Однако следует отметить, что в дальнейшем уменьшение пьезоэлектрического коэффициента за 1000 суток работы не превышает 2–3%.

В результате проведенного исследования релаксации поляризованного состояния в полимерных сегнетоэлектриках [6, 7] установлено, что максимальной рабочей температурой разработанных сенсоров следует считать 80°C, поскольку при более высокой температуре происходит необратимое уменьшение величины остаточной поляризации и, соответственно, пьезо- и пьезоэлектрических коэффициентов.

Что касается нижней границы диапазона рабочей температуры, целесообразно устанавливать ее на уровне –20...–25°C, учитывая тот факт, что как пьезо- и пьезоэлектрические коэффициенты при отрицательной температуре уменьшаются, а температура стеклования аморфной фазы ПВДФ составляет –40...–50°C.

Выбор температуры отжига порядка 80°C сделан на основе измерений тока термостимулированной деполяризации [6, 7].

Абсолютные значения пьезоэлектрического коэффициента d_{31} при увеличении температуры от –20 до +60°C увеличиваются практически линейно от 20 до 38 пКл/Н, причем эти изменения являются обратимыми. Пьезоэлектрический коэффициент g_{31} в этом диапазоне изменений температуры находится в пределах 0,15–0,21 В·м/Н.

На рис. 2 приведены температурные зависимости относительного изменения емкости и пьезоэлектри-

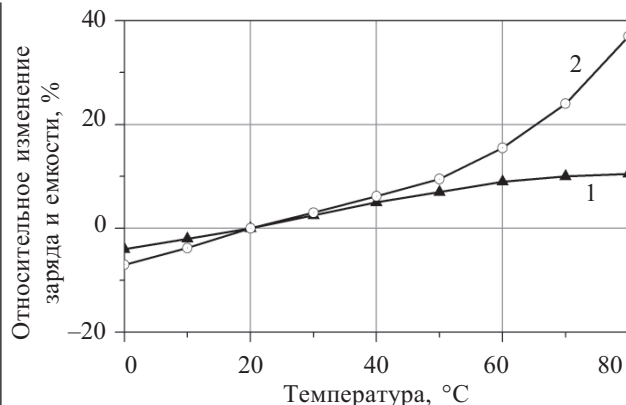


Рис. 2. Зависимость относительного изменения емкости пьезосенсора (1) и его пьезоэлектрического заряда (2) от температуры

ческого заряда, из которых видно, что при повышении температуры эксплуатации увеличивается чувствительность сенсоров, причем эта зависимость является обратимой вплоть до температуры 80°C. Повышение чувствительности с ростом температуры следует считать положительным эффектом.

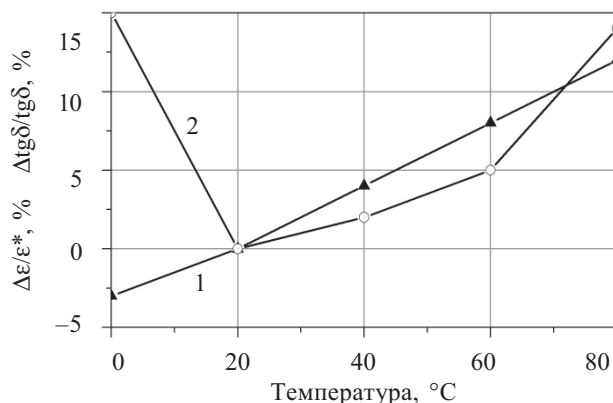


Рис. 3. Зависимость относительного изменения диэлектрической проницаемости (1) и тангенса угла диэлектрических потерь (2) от температуры

Как показывают данные рис. 3, с изменением температуры происходят также незначительные обратимые изменения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь (их увеличение примерно на 15% при максимальной рабочей температуре 80°C). Очевидно, это следует признать нормальным явлением, поскольку они обусловлены физическими процессами, происходящими при нагревании сенсоров, а недопустимыми могут быть только необратимые изменения рабочих параметров под влиянием температуры.

Таким образом, показано, что пьезоэлектрические сенсоры, изготовленные на основе пленок ПВДФ, могут надежно работать в диапазоне изменений температуры от –20 до +80°C. Экспериментально установлено, что отжиг пленок при температуре 80°C после

их поляризации устраняет нестабильную составляющую остаточной поляризации и обеспечивает стабильность характеристик сенсоров, в частности, пьезокоэффициенты в течение нескольких лет уменьшаются всего на 2—3%. Применение разработанных режимов изготовления сенсоров на основе ПВДФ обеспечило повышение пьезокоэффициента на 12%, пьезоэлектрического коэффициента — на 14% и коэффициента электромеханической связи — на 15% по сравнению с датчиками, серийно выпускаемыми фирмой Куреха (Kureha Chemical Corporation), Япония, крупнейшим в мире разработчиком и производителем пленок ПВДФ [8].

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Клаасен К. Основы измерений. Датчики и электронные приборы. — М.: Издательский Дом «Интеллект», 2008. [Klaassen K. Osnovy izmerenii. Datchiki i elektronnye pribory. M. Izdatel'skii Dom «Intellekt». 2008]

2. Gu H., Zhao Y., Wang M. L. A wireless smart PVDF sensor for structural health monitoring // Structural Control and Health Monitoring. — 2005. — Vol. 12, N 3—4. — P. 329—343.

3. Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение. — М.: Мир, 1989. [Vigle G. Datchiki. Ustroistvo i primeneniye. Moscow. Mir. 1989]

4. Калашников В. И., Нефедов С. В., Путилин А. Б. и др. Информационно-измерительная техника и технологии. — М.: Высшая школа, 2001. [Kalashnikov V. I., Nefedov S. V., Putilin A. B. i dr. Informatsionno-izmeritel'naya tekhnika i tekhnologii. Moscow. Vysshaya shkola. 2001]

5. Electrets. Vol. 1 // Ed. by G. M. Sessler. — Morgan Hill: Laplacian Press, 1999.

6. Федосов С. Н., Сергеева А. Е., Бутенко А. Ф. Поляризационные и релаксационные процессы в полимерных сегнетоэлектриках. — Одесса: Полиграф, 2009. [Fedosov S. N., Sergeeva A. E., Butenko A. F. Polyarizatsionnye i relaksatsionnye protsessy v polimernykh segnetoelektrikakh. Odessa. Poligraf. 2009]

7. Fedosov S. N., von Seggern H. Pyroelectricity in polyvinylidene fluoride: Influence of polarization and charge // Journal of Applied Physics — 2008. — Vol. 103 (014105). — P. 1—8.

8. Iwasaki T. Kureha — the art of manufacturing (booklet), 2010.

Г. А. ДЕВЯТКО, В. А. КУЧМЕНКО,
С. А. ЛАЦИС, к. т. н. М. А. ОРЛОВ,
В. А. ПАРТЫШЕВ, В. Я. ПОДОЛЬСКИЙ

Украина, г. Киев, УкрНИИ аналитического приборостроения
E-mail: analyt@ukranalyt.com.ua

Дата поступления в редакцию
09.06 2010 г.

Оппоненты к. т. н. В. А. БОЛТЕНКОВ
(ОНПУ, г. Одесса);

д. т. н. А. Т. КОЖУХАР (НУЛП, г. Львов)

АВТОТРАССОВЫЙ ГАЗОАНАЛИЗАТОР

Создан и внедрен в составе системы экологического мониторинга атмосферного воздуха г. Киева компьютеризированный автотрассовый газоанализатор для измерения концентрации токсичных газов в воздухе вдоль автомагистралей в населенных пунктах.

По данным наблюдений экологов основными источниками загрязнения воздуха в населенных пунктах Украины являются промышленные предприятия и автомобильный транспорт. Но поскольку в настоящее время большинство предприятий работают не на полную мощность или приостановили свою деятельность, а количество автотранспорта на магистралях значительно увеличилось, загрязнение атмосферного воздуха на 85% обусловлено выбросами автотранспортных средств.

Как известно, отработанные газы автомобиля содержат вредные вещества, негативно влияющие на состояние здоровья людей и окружающую среду, причем количество и соотношение таких веществ колеблется в зависимости от типа двигателя, сорта горючего и качества регулирования двигателя. В Украине достаточно часто автомобилисты используют горючее низкого качества, а двигатели автомобилей работают в неэкономных режимах и с малоэффективными устройствами нейтрализации токсичных веществ.

Все это обуславливает загрязнение воздуха вдоль автомагистралей в населенных пунктах токсичными

веществами, которые входят в состав отработанных газов автотранспорта. Опаснейшими загрязнителями воздуха являются оксид углерода и диоксиды азота и серы. Уровни загрязнения воздуха этими веществами на автомагистралях с интенсивным движением транспорта достаточно высоки в течение 10—15 часов в сутки на протяжении всего года, что требует принятия соответствующих мер в населенных пунктах на базе анализа информации, полученной в результате мониторинга уровней загрязнения воздуха [1].

Основной проблемой при организации такого мониторинга является отсутствие современных недорогих серийно выпускаемых аналитических средств измерения концентрации токсичных газов.

Задачей настоящей работы являлось создание и внедрение автоматических газоаналитических средств непрерывного действия для измерения концентрации загрязняющих газов, простых и дешевых при эксплуатации и обслуживании, с экономным потреблением электроэнергии и беспроводной передачей полученных данных в информационно-аналитический центр.

Специалистами ЗАО «Украналит» был разработан, изготовлен, испытан и включен в состав системы мониторинга состояния воздуха в г. Киеве автоматический стационарный компьютеризированный автотрассовый газоанализатор 603 ЭХ01М, который предназначен для одновременного непрерывного измерения концентрации оксида углерода и диоксидов азота и серы в воздухе.

При определении актуальности создания такого газоанализатора был проведен анализ состояния во-

Основные характеристики автотрассового газоанализатора и его аналогов

Технико-экономические характеристики	Модель, производитель, страна			
	Автотрассовый газоанализатор 603 ЭХ01М, «Укрналит», Украина	Датчик 603 ЭХ01, «Укрналит», Украина	САГА-Т, «Сигма-оптик», Россия	Airpointer, фирма MLU, Австрия
Метод измерений	электрохимический	электрохимический	акустооптический	спектральный
Диапазоны измерений массовой концентрации газа (в мг/м ³): — для CO — для SO ₂ — для NO ₂	0 — 100 0,8 — 20 0,6 — 15	0 — 105 0,8 — 19 0,6 — 14	отсутствует 0 — 130 0 — 75	0 — 1100 0 — 55 0 — 20
Диапазон измерений температуры воздуха (в °C)	–40...+60	отсутствует	нет данных	–20...+40
Время установления показаний (в с): — для CO — для SO ₂ — для NO ₂	60 40 120	60 60 60	отсутствует 60 60	60 60 60
Электропитание	6 В (0,3 А) (аккумуляторная батарея и солнечный модуль)	24 В, постоянный ток (по двухпроводному контуру 4—20 мА)	12 В (40 А) (аккумуляторная батарея) или сеть 220 В, 50 Гц	сеть 220 В, 50 Гц
Способ отбора анализируемого воздуха	непрерывный диффузионный	непрерывный диффузионный	принудительный (насосом)	принудительный (насосом)
Связь с внешними устройствами	GSM/GPRS-модем	двухпроводный контур 4—20 мА	отсутствует	отсутствует
Время хранения усредненных данных в памяти газоанализатора	7 суток	отсутствует	нет данных	нет данных
Масса (в кг)	2,5 (вместе с аккумуляторной батареей)	2,4	22,0	35,0
Габаритные размеры (в мм)	240×195×90	310×190×80	нет данных	800×600×500
Условия эксплуатации: — температура окружающего воздуха — относительная влажность — атмосферное давление	–30...+45°C 30...98 % 65...108 кПа	–30...+40°C 30...98 % 65...108 кПа	–20...+40°C нет данных нет данных	–20...+40°C 30...98 % 65...107 кПа
Степень защиты	IP 65	IP 65	нет данных	нет данных
Стоимость (в евро): — газоанализатора — технического обслуживания 1 раз в 12 месяцев (замена сенсоров, периодическая проверка)	3880 520	2760 475	22500 930	55150 2170

проса мониторинга атмосферного воздуха вдоль автомагистралей населенных пунктов и аппаратуры для его обеспечения в Украине и за рубежом.

Автотрассовый газоанализатор 603 ЭХ01М построен на основе электрохимических газовых преобразователей с улучшенными характеристиками. Ин-

формации о его прямых аналогах авторами не обнаружено.

В мире известны газоаналитические приборы для измерения концентрации токсичных газов в атмосферном воздухе, принцип действия которых построен на акустооптическом и спектральном (ультрафио-

летовом или инфракрасном) методах со сложной системой отбора и подготовки анализируемого воздуха. Стоимость таких приборов в 6—14 раз выше стоимости газоанализатора 603 ЭХ01М. Их основные характеристики и параметры созданного газоанализатора приведены в **таблице**.

Как видно из таблицы, преимущества предложенного газоанализатора перед зарубежными аналогами заключаются в том, что он имеет

- меньшие габаритные размеры и массу;
- более широкий диапазон температуры эксплуатации;
- меньшую потребляемую мощность (напряжение и ток питания);
- экономный и простой способ отбора анализируемого воздуха;
- меньшую стоимость.

Кроме того, значительно дешевле его гарантированное постоянное и своевременное техническое обслуживание.

Разработанный автотрассовый газоанализатор конкурентоспособен по своим техническим и эксплуатационным характеристикам и экономическим показателям.

Потенциальная потребность в автотрассовых газоанализаторах в Украине составляет не менее 900 шт.

Ранее подобные газоаналитические приборы не выпускались. В настоящее время в Украине эксплуатируются автотрассовые датчики 603 ЭХ01 производства ЗАО «Укрналит», которые работают совместно с комплектом аппаратуры детекторов химических загрязнений (**КДХЗ**). Такой комплекс аппаратно-программных средств сбора и передачи информации обеспечивает электропитание датчиков и прием текущих мгновенных значений измеряемой концентрации контролируемых веществ по двухпроводному контуру постоянного тока 4—20 мА путем непрерывного дискретного опроса датчиков, а также осуществляет первичную обработку полученной информации, усредняя мгновенные значения концентрации загрязняющих веществ с интервалом усреднения 20 мин. Каждый КДХЗ входит в состав соответствующего унифицированного дорожного контроллера управления (**ДКУ**) светофорным объектом. Полученные данные поступают по линиям связи из ДКУ в центральный управляющий пункт автоматизированной системы управления дорожным движением и далее транслируются по каналу выделенной телефонной связи в центр экологического мониторинга. Концентрация загрязняющих веществ в воздушной среде непрерывно измеряется автотрассовыми датчиками, преобразуется в них в унифицированный токовый сигнал 4—20 мА и поступает в соответствующий КДХЗ [2].

Газоанализатор 603 ЭХ01М имеет улучшенные технические и эксплуатационные характеристики по сравнению с автотрассовыми датчиками. В нем уменьшено влияние температуры окружающего воздуха и неизмеряемых компонентов для каждого газового первичного электрохимического преобразователя (**ПЭП**). Также он обеспечивает непрерывный опрос ПЭП, обработку и усреднение результатов измерения,

передачу данных о концентрации загрязнителей потребителям по беспроводной связи и полностью автономное питание прибора.

Создание такого газоанализатора позволило заменить автотрассовые датчики и КДХЗ одним компактным устройством, перейти на цифровые средства обработки и передачи данных и таким образом уменьшить стоимость газоаналитического оборудования для системы мониторинга состояния воздуха.

Принцип работы и характеристики автотрассового газоанализатора

Электрическая функциональная схема автотрассового газоанализатора 603 ЭХ01М показана на **рис. 1**.

Главным узлом сенсорного модуля является первичный преобразователь измеренной массовой концентрации газа в пропорциональный электрический сигнал. В состав каждого из трех газовых сенсорных модулей входит соответствующий ПЭП и плата обработки информации. Сенсорные модули обеспечивают необходимые режимы работы ПЭП и обработку выходных электрических сигналов, которые поступают в модуль обработки и передачи данных (**МОПД**) газоанализатора.

Диапазоны измерения концентрации различных газов автотрассовым газоанализатором указаны в таблице. Границы допустимой основной абсолютной погрешности измерений в каждой точке диапазона измерений при нормальных условиях составляют $\Delta = \pm (0,4 + 0,15C)$, где C — номинальное значение массовой концентрации контролируемого газа в поверочной газовой смеси, мг/м³.

МОПД газоанализатора состоит из микроконтроллера, аналого-цифрового преобразователя, коммутатора входных сигналов, GSM-модема (Q2501В, фирма Wavescom, Франция), клавиатуры, энергонезависимой памяти, датчика температуры и жидкокристаллического индикатора BC1602E3GPLCW (фирма Bolymin, Тайвань), на котором отображаются теку-

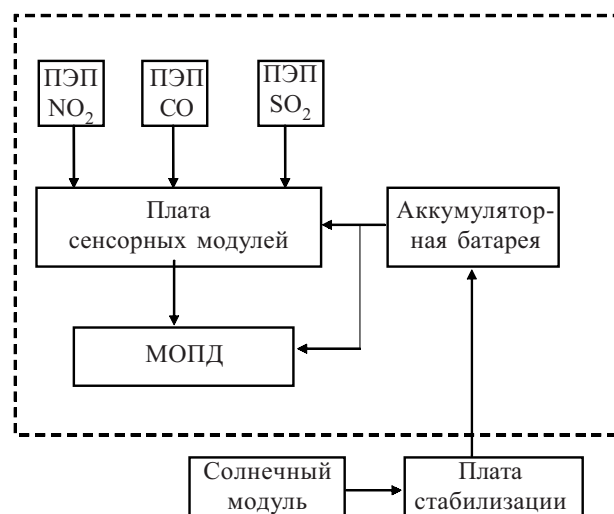


Рис. 1. Электрическая функциональная схема автотрассового газоанализатора 603 ЭХ01М

щие значения измерений массовой концентрации контролируемых газов в мг/м³, обновляемые каждые 3 с, дата, время и температура окружающего воздуха.

Микропроцессорный контроллер, построенный на микросхеме MSP430F1 (фирма Texas Instruments, США), обеспечивает корректировку результатов измерений за счет математической компенсации влияния на каждый ПЭП неизмеряемых им компонентов и температуры окружающего воздуха.

Контроллер выполняет тестирование составляющих частей прибора после подключения питания, запоминает текущие значения концентрации измеряемых газов с интервалом 2 мин, усредняет их за 20 мин, записывает в энергонезависимую память и формирует текстовые файлы полученных данных, которые передаются по GSM-связи в режиме GPRS экологическим информационно-аналитическим центрам и другим заинтересованным организациям. Срок хранения усредненных значений составляет 7 суток. Каждый час GSM-модем автоматически включается для осуществления связи с сервером потребителя. Процесс передачи данных можно наблюдать на индикаторе МОПД. С целью экономии заряда аккумуляторной батареи и исключения возможности передачи случайных данных в газоанализаторе предусмотрено отключение МОПД на время хранения, транспортировки и выполнения работ по установлению и подключению газоанализатора.

Питание газоанализатора осуществляется стабилизированным напряжением 6 В от аккумуляторной батареи, которая непрерывно подзаряжается от солнечного модуля через плату стабилизации.

Ток, потребляемый газоанализатором, не превышает 35 мА в режиме измерения и ожидания команды на передачу данных (GSM-модем ожидает вызов) и 470 мА при передаче данных по GSM-связи в режиме GPRS.

При температуре окружающей среды ниже чем –10°С автоматически включается подогрев SIM-карточки GSM-модема газоанализатора.

В случае снижения напряжения питания МОПД газоанализатора переходит в режим сохранения энергии, при котором контроллер МОПД отключает питание GSM-модема, но измерения не прекращаются, и результаты измерений заносятся в энергонезависимую память.

Узлы газоанализатора установлены в герметичном корпусе из поликарбоната, который обеспечивает степень защиты газоанализатора IP65. Датчик температуры и ПЭП газоанализатора установлены в защитные крышки, расположенные на нижней стороне корпуса газоанализатора, что позволяет контролируемому воздуху поступать через отверстия в них одновременно в каждый ПЭП газоанализатора в непрерывном диффузионном режиме.

Для защиты от несанкционированного вскрытия на корпусе газоанализатора установлен герконовый переключатель. При вскрытии газоанализатора разомкнутые контакты переключателя замыкаются, и на сервер потребителя поступает сигнал.

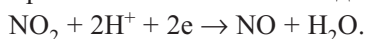
Первичные электрохимические преобразователи газоанализатора

В основу работы ПЭП автотрассового газоанализатора положен принцип преобразования массовой концентрации газа в электрический ток на основе электрохимического эффекта с помощью электрохимических сенсоров. Такие сенсоры работают на основе метода электролиза постоянным током при сохранении определенного потенциала на поверхности чувствительного (рабочего) электрода сенсора. При этом, в зависимости от контролируемого газа, в системе «электрод–электролит» каждого сенсора происходит реакция окисления или восстановления, а ток, который возникает в результате электрохимического эффекта при влиянии газа на чувствительный слой рабочего электрода, прямо пропорционален концентрации этого газа [3].

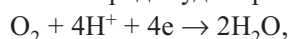
Окисление CO или SO₂ на чувствительном электроде описывается уравнениями



Уравнение восстановления для NO₂ имеет вид



Значит, при окислении CO или SO₂ на сравнительном электроде будет проходить реакция



а при восстановлении NO₂ — реакция



Кроме рабочего и сравнительного (эталонного) электродов в состав ПЭП входят вспомогательные электроды. Все электроды электрохимических преобразователей расположены таким образом, что постоянно находятся в контакте с электролитом, которым заполнена реакционная камера ПЭП.

С помощью специального потенциостата каждого сенсорного модуля, построенного на операционном усилителе УФ1101УД90А (НПО «Кристалл», Украина), на рабочем электроде ПЭП поддерживается потенциал заданного уровня относительно сравнительного электрода. Для каждого токсичного газа устанавливается соответствующий потенциал, который не зависит от изменений, происходящих на вспомогательных электродах. Сравнительный электрод в реакции участия не принимает и служит опорным элементом при заданном потенциале рабочего электрода. С помощью изменения потенциалов на вспомогательных электродах ПЭП стабилизируется фоновый ток, устанавливаются условия селективности и обеспечиваются условия работы ПЭП в заданном температурном режиме.

Одной из важнейших проблем является обеспечение селективности каждого из измерительных каналов газоанализатора. Сложность задачи заключается в том, что каждый ПЭП должен быть селективным по отношению к «собственному» компоненту в контролируемой воздушной среде и неселективным относительно остальных измеряемых и неизмеряемых газоанализатором газов.

Электрохимические преобразователи имеют определенную перекрестную чувствительность к газам,

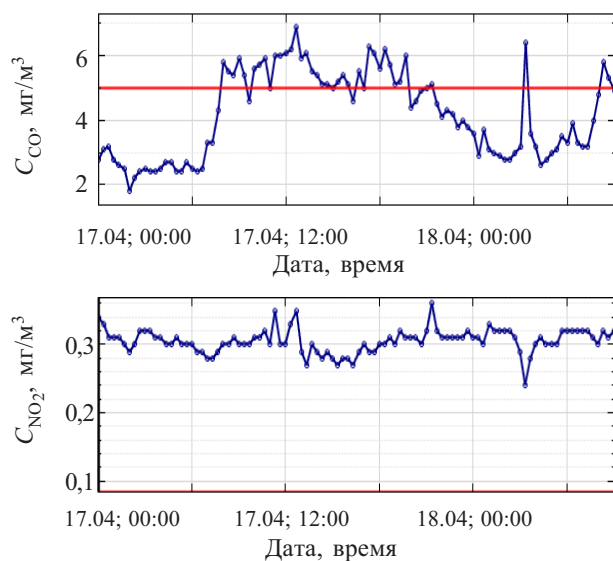


Рис. 2. Фрагменты результатов измерения трассовым анализатором концентрации CO, NO₂, SO₂ в воздухе на площади Победы в Киеве

которые они не должны измерять, зависящую от физико-химической природы и уровня концентрации этих газов, а также от состава катализатора рабочего электрода ПЭП. Для повышения селективности ПЭП было использовано нескольких методов:

- выбор оптимального состава катализатора рабочего электрода ПЭП;
- стабилизация установленного оптимального значения потенциала рабочего электрода;
- использование специальных фильтров, которые поглощают неизмеряемые и мешающие газы из контролируемой воздушной среды.

Однако все эти методы не обеспечивают полную селективность ПЭП. Поэтому в газоанализаторе предусмотрен микропроцессорный контроллер, который обеспечивает корректировку результатов измерения за счет математической компенсации влияния на них неизмеряемых компонентов для каждого преобразователя и температуры окружающего воздуха по формулам и коэффициентам, которые были определены экспериментально при изготовлении и паспортизации каждого ПЭП. Кроме того, программа контроллера учитывает данные по изменению фоновому току и чувствительности каждого ПЭП в процессе эксплуатации. Такие мероприятия позволили улучшить метрологические и эксплуатационные характеристики прибора.

В газоанализаторе 603 ЭХ01М используются четырехэлектродные электрохимические преобразователи, разработанные и изготовленные ЗАО «Укрналит» [4]. Применение таких ПЭП позволило повысить точность измерений в начальной части диапазона измерений путем стабилизации и компенсации фоновому току в ПЭП, уменьшить перекрестную чувствительность каждого преобразователя к другим, неизмеряемым им газам, а также улучшить стабильность работы автотрассового газоанализатора в широком диапазоне рабочей температуры (от –30 до +45°C).

Результаты эксплуатации автотрассового газоанализатора

Система мониторинга степени загрязнения воздуха автомагистралей с использованием газоана-

лизатора 603 ЭХ01М была внедрена в Киеве с 2007 г. и успешно функционировала в течение двух лет. Результаты измерения содержания CO, NO₂ и SO₂ (соответственно C_{CO} , C_{NO_2} , C_{SO_2}) в воздухе поступают к потребителю в графическом виде (как, например, на рис. 2), и сохраняются в его базе данных. Их анализ позволяет разрабатывать методы улучшения экологической ситуации в населенных пунктах.

Таким образом, созданный специалистами ЗАО «Укрналит» автоматический многокомпонентный автотрассовый газоанализатор 603 ЭХ01М может надежно работать в непрерывном режиме на протяжении длительного времени в широком диапазоне температуры, что обеспечивает стабильную работу системы экологического мониторинга степени загрязнения воздуха.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Глушаев В. В., Дев'ятко Г. А., Рижков В. Ф. Визначення міри забруднення повітря автомагістралей м. Києва відпрацьованими газами транспортних засобів // В зб. «Вплив автотранспорту на забруднення атмосферного повітря у м. Києві». — Товариство «Зелена Україна». — 2001. — С 34—35. [Glushaev V. V., Dev'yatko G. A., Rizhkov V. F. // V zb. «Vpliv avtotransportu na zabrudnennya atmosfernogo povitrya u m. Kyevi». Tovarisstvo «Zelena Ukrayina». 2001. P. 34]
2. Дев'ятко Г. А., Лацис С. А., Подольский В. Я., Закрасняный В. В. Система экологического мониторинга состояния воздуха вдоль автомагистралей населенных пунктов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2004. — № 2. — С. 28—29. [Dev'yatko G. A., Latsis S. A., Podol'skii V. Ya., Zakrasnyanyi V. V. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature. 2004. N 2. P. 28]
3. Дев'ятко Г. О., Лацис С. А., Лемеш Л. В. та ін. Первинні перетворювачі концентрації токсичних газів у повітрі вздовж автомагістралей населених пунктів // Вісник НТУУ «КПІ», серія Приладобудування. — 2004. — Вип. 28. — С. 33—37. [Dev'yatko G. O., Latsis S. A., Lemesh L. V. ta in. // Visnik NTUU «KPI», seriya Priladobuduvannya. 2004. Iss. 28. P. 33]
4. Патент на корисну модель 24817, Україна. Спосіб електрохімічного аналізу газів / О. А. Дашковський, Г. О. Дев'ятко, С. Т. Дрьомов та ін. — 2007. — Бюл. № 10. [Patent na korisnu model' 24817, Ukrayina. / O. A. Dashkovs'kii, G. O. Dev'yatko, S. T. Dr'omov ta in. 2007. Bull. N 10]

Д. ф.-м. н. В. А. СМЫНТЫНА, к. ф.-м. н. А. О. КУЛИНИЧ,
к. ф.-м. н. И. Р. ЯЦУНСКИЙ, И. А. МАРЧУК

Украина, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова
E-mail: yatsunskiy@gmail.com

Дата поступления в редакцию
27.04 2010 г.

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

РОЛЬ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ПОЛУЧЕНИИ НАНОКРЕМНИЯ

В результате высокотемпературного окисления Si в приповерхностных слоях образуется сложная дефектная область. Стравливание SiO₂ и обработка поверхности избирательными травителями позволяет получать наноструктурированный Si с заданной топологией.

Создание полупроводниковых структур с новыми физическими свойствами является основной задачей нанотехнологий. Как известно, уменьшение полупроводниковых структур до размеров, сравнимых с величиной волны де Бройля, приводит к появлению квантовых явлений, влияющих на электрические и оптические свойства материала. Так, элементы из монокристаллического кремния, имеющего непрямозонную энергетическую структуру и, как следствие, низкую эффективность излучения, при уменьшении размеров до 1—50 нм начинают люминесцировать в видимом диапазоне при комнатной температуре. Такое свойство наноструктурированного кремния объясняется в рамках квантово-размерного эффекта [1]. Помимо люминесценции, наноструктурированный кремний проявляет ряд других свойств, позволяющих использовать его в разнообразных сенсорах и в солнечной энергетике.

На сегодняшний день основным методом получения наноструктурированного кремния является метод электрохимического травления, позволяющий получать нанопористый материал с различными размерами пор в зависимости от условий травления. К сожалению, у этого метода есть ряд недостатков: временная деградация параметров получаемых структур, необходимость использования высокотоксичных химических веществ и т. д.

Еще одним методом получения наноструктур является обработка поверхности кремния высокоэнергетическими ионами, разрушающими приповерхностный слой, в результате чего образуются наноразмерные кластеры.

В последнее время появились методы получения наноструктурированного кремния в результате механического деформирования поверхности монокристаллического кремния и ее различных химических обработок [2, 3]. В этих методах существенную роль

играет пластическая деформация, которая и приводит к появлению нанокремния в процессе эволюции напряженной структуры. В настоящей работе предлагается метод получения наноструктурированного рельефа непосредственно на фронтальной поверхности кремневых пластин.

Объекты и методы исследования

Объектами изучения являлись пластины монокристаллического кремния КЭФ-4,5 (111) и КДБ-10 (100), выращенные методом Чохральского, с различным удельным сопротивлением.

Для выявления дефектов производилась обработка поверхности пластин химическими избирательными травителями (ИТ) Сиртля (поверхность 111) и Сэкко (поверхность 100) с предварительной обработкой в составах Каро и перекисноаммиачном растворе. Такая предварительная обработка позволяла за счет процессов дополнительного окисления повысить выявляющие свойства избирательных травителей [4]. Скорость травления составляла порядка 2—3 мкм/мин.

Изучение поверхности кремния после химической обработки проводилось различными методами.

Для электронной сканирующей микроскопии применяли микроскоп-анализатор Cam Scan-4 D с системой энергетического дисперсионного анализатора «Link-860» и программой «Zaf». Чувствительность прибора составляла 0,01% по массе, диаметр пучка — от $5 \cdot 10^{-9}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ м.

Для электронной ОЖЭ-спектроскопии использовали спектрометр LAS-3000 фирмы Riber с пространственной разрешающей способностью 3 мкм и энергетическим разрешением анализатора 0,3%.

Для оптических методов исследования применяли металлографический микроскоп ММР-2Р.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Как показали наши предыдущие исследования [5], основными видами дефектов в исходном кремнии являются дислокации, дефекты слоистой неоднородности, кластерные скопления кислорода или избыточного кремния, дендриты металлов и двойниковые ламели. Такие дефекты влияют на процесс формирования структуры приповерхностных слоев кремния при окислении. В процессе формирования оксидных слоев в приповерхностных областях кремния образуется довольно сложная структура, состоящая из слоев разупорядоченного кремния с областями про-

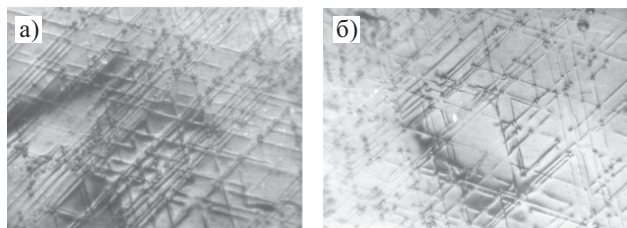


Рис. 1. Электронное изображение (1×770) дислокационных сеток после обработки ИТ в течение 3 мин (а) и 6 мин (б)

нившегося в него оксида, образованного при ускоренной диффузии кислорода вдоль структурных дефектов. Далее следуют слои кристаллического кремния, содержащие сетки дислокаций, период которых зависит от глубины залегания (рис. 1). Если учесть, что скорость обработки ИТ составляла около 3 мкм/мин, можно рассчитать глубину залегания дислокационных сеток: для толщины диоксидов 1 мкм и времени обработки ИТ около 10 мин она составляла примерно 30 мкм. Дополнительное травление области дислокационных сеток раствором HF дало возможность наблюдать отдельные периодические области бездефектного кремния в виде столбиков примерно одинакового размера и высоты (рис. 2). Наименьшие размеры столбиков составляли порядка 6—8 нм, толщина слоя кремния с дислокационными сетками — около 10—20 мкм.

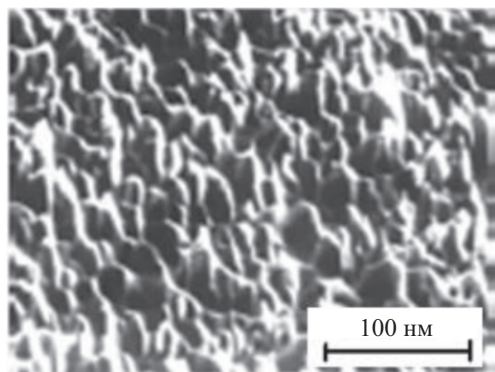


Рис. 2. Электронное изображение наноструктурированного кремния

Период дислокационных сеток зависит от уровня механических напряжений и деформаций в данной области, величина которых, в свою очередь, зависит от параметров высокотемпературной диффузии кислорода, от электрофизических и упругих параметров оксида кремния и кремния. Период дислокационной сетки рассчитывается по формуле [6]

$$D = \frac{b}{\sigma} k, \quad (1)$$

где b — проекция вектора смещения (вектор Бюргерса) на границу перехода;
 k — коэффициент, $k \approx 0,5$;
 σ — относительная деформация.

Образованная структура с сеткой пор подобна пористому кремнию, полученному в результате так называемого красящего травления [7]. Развитый на-

неструктурированный рельеф поверхности кремния после обработки ИТ способствует возникновению внутреннего встроенного электрического поля, что проявляется в электронном отраженном спектре появлением осцилляций Франца—Келдыша. Это, по-видимому, вызывает искривление зонной структуры кремния и смещение спектра фотолюминесценции (ФЛ) в сторону видимого диапазона при облучении области дислокационных сеток излучением с длиной волны $\lambda = 337$ нм [8]. Очевидно, возникновение смещения максимума спектра ФЛ в сторону видимого диапазона связано с дрейфом электронов и дырок в сильно деформированной внутренним электрическим полем зонной структуре кремния по экситонному механизму с захватом носителя заряда на поверхности и последующей рекомбинацией (туннельной либо активационной).

Можно предположить, что в пределах одной плоскости наблюдается постоянство значения напряжения и, соответственно, относительной деформации, которая является суммой относительных вкладов различных факторов [9]:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, \quad (2)$$

где σ_1 , σ_2 и σ_3 — значения относительной деформации, вызванной соответственно термодиффузией кислорода, различием коэффициентов термического расширения кремния и диоксида кремния и различием постоянных кристаллической решетки. Вклады различных видов деформации неравнозначны.

Величина σ_1 является сложной функцией многих параметров и рассмотрена в [9].

Величина σ_3 — постоянна и равна 0,03%.

Величину σ_2 обычно считают основным фактором, приводящим к деструктуризации поверхности полупроводников на небольшой глубине.

Расчет σ_2 при температуре $t = 1150^\circ\text{C}$ согласно [6]

$$\sigma_2 = (\alpha_1 - \alpha_2)t \quad (3)$$

(где $\alpha_1 = 0,3 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$ и $\alpha_2 = 5,3 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$) дает значение 0,58%. Однако на практике возникающие на границе относительные деформации превышают рассчитанное по формуле (2) суммарное значение, поскольку термодиффузия кислорода в кремний в процессе оксидирования вызывает дополнительное накопление механических напряжений, а следовательно, и деформацию.

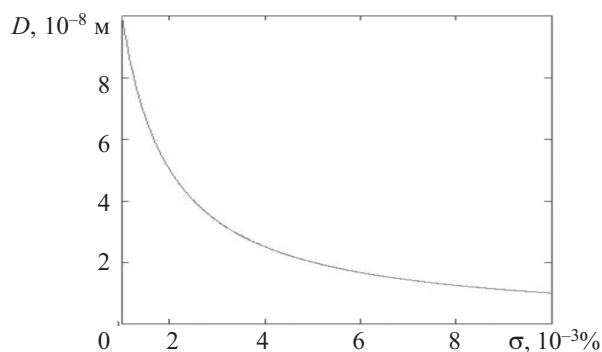


Рис. 3. Зависимость периода дислокационных сеток от величины относительной деформации

Для того, чтобы можно было наблюдать наноструктурную кремниевую структуру в пределах дислокационной сетки необходимо, чтобы период сетки был порядка 10 нм. Рассчитанные по формуле (1) относительные деформации, соответствующие таким периодам, представлены на **рис. 3**. Если учесть, что механические напряжения в слое обратно пропорциональны глубине его залегания, можно заключить, что наиболее разупорядоченный слой (т. е. слой с меньшим периодом дислокационных сеток) примыкает непосредственно к диоксиду кремния. Толщина такого слоя пропорциональна толщине выращенного оксида, что можно объяснить возрастанием механических напряжений на границе раздела при увеличении толщины слоя оксида. Это также можно подтвердить наблюдаемыми изменениями периода дислокационных сеток по глубине (см. рис. 1). На определенном расстоянии от границы раздела происходит возникновение дислокационных сеток с различным периодом и, как следствие, возможное образование наноструктурированного кремния в процессе избирательного травления.

Предложенный метод формирования пористого наноструктурированного кремния обладает рядом преимуществ перед другими методами, т. к. позволяет получать не только пористый кремний в едином цикле изготовления приборов с применением оксидов, но и пористый нанокремний с заданной топологией при варьировании таких параметров как толщина выращенного оксида и время химической обработки.

Применение предлагаемого метода благодаря его технологической простоте и воспроизводимости может стать полезным при массовом производстве высокоэффективных кремниевых солнечных элементов с квантово-размерными эффектами.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Томчук П. М., Данько Д. Б., Кияев О. Э. О механизме люминесценции кремниевых наноструктур // Физика твердого тела.— 2000.— № 11.— С. 1964—1968. [Tomchuk P. M., Dan'ko D. B., Kiyaev O. E. // Fizika tverdogo tela. 2000. N 11. P. 1964]
2. Шкляев А. А., Ичикава М. Предельно плотные массивы наноструктур кремния и германия // Успехи физических наук.— 2008.— № 2.— С. 139—169. [Shklyayev A. A., Ichikava M. // Uspekhi fizicheskikh nauk. 2008. N 2. P. 139]
3. Баталов Р. И., Баязитов Р. М., Хуснуллин Н. М. и др. Структура, примесный состав и фотолюминесценция механически полированных слоев кремния // Физика твердого тела.— 2005.— № 1.— С. 5—8. [Batalov R. I., Bayazitov R. M., Khusnullin N. M. i dr. // Fizika tverdogo tela. 2005. N 1. P. 5]
4. Кулинич О. А., Лисовская А. А., Садова Н. Н. О повышении выявляющей способности избирательного травления монокристаллов кремния // Украинский физический журнал.— 1990.— Т. 35, № 11.— С. 1691—1695. [Kulinich O. A., Lisovskaya A. A., Sadova N. N. // Ukrainskii fizicheskii zhurnal. 1990. Vol. 35, N 11. P. 1691]
5. Кулинич О. А., Смытына В. А., Глауберман М. А. и др. Влияние исходных дефектов на распределение механических напряжений и деформаций при окислении кремния // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2008.— № 5.— С. 62—64. [Kulinich O. A., Smytyna V. A., Glauberman M. A. i dr. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2008. N 5. P. 62]
6. Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии.— М.: Мир, 1984. [Reivi K. Defekty i primesi v poluprovodnikovom kremnii. Moscow. Mir. 1984]
7. Венгер Е. Ф., Голиней Р. Ю., Матвеева Л. О., Васин А. В. Влияние водородной плазмы на спектр электроотражения и спектр электронных состояний пористого кремния // Физика и техника полупроводников.— 2003.— № 1.— С. 104—109. [Venger E. F., Golinei R. Yu., Matveeva L. O., Vasin A. V. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2003. N 1. P. 104]
8. Кулинич О. А., Глауберман М. А., Яцунский И. Р., Чермересюк Г. Г. Фотолюминесцентные свойства химически модифицированной поверхности монокристаллического кремния // Тезисы докл. междунар. науч. конф. «Физика в Украине».— Украина, г. Одесса.— 2005.— С. 165. [Kulinich O. A., Glauberman M. A., Yatsunskii I. R., Chermersyuk G. G. Fotolyuminescentnye svoystva khimicheskii modifitsirovannoi poverkhnosti monokristallicheskogo kremniya // Tезisy dokl. mezhdunar. nauch. konf. «Fizika v Ukraine». Ukraine, Odessa. 2005. P. 165]
9. Smytyna V. A., Kulinich O. A., Glauberman M. A., Yatsunskiy I. R. The structure investigation of near-surface layers in silicon — dioxide silicon structure // Photoelectronics.— 2008.— N. 17.— P. 61—63.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



ФОТОНИКА

18–21 апреля
2011

МИР ЛАЗЕРОВ И ОПТИКИ
6-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА
ЛАЗЕРНОЙ, ОПТИЧЕСКОЙ И ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

ФОТОНИКА сегодня:

- единственная в России признанная и авторитетная рабочая площадка для демонстрации достижений в области лазера, оптики и оптоэлектроники;
- масштабная экспозиция площадью 6000 м², поддерживающая и отражающая жизнь отрасли;
- событие, объединяющее научное и бизнес-сообщество для решения практических задач, а именно 148 фирм-участниц и более 5000 посетителей;
- международный смотр, играющий огромную роль в развитии рынка лазерной техники и оптики, включающий 10 стран-участниц (Германия, Китай, Литва, Нидерланды, Республика Беларусь, Россия, Украина, Финляндия, Швеция, Япония);
- 94% посетителей — специалисты отрасли, что стимулирует партнерские отношения между создателями инноваций и потенциальными пользователями.

Россия, г. Москва, ЦВК «Экспоцентр», павильон № 3

Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2011, № 1–2

Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ, д. ф.-м. н. Д. Р. ДЖУРАЕВ,
к. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА, к. т. н. А. З. РАХМАТОВ,
О. А. АБДУЛХАЕВ, Б. М. КАМАНОВ, А. А. ТУРАЕВ

Узбекистан, г. Ташкент, ФТИ НПО «Физика-Солнце», ОАО «Foton»
E-mail: karimov@uzsci.net, foton@globalnet.uz

Дата поступления в редакцию
25.08.2010 г.

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

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОГРАНИЧИТЕЛЯ ТОКА НА ПОЛЕВОМ ТРАНЗИСТОРЕ

Установленная взаимосвязь между током стабилизации и внешним сопротивлением, соединяющим исток с затвором, представляет интерес при разработке источников и ограничителей тока.

Для повышения надежности работы устройств интегральной оптики требуются различные приборы типа биполярного и полевого транзисторов. Особенно остро стоит вопрос о стабилизации параметров излучателей, которые, являясь очень чувствительными к изменению рабочего режима, требуют специальных электронных схем [1]. В частности, для создания точных измерительных устройств необходимы источники тока, а для полупроводниковых лазеров и светодиодов — специальные ограничители тока. Использование для этих целей полевых транзисторов, в отличие от биполярных, позволяет упростить схемы [2, с. 206]. В настоящей статье анализируется работа ограничителя тока на полевом транзисторе с управляющим $p-n$ -переходом.

Исследуемый полевой транзистор изготовлен на основе эпитаксиальной структуры, полученной выращиванием слоя n -типа проводимости на подложке кремния p -типа, которая представляет собой затворную область. Длина канала составляет 25 мкм, ширина — 560 мкм, ширина контактов стока и истока — 12 мкм. Градиент концентрации носителей по толщине канала возрастает в направлении границы $p-n$ -перехода. Максимальный ток стока равен 6,31 мА, а напряжение отсечки канала составляет 2,4 В. Ограничитель тока в виде двухполосника получается при соединении вывода истока с выводом затвора через внешнее сопротивление, обеспечивающее режим автоматического смещения (рис. 1). Как было показа-

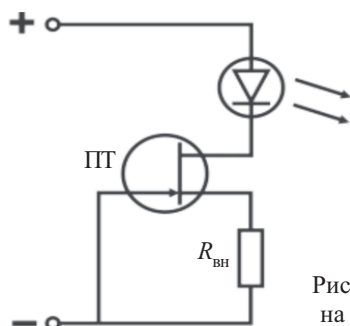


Рис. 1. Ограничитель тока на полевом транзисторе

но в [3], такой режим по механизму насыщения тока стока отличается от режима включения с общим истоком или с фиксированным напряжением через делитель напряжения. Здесь эффективными становятся процессы модуляции канала, а динамическое сопротивление канала сильно возрастает, т. к. при автоматическом смещении происходит сжатие канала как поперечной, так и продольной составляющими электрического поля.

Как следует из схемы ограничителя (рис. 1), ток $I_{СИ}$, протекающий по цепи «канал — сопротивление, подключенное к истоку», создает напряжение, определяемое как $U_{R_{вн}} = R_{вн} I_{СИ}$, т. е. в режиме насыщения тока стока вольт-амперные кривые для заданного напряжения и соответствующего значения внешнего сопротивления $R_{вн}$, создающего это напряжение, будут совпадать (рис. 2). Такой стабилизатор, кроме

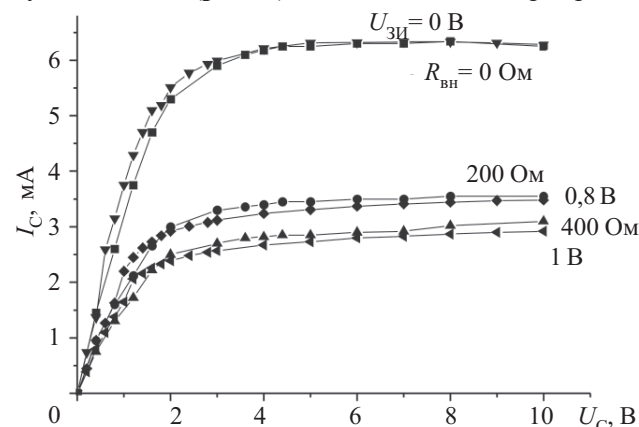


Рис. 2. Зависимости тока стока от напряжения при различных запирающих напряжениях $U_{ЗИ}$ затвора и соответствующих им значениях сопротивления $R_{вн}$

величины стабилизируемого тока, характеризуется напряжением насыщения, наклоном характеристики на участке стабилизации и напряжением пробоя. Если в полевом транзисторе ток стока управляется величиной напряжения затвора, подаваемого от источника, то в рассматриваемом двухполоснике ток, протекающий по каналу, управляется величиной сопротивления. Увеличение значения $R_{вн}$ приводит к уменьшению тока стока.

Максимальная величина тока стабилизации равна максимальному току полевого транзистора при нулевом смещении. Действительно, из результатов из-

мерений следует, что при нулевом значении $R_{\text{вн}}$ ток стабилизации $I_{\text{ст}}$ равен максимальному току полевого транзистора (см. таблицу).

По мере увеличения внешнего сопротивления ток стабилизации уменьшается. Например, при сопротивлении 200 Ом получаем ток 3,45 мА, создаваемый запирающим напряжением $-0,8$ В, а при сопротивлении 400 Ом ток соответствует напряжению $-1,0$ В. Такую зависимость тока стабилизации от сопротивления можно объяснить тем, что управляющее внешнее сопротивление вместе с каналом полевого транзистора создает подобие делителя напряжения, который запирает канал. В результате на сопротивлении пропорционально его величине падает напряжение, и ток стока становится управляемым величиной сопротивления. Совпадение соответствующих кривых ВАХ на рис. 2 можно объяснить тем, что в обоих режимах на затворе имеем одно и то же напряжение.

Зависимость тока стабилизации $I_{\text{ст}}$ от значений $R_{\text{вн}}$

$R_{\text{вн}}, \text{Ом}$	$I_{\text{ст}}, \text{мА}$	$R_{\text{вн}}, \text{Ом}$	$I_{\text{ст}}, \text{мА}$
0	6,31	1000	1,27
100	4,40	1500	0,966
200	3,45	2000	0,80
400	2,45	3000	0,53
700	1,70	4000	0,44

Известно, что в области насыщения тока стока его зависимость от напряжения затвора является степенной функцией, определяемой выражением [4]

$$I_{\text{СИ}} = I_{\text{СИ max}} \left(1 - \frac{U_{\text{ЗИ}}}{U_{\text{отс}}} \right)^m,$$

откуда, принимая во внимание, что $U_{\text{ЗИ}} = U_{R_{\text{вн}}} = I_{\text{СИ}} R_{\text{вн}}$, можно определить зависимость тока стабилизации от внешнего сопротивления, соединяющего вывод истока с выводом затвора

$$R_{\text{вн}} = \frac{U_{\text{отс}}}{I_{\text{СИ}}} \left(1 - \sqrt[m]{\frac{I_{\text{СИ}}}{I_{\text{СИ max}}}} \right).$$

Отметим, что в полевых транзисторах с управляющим $p-n$ -переходом в зависимости от технологии получения полевого транзистора m может принимать значения от 1,5 до 2,2 [4, 5]. Оценка показателя степени m из зависимости $\ln I/R$ от $\ln I$ для рассматриваемого полевого транзистора с максимальным током стока, равным 6,31 мА, дает значение $m=1,84$. Такая

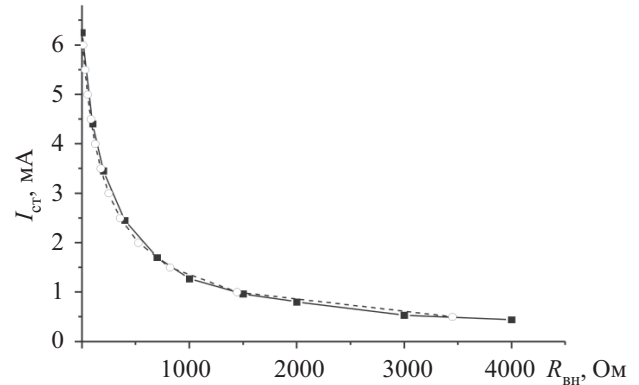


Рис. 3. Экспериментальные (■) и расчетные (○) данные зависимости тока стабилизации от $R_{\text{вн}}$

зависимость близка к квадратичной. Соответственно, на основании полученной зависимости для задаваемого значения тока стабилизации можно определить значение требуемого внешнего сопротивления $R_{\text{вн}}$. Данные расчетов, проведенных в предположении квадратичной зависимости тока от напряжения, как видно из рис. 3, хорошо согласуются с экспериментальными данными зависимости внешнего сопротивления $R_{\text{вн}}$ от тока стабилизации.

Таким образом, на основе исследования стоковых характеристик полевого транзистора установлена взаимосвязь между током стабилизации и внешним сопротивлением, соединяющим вывод истока с выводом затвора.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Колосов В. Организация систем вторичного электропитания для современной цифровой электронной аппаратуры // www.electronics.ru/issue/1998/1/15 [Kolosov V. // www.electronics.ru/issue/1998/1/15]
2. Кобболд Р. Теория и применения полевых транзисторов. — Л.: Энергия, 1975. [Kobbold R. Teoriya i primeneniya polevykh tranzistorov. Leningrad. Energiya. 1975]
3. Ёдгорова Д. М. Механизм насыщения тока стока полевого транзистора с $p-n$ -переходом // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2006. — № 5. — С. 58—60. [Yodgorova D. M. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature. 2006. N 5. P. 58]
4. Игумнов Д. В., Громов И. С. Эксплуатационные параметры и особенности применения полевых транзисторов. — М.: Радио и связь, 1981. [Igumnov D. V., Gromov I. S. Ekspluatatsionnye parametry i osobennosti primeneniya polevykh tranzistorov. Moscow. Radio i svyaz'. 1981]
5. Шишков А. И. Экспериментальное исследование характеристики прямой передачи полевого транзистора // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. — 1973. — Т. 16, № 9. — С. 94—98. [Shishkov A. I. // Izvestiya VUZov. Radioelektronika. 1973. Vol. 16, N 9. P. 94]

К. ф.-м. н. В. И. ГАВРЬИШ, А. И. КОСАЧ

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»
E-mail: ikni_pz@polynet.lviv.uaДата поступления в редакцию
29.09 2010 г.Оппонент д. ф.-м. н. И. О. ГОРОШЕК
(Институт моделирования в энергетике, г. Киев)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕМЕНТАХ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Решена граничная задача теплопроводности для изотропной полосы с инородным прямоугольным включением, на одной из границ которой осуществляется конвективный теплообмен с внешней средой, а другая нагревается тепловым потоком.

Процесс проектирования отдельных узлов и элементов конструкций микроэлектронной аппаратуры требует точной математической модели тепловых процессов в структурах с инородными включениями. Для этого необходима разработка новых эффективных методов решения краевых задач теплопроводности, что имеет как теоретическое, так и практическое значение. Учет инородных включений в структурах усложняет математическую модель, однако увеличивает ее точность, что необходимо для обеспечения термоустойчивости структур. Поэтому разработка новых алгоритмов и программных средств для анализа температурных режимов в отдельных узлах и конструктивных элементах микроэлектронной аппаратуры является достаточно актуальной задачей.

Некоторые исследования теплопроводности тел одномерной кусочно-однородной структуры были проведены в [1]. В [2] рассмотрены двумерные задачи теплопроводности для кусочно-однородных тел с трещинами, которые сводятся к решению сингулярных интегральных уравнений методом механических квадратур.

Настоящая работа посвящена решению граничной стационарной задачи теплопроводности для изотропной полосы с инородным включением прямоугольной формы, на одной из границ которой осуществляется конвективный теплообмен с внешней средой, а другая нагревается тепловым потоком.

Постановка задачи

Рассмотрим изотропную полосу, содержащую инородное прямоугольное включение площадью $4hl$, отнесенную к декартовой системе координат (x, y) с началом в центре включения (рис. 1). На границах включения $L_x = \{(x, y): |x| = h, |y| \leq l\}$ и $L_y = \{(x, y): |x| \leq h, |y| = l\}$ заданы условия идеального теплового контакта. На границе полосы $\Gamma_- = \{(x, -l-d_n): |x| < \infty\}$ осуществляется конвективный теплообмен с внешней средой постоянной температуры t_c . Другая граница по-

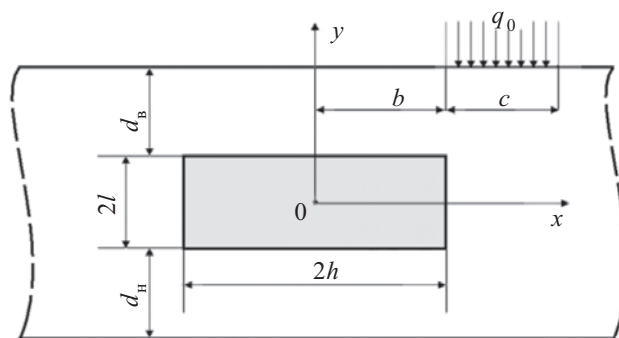


Рис. 1. Изотропная полоса с инородным прямоугольным включением, нагреваемая тепловым потоком

лосы $\Gamma_- = \{(x, l+d_b): |x| < \infty\}$ теплоизолирована за исключением отрезка длиной c , левый конец которого находится на расстоянии от центра включения и на который падает тепловой поток мощностью $q_0 = \text{const}$.

Построение исходного уравнения теплопроводности

Распределение стационарного температурного поля $t(x, y)$ в рассматриваемой системе можно получить путем решения уравнения теплопроводности [3, с. 46—58, 4, с. 17—29]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x, y) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(x, y) \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] = 0 \quad (1)$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} \lambda_1 \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=l+d_b} &= -q_0 [S_-(x-b) + S_+(x-b-c)]; \\ \lambda_1 \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=-l-d_n} &= \alpha \theta \Big|_{y=-l-d_n}, \\ \theta \Big|_{|x| \rightarrow \infty} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\lambda(x, y)$ — коэффициент теплопроводности неоднородной полосы $\lambda(x, y) = \lambda_1 + (\lambda_0 - \lambda_1) \cdot N(x, h) \cdot N(y, l)$;

λ_1, λ_0 — коэффициенты теплопроводности основного материала и материала включения;

α — коэффициент теплоотдачи с границы полосы Γ_- ;

$\theta = t - t_c$;

$N(x, h) = S_-(x+h) - S_+(x-h)$;

S_-, S_+ — асимметрические единичные функции [5],

$$S_{\pm}(\zeta) = \begin{cases} 1 & \text{при } \zeta > 0; \\ 0,5 \mp 0,5 & \text{при } \zeta = 0; \\ 0 & \text{при } \zeta < 0. \end{cases}$$

Введем функцию [6]

$$T = \lambda(x, y) \cdot \theta \quad (4)$$

и продифференцируем ее по переменным x и y с учетом формулы (3). В результате получим

$$\begin{aligned} \lambda(x, y) \frac{\partial \theta}{\partial x} &= \frac{\partial T}{\partial x} + (\lambda_0 - \lambda_1) \times \\ &\times [\theta|_{x=h} \delta_+(x-h) - \theta|_{x=-h} \delta_-(x+h)] N(y, l); \\ \lambda(x, y) \frac{\partial \theta}{\partial y} &= \frac{\partial T}{\partial y} + (\lambda_0 - \lambda_1) \times \\ &\times [\theta|_{y=l} \delta_+(y-l) - \theta|_{y=-l} \delta_-(y+l)] N(x, h), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\delta_{\pm}(\zeta) = \frac{dS_{\pm}(\zeta)}{d\zeta}$ — асимметрические дельта-функции Дирака [5], используемые при моделировании

многих физических процессов для кусочно-однородных сред.

Подставляя выражения (5) в соотношение (1), приходим к дифференциальному уравнению в частных производных с разрывными и сингулярными коэффициентами:

$$\begin{aligned} \Delta T + (\lambda_1 - \lambda_0) \{ &[\theta|_{x=-h} \delta'_-(x+h) - \theta|_{x=h} \delta'_+(x-h)] \times \\ &\times N(y, l) + [\theta|_{y=-l} \delta'_-(y+l) - \theta|_{y=l} \delta'_+(y-l)] \times \\ &\times N(x, h) \} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ — оператор Лапласа в декартовой прямоугольной системе координат.

Нахождение аналитического решения задачи

Аппроксимируем функции $\theta(\pm h, y)$, $\theta(x, \pm l)$ следующим образом [6]:

$$\begin{aligned} \theta(\pm h, y) &= \theta_1^{(\pm h)} + \sum_{j=1}^{n-1} (\theta_{j+1}^{(\pm h)} - \theta_j^{(\pm h)}) S_{\pm}(y - y_j); \\ \theta(x, \pm l) &= \theta_1^{(\pm l)} + \sum_{k=1}^{m-1} (\theta_{k+1}^{(\pm l)} - \theta_k^{(\pm l)}) S_{\pm}(x - x_k), \end{aligned} \quad (7)$$

где $y_j \in]-l; l[$; $y_1 \leq y_2 \leq \dots \leq y_{n-1}$;

$x_k \in]-h; h[$; $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_{m-1}$;

$\theta_j^{(\pm h)}$, $\theta_k^{(\pm l)}$ — неизвестные аппроксимирующие значения искомой температуры.

Подставляя выражения (7) в уравнение (6), получаем

$$\begin{aligned} \Delta T + (\lambda_1 - \lambda_0) \{ &[\theta_1^{(-l)} N(y, l) + \sum_{j=1}^{n-1} (\theta_{j+1}^{(-l)} - \\ &- \theta_j^{(-l)}) N(y, y_j)] \delta'_-(x+h) - [\theta_1^{(l)} N(y, l) + \sum_{j=1}^{n-1} (\theta_{j+1}^{(l)} - \\ &- \theta_j^{(l)}) N(y, y_j)] \delta'_+(x-h) + [\theta_1^{(-h)} N(x, h) + \sum_{k=1}^{m-1} (\theta_{k+1}^{(-h)} - \\ &- \theta_k^{(-h)}) N(x, x_k)] \delta'_-(y+l) - [\theta_1^{(h)} N(x, h) + \sum_{k=1}^{m-1} (\theta_{k+1}^{(h)} - \\ &- \theta_k^{(h)}) N(x, x_k)] \delta'_+(y-l) \} = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

где $N(y, y_j) = S_-(y - y_j) - S_+(y - l)$;

$N(x, x_k) = S_-(x - x_k) - S_+(x - h)$.

Применив интегральное преобразование Фурье по координате y к уравнению (8) и граничным условиям (2) с учетом соотношения (4), приходим к обыкновенному дифференциальному уравнению с постоянными коэффициентами

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \bar{T}}{dy^2} - \xi^2 \bar{T} &= \frac{i}{\sqrt{2\pi}} (\lambda_1 - \lambda_0) \{ \xi [e^{-ih\xi} (\theta_1^{(-l)} N(y, l) + \\ &+ \sum_{k=1}^{n-1} (\theta_{k+1}^{(-l)} - \theta_k^{(-l)}) N(y, y_k)) - e^{ih\xi} (\theta_1^{(l)} N(y, l) + \\ &+ \sum_{k=1}^{n-1} (\theta_{k+1}^{(l)} - \theta_k^{(l)}) N(y, y_k))] + \frac{1}{\xi} [(2\theta_1^{(-h)} \cdot \text{sh } ih\xi + \\ &+ \sum_{j=1}^{m-1} (\theta_{j+1}^{(-h)} - \theta_j^{(-h)}) (e^{ih\xi} - e^{ix_k\xi})) \delta'_-(y+l) - \\ &- ((2\theta_1^{(h)} \cdot \text{sh } ih\xi + \sum_{j=1}^{m-1} (\theta_{j+1}^{(h)} - \theta_j^{(h)}) \times \\ &\times (e^{ih\xi} - e^{ix_k\xi})) \delta'_+(y-l))] \} \end{aligned} \quad (9)$$

и граничным условиям

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{T}}{dy} \Big|_{y=-l-d_H} &= \frac{\alpha}{\lambda_1} \bar{T} \Big|_{y=-l-d_H}, \\ \frac{d\bar{T}}{dy} \Big|_{y=l+d_B} &= \frac{iq_0}{\sqrt{2\pi}\xi} e^{i\xi b} (e^{i\xi c} - 1), \end{aligned} \quad (10)$$

где \bar{T} — трансформанта функции T , $\bar{T} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\xi y} T dy$;

ξ — параметр интегрального преобразования Фурье;

i — мнимая единица.

Неоднородное дифференциальное уравнение (9) решено методом вариации постоянных. С использованием граничных условий (10) получено частное решение граничной задачи (9), (10). Затем, применив обратное интегральное преобразование Фурье, получим выражение

$$T = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left\{ \frac{q_0}{\xi} P(\xi, y) \Phi(\xi, x) + (\lambda_0 - \lambda_1) \times \right. \\ \times [\theta_1^{(-h)} (\sin \xi(x+h) - \theta_1^{(h)} \sin \xi(x-h)) \times \\ \times \Phi_1(\xi, y) + \sin \xi(x+h) \sum_{j=1}^{m-1} (\theta_{j+1}^{(-h)} - \theta_j^{(-h)}) \Phi(\xi, y, y_j) - \\ - \sin \xi(x-h) \sum_{j=1}^{m-1} (\theta_{j+1}^{(h)} - \theta_j^{(h)}) \Phi(\xi, y, y_j) + \\ + \Phi_2(\xi, y) (2\theta_1^{(-l)} \sin h\xi \cdot \cos x\xi - \sum_{k=1}^{n-1} (\theta_{k+1}^{(-l)} - \\ - \theta_k^{(-l)}) F(\xi, x, x_k)) + \Phi_3(\xi, y) (2\theta_1^{(l)} \sin h\xi \cdot \cos x\xi - \\ \left. - \sum_{k=1}^{n-1} (\theta_{k+1}^{(l)} - \theta_k^{(l)}) F(\xi, x, x_k) \right) \Bigg\} d\xi. \quad (11)$$

Здесь

$$\Phi(\xi, x) = \sin \xi(b-x) + \sin \xi(x-b-c);$$

$$\Phi_1(\xi, y) = \frac{1}{\xi} F(\xi, y) - P(\xi, y) f(\xi);$$

$$\Phi(\xi, y, y_j) = \frac{1}{\xi} F(\xi, y, y_j) - P(\xi, y) f(\xi, y_j);$$

$$\Phi_2(\xi, y) = P(\xi, y) \operatorname{sh} \xi(2l + d_b) - \frac{1}{\xi} \operatorname{ch} \xi(y+l) S_-(y+l);$$

$$\Phi_3(\xi, y) = \frac{1}{\xi} \operatorname{ch} \xi(y-l) S_+(y-l) - P(\xi, y) \operatorname{sh} \xi d_b;$$

$$P(\xi) = \xi [\operatorname{sh} \xi(l + d_b) P_1(\xi) + \operatorname{ch} \xi(l + d_b) P_2(\xi)];$$

$$P_1(\xi) = \lambda_1 \xi \operatorname{ch} \xi(l + d_n) + \alpha \operatorname{sh} \xi(l + d_n);$$

$$P_2(\xi) = \lambda_1 \xi \operatorname{sh} \xi(l + d_n) + \alpha \operatorname{ch} \xi(l + d_n);$$

$$P(\xi, y) = \frac{1}{P(\xi)} [P_1(\xi) \operatorname{ch} \xi y + P_2(\xi) \operatorname{sh} \xi y];$$

$$F(\xi, y) = \operatorname{ch} \xi(y+l) S_-(y+l) - \operatorname{ch} \xi(y-l) \times \\ \times S_+(y-l) - N(y, l);$$

$$F(\xi, y, y_j) = \operatorname{ch} \xi(y-y_j) S_-(y-y_j) - \operatorname{ch} \xi(y-l) \times \\ \times S_+(y-l) - N_j(y, y_j);$$

$$F(\xi, x, x_k) = \sin \xi(x-h) - \sin \xi(x-x_k);$$

$$f(\xi) = \operatorname{sh} \xi(2l + d_b) - \operatorname{sh} \xi d_b;$$

$$f(\xi, y_j) = \operatorname{sh} \xi(l + d_b - y_j) - \operatorname{sh} \xi d_b.$$

Неизвестные аппроксимирующие значения темпе-

ратуры $\theta_j^{(\pm h)}$ ($j=1, \dots, n-1$), $\theta_k^{(\pm l)}$ ($k=1, \dots, m-1$) находим, решая систему $2(n+m)$ линейных алгебраических уравнений, полученную из выражения (11).

Таким образом, искомое температурное поле в неоднородной полосе описывается формулой (11). Из соотношения (11) получаем значение температуры в любой точке полосы и инородного включения.

Анализ численных результатов

Численный анализ безразмерной избыточной температуры $T^* = \frac{T}{q_0 h}$ проводился при фиксированном значении критерия Био $Bi = \frac{\alpha h}{\lambda_1}$ и следующих исходных данных: материал полосы — керамика ВК94-I ($\lambda_1=13,4$ Вт/(м·К)), материал включения — серебро ($\lambda_0=419$ Вт/(м·К)), количество разбиений отрезков $]-h; h[$ и $]-l; l[$ — $n=m=5$; $L=l/h=2$; $D_b=d_b/h$; $B=b/h=2$; $C=c/h=1$.

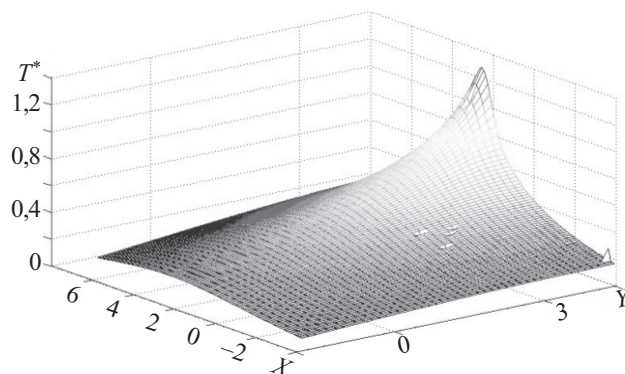


Рис. 2. Распределение избыточной безразмерной температуры T^* по площади изотропной полосы при $D_n=1$, $Bi=5$

На рис. 2 изображено полученное температурное поле рассматриваемой изотропной полосы в безразмерных координатах $X=x/h$ и $Y=y/h$ при $D_n=d_n/h=1$ и $Bi=5$. Как видим, температура достигает максимального значения на границе полосы $Y=L+D_b$, т. е. в области непосредственного воздействия теплового потока, а при $-4 \leq X \leq 4$, $-1,5 \leq Y \leq 0$ и $-4 < X \leq 0$, $0 < Y \leq 4$ она практически равна температуре среды.

На рис. 3 показано изменение температуры T на границах включения, откуда видно, что она практически равна температуре среды при $X \leq -12$, $X \geq 17$ на границах, где $Y=\text{const}$, и при $Y \leq -2,75$ на границах, где $X=\text{const}$.

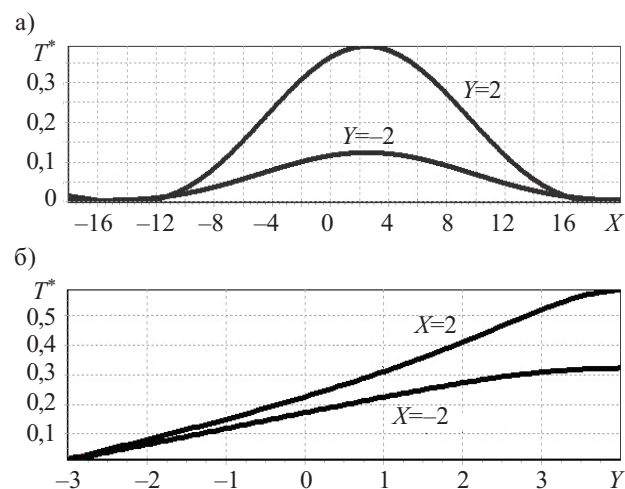


Рис. 3. Изменение избыточной безразмерной температуры T^* на границах включения вдоль осей координат Ox (а) и Oy (б) при $D_n=2$, $Bi=5$

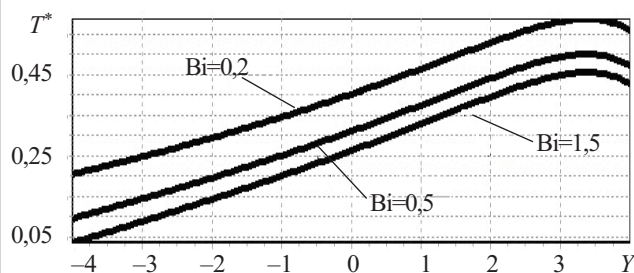


Рис. 4. Изменение избыточной безразмерной температуры T^* вдоль оси координат Oy при $X=0$ для различных значений критерия Био при $D_n=2$

Графики на рис. 4 демонстрируют влияние теплоотдачи на распределение температуры при указанных исходных данных. Здесь видно, что с увеличением критерия Био температура убывает.

Таким образом, в настоящей работе решена граничная стационарная задача теплопроводности для изотропной полосы с инородным включением прямоугольной формы, на одной из границ которой осу-

ществляется конвективный теплообмен с внешней средой, а другая нагревается тепловым потоком.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Беляев Н. В., Рядно А. А. Методы теории теплопроводности. Ч. I. — М.: Высш. шк., 1982. [Belyaev N. V., Ryadno A. A. Metody teorii teploprovodnosti. Ch. I. Moscow. Vyssh. shk. 1982]
2. Саврук М. П., Зеленьак В. М. Двовимірні задачі термopужності для кусково-однорідних тіл з тріщинами: монографія. — Львів: Растр-7, 2009. [Savruk M. P., Zelenyak V. M. Dvovimirni zadachi termopruzhnosti dlya kuskovo-odnorodnih til z trishchinami: monografiya. L'viv. Rastr-7. 2009]
3. Подстригач Я. С., Ломакин В. А., Коляно Ю. М. Термоупругость тел неоднородной структуры. — М.: Наука, 1984. [Podstrigach YA. S., Lomakin V. A., Kolyano Yu. M. Termouprugost' tel neodnorodnoi struktury. Moscow. Nauka. 1984]
4. Коляно Ю. М. Методы теплопроводности и термоупругости неоднородного тела. — Киев: Наукова думка, 1992. [Kolyano Yu. M. Metody teploprovodnosti i termouprugosti neodnorodnogo tela. Kiev. Naukova dumka. 1992]
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1977. [Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. Moscow. Nauka. 1977]
6. Коляно Ю. М., Кричевец Ю. М., Гаврыш В. И. Уравнение теплопроводности для элементов микроэлектроники. — Часть II // Радиоэлектронное материаловедение. — Львов, 1989. — С. 175—183. [Kolyano Yu. M., Krichevets Yu. M., Gavrysh V. I. Uravnenie teploprovodnosti dlya elementov mikroelektroniki. Chast' II // Radioelektronnoe materialovedenie. L'vov. 1989. P. 175]

К. т. н. Г. Н. ШИЛО, Е. В. ОГРЕНИЧ,
к. т. н. Н. П. ГАПОНЕНКО

Украина, Запорожский национальный технический университет
E-mail: gshilo@zntu.edu.ua, chipmob@gmail.com

Дата поступления в редакцию
19.07 20010 г.

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

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИАТОРОВ С ОПТИМАЛЬНЫМИ МАССОГАБАРИТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Предложенный метод может использоваться для проектирования любых ребристых радиаторов и приводит к снижению массы более чем в 2,5 раза при увеличении объема в 1,5 раза.

Мощные полупроводниковые приборы, которые широко применяются в преобразовательной технике и в выходных каскадах систем управления, имеют ограниченную допустимую температуру $p-n$ -переходов [1]. Обычно эти приборы очень компактны и имеют высокое тепловое сопротивление между корпусом прибора и окружающей средой. Для обеспечения их теплового режима при значительных уровнях мощности разработчики радиоаппаратуры обычно используют радиаторы. Существует большое количество радиаторов [2, 3], отличающихся типом оребрения (ребристые, штыревые, проволочные, гофрированные) и формой основания (пластина, цилиндр).

В [4] показано, что при оптимальном распределении температуры вдоль теплоотводящих элементов радиаторов возможно значительное уменьшение их массы и габаритов. Возможность уменьшения массы и объема ребристых радиаторов показана в [5, 6], однако оптимизация проводилась при заданной толщине

не ребер и, кроме того, в использованных моделях не учитывался трехмерный характер температурного поля в основании радиатора. При расчете тепловых режимов радиаторов использовались граничные условия 3-го рода и приближенные соотношения для коэффициентов теплоотдачи.

Существенное увеличение точности расчетов можно получить при использовании средств инженерного проектирования [7—9], позволяющих моделировать распределение температуры в сложных конструкциях устройств различного применения. В сочетании с алгоритмами оптимизации это открывает путь к разработке методов проектирования радиаторов, учитывающих любые конструктивные и технологические ограничения.

Целью настоящей работы является разработка методов проектирования ребристых радиаторов с оптимальными массогабаритными параметрами на основе использования средств инженерного проектирования.

Тепловая модель ребристого радиатора

Построение модели радиатора в среде инженерного проектирования делится на этапы:

- создание трехмерной модели твердого тела по заданным размерам;
- задание теплофизических параметров материала радиатора и параметров теплоносителя;

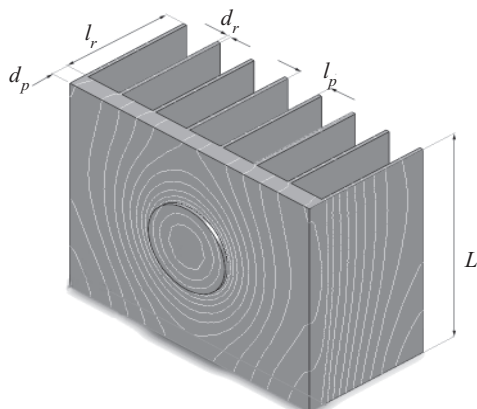


Рис. 1. Тепловая модель ребристого радиатора:
 d_r, l_r — толщина и длина ребра; l_p — расстояние между ребрами;
 d_p — толщина основания; L — ширина радиатора

— определение границ области решения задачи, задание начальных и граничных условий;

— построение и оптимизация расчетной сетки в пределах области решения задачи [7, с. 386—391].

При построении модели приняты следующие допущения:

— не учитывается шероховатость поверхности радиатора;

— размеры межреберных участков, толщина и длина всех ребер одинаковы;

— в области контакта основания полупроводникового прибора и радиатора тепловой поток постоянен;

— коэффициент теплопроводности материала радиатора не зависит от температуры.

Тепловая модель ребристого радиатора, построенная с учетом принятых допущений, показана на рис. 1. (Моделирование проводилось в среде Siemens NX, модуль NX. Электронные системы охлаждения. Построенная модель позволяла учесть трехмерный характер температурного поля, что отражено на рисунке. Здесь белыми линиями показаны изотермы, черной — область контакта полупроводникового прибора и основания радиатора.)

Для решения поставленной оптимизационной задачи необходима математическая модель зависимости теплового сопротивления R_T радиатора от размеров его элементов. Для ее создания исследовалась зависимость между длиной межреберного участка и толщиной основания радиатора при заданных значениях остальных размеров и величины теплового сопротивления. График такой зависимости показан на рис. 2, где заштрихована область работоспособности

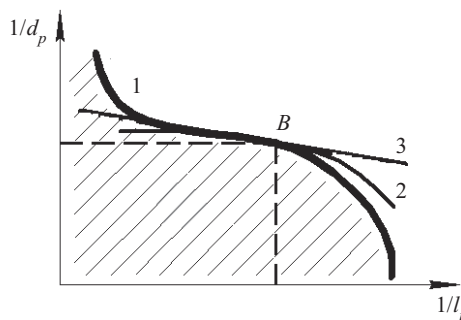


Рис. 2. Формирование области работоспособности

сти, в которой обеспечивается необходимый тепловой режим источника тепла.

Искомая математическая модель при аппроксимации границ области работоспособности 1 эллипсоидом 2 в граничной точке B имеет вид

$$R_T = \sum_{i=1}^5 c_i x_i^2, \quad (1)$$

где c_j — коэффициенты;

$$x_1 = 1/d_p; \quad x_2 = 1/l_p; \quad x_3 = 1/d_r; \quad x_4 = 1/l_r; \quad x_5 = 1/L.$$

Коэффициенты модели c_j находились из условия тождества касательных гиперплоскостей к гиперповерхностям области работоспособности и модели (1). Уравнение касательной гиперплоскости к границам области работоспособности (касательная 3 на рис. 2) может быть записано в виде

$$R_T = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i x_i, \quad (2)$$

$$\text{где } a_0 = R_{tb} - \sum_{i=1}^5 a_i x_{bi};$$

a_i — линейные коэффициенты разложения функции

$$R_T \text{ в ряд Тейлора, } a_i = \left. \frac{\partial R_T}{\partial x_i} \right|_{x_{bi}};$$

X_{bi} — координаты граничной точки области работоспособности, $X_{bi} = \{x_{b1}, \dots, x_{bn}\}$;

R_{tb} — гранично-допустимое входное тепловое сопротивление радиатора.

Коэффициенты a_i находятся численным дифференцированием в процессе моделирования с помощью средств инженерного проектирования. Сравнение выражений (1) и (2) позволяет установить связь между коэффициентами a_i и c_i :

$$c_i = \frac{R_T}{R_T - a_0} \frac{a_i}{x_{bi}}. \quad (3)$$

Полученные соотношения позволяют однозначно установить коэффициенты эллипсоидной модели и могут использоваться при оптимизации размеров элементов конструкций радиатора с учетом стратегий оптимизации.

Оптимизация массогабаритных параметров радиаторов

Оптимизацию массогабаритных параметров ребристых радиаторов обычно проводят по стратегиям минимизации массы (M -стратегия) и минимизации объема (V -стратегия). M -стратегия может интерпретироваться как стратегия минимальной стоимости, поскольку она определяет расход материала. V -стратегию можно использовать для оценки качества теплоотвода, если считать, что качество теплоотвода обратно пропорционально объему. Оптимальное соотношение цена/качество можно определять, используя массогабаритный показатель в виде произведения массы радиатора на его объем (MV -стратегия).

Целевая функция M -стратегии оптимизации радиатора имеет вид

$$m = \rho L[(n-1)d_p l_p + n d_r l_r + n d_p d_r] \rightarrow \min,$$

где ρ — плотность материала радиатора;

n — количество ребер.

С учетом модели (1) целевая функция приобретает вид

$$m = \rho \frac{1}{x_5} \left(\frac{n-1}{x_1 x_2} + \frac{n}{x_3 x_4} + \frac{n}{x_1 x_3} \right) \rightarrow \max. \quad (4)$$

Оптимизационную задачу решаем при ограничении $R_T \leq R_{tb}$.

Решение оптимизационной задачи проводится методом множителей Лагранжа. Необходимость использования при этом выражений (4) приводит к сложной системе нелинейных уравнений. Для упрощения процедуры оптимизации используется гиперболическая модель весовой функции

$$G_a(x) = \sum_{i=1}^5 \frac{g_i}{x_i}. \quad (6)$$

Входящие в это выражение коэффициенты g_i определяются из условия параллельности касательных гиперплоскостей к гиперповерхностям (4) и (6)

$$b_i = \frac{\partial m}{\partial x} \bigg|_{x_b}, \quad g_i = -b_i x_{bi}^2,$$

где b_i — линейные коэффициенты разложения функции (4) в ряд Тейлора.

Вспомогательная функция в методе множителей Лагранжа для M -стратегии записывается в виде

$$L(\lambda) = \sum_{i=1}^5 \frac{g_i}{x_i} + \lambda \sum_{i=1}^5 c_i x_i^2. \quad (7)$$

Оптимальное значение параметров достигается при $\frac{\partial L(\lambda)}{\partial x_i} = 0, \quad i = \overline{1, n}.$

В результате составляются уравнения вида

$$-\frac{g_i}{x_i^2} + 2\lambda c_i x_i = 0, \quad i = \overline{1, n}. \quad (8)$$

Решение системы уравнений (1) и (8) приводит к оптимальным при M -стратегии параметрам радиатора:

$$x_i = \sqrt[3]{\frac{g_i}{c_i}} \cdot \sqrt[3]{R_{tb} / \sum_{i=1}^5 \sqrt[3]{c_i \cdot g_i^2}}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Целевая функция V -стратегии оптимизации радиатора имеет вид

$$V = L(l_r + d_p)(d_p n + l_p(n-1)) \rightarrow \min.$$

Используя преобразования (6)–(8), можно также прийти к выражению (9). Это позволяет использовать в процедурах оптимизации массы и объема одинаковые оптимизационные соотношения. Отличаются эти процедуры только выражением для целевой функции.

Целевая функция MV -стратегии содержит произведение массы и объема радиатора, что повышает показатели степени переменных. Это учитывается в модели весовой функции

$$G_a(x) = \sum_{i=1}^5 \frac{g_i}{x_i^2}, \quad (10)$$

где $g_i = -0,5b_i x_{bi}^3$;

b_i — линейные коэффициенты разложения произведения функций m и V в ряд Тейлора.

Тогда оптимальные размеры элементов конструкции радиатора в MV -стратегии устанавливаются соотношениями

$$x_i = \sqrt[4]{\frac{g_i}{c_i}} \cdot \sqrt[4]{R_{tb} / \sum_{i=1}^5 \sqrt{c_i \cdot g_i}}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (11)$$

Размеры, определенные с помощью соотношений (9) и (11), зависят от положения граничной точки области работоспособности. Поэтому оптимальные значения размеров радиатора определяются по следующему итерационному алгоритму.

Шаг 1. Определяются начальные размеры радиатора. Используются известные процедуры выбора и расчета радиаторов (например, [2]).

Шаг 2. Определяются параметры моделей (1), (2) и (6) или (10).

Шаг 3. Определяются оптимальные значения размеров элементов конструкции радиаторов с использованием выражений (9) или (11).

Шаг 4. Проверяется условие

$$\left| \frac{R_T^{(i)} - R_{tb}}{R_{tb}} \right| \leq \epsilon,$$

где ϵ — заданная погрешность вычислений. Если условие не выполняется, то — переход на шаг 2. Иначе — конец алгоритма.

Предложенный алгоритм позволяет проектировать ребристые радиаторы с одинаковыми размерами однотипных элементов конструкции. Такие радиаторы используются для упрощения технологического процесса их изготовления. При этом разработанный алгоритм является универсальным в том смысле, что могут быть сняты или введены ограничения на любые размеры элементов конструкции. При этом изменяется только количество переменных n . Алгоритм может использоваться и при проектировании других типов радиаторов, например пластинчато-щтыревых и радиаторов с цилиндрическими ребрами. Особенности этих радиаторов учитываются в выражениях для весовых функций.

Применение метода

Особенность применения метода рассмотрим на примере ребристого радиатора из алюминиевого сплава Ад2 с допустимым входным тепловым сопротивлением $R_{tb} = 2,73$ К/Вт для источника тепла диаметром 28 мм. Мощность источника $P = 13,3$ Вт, температура окружающей среды $t_c = 40^\circ\text{C}$, коэффициент черноты поверхности радиатора $\epsilon = 0,91$. Радиатор расположен в воздушной среде при нормальном атмосферном давлении. Режим движения теплоносителя — свободная конвекция. В качестве начального приближения используем размеры стандартного радиатора. Рассмотрим M -, V - и MV -стратегии.

Предложенный алгоритм отличается высокой эффективностью, обеспечивая сходимость итерационного процесса за несколько итераций. Для оценки сходимости алгоритма может служить зависимость массы радиатора m от количества итераций k в M -стратегии, показанной на рис. 3. Из рисунка вид-

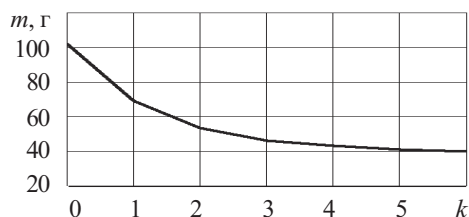


Рис. 3. Зависимость массы радиатора m от количества итераций k в M -стратегии

Стратегия:	Размеры радиатора, мм					Параметры радиатора		
	d_p	l_p	d_r	l_r	L	m , г	V , см ³	mV , г·дм ³
M	1,4	9,6	0,27	59,9	66,2	39,7	281,5	11,2
V	5,1	7,9	1,1	34,3	64,2	106,9	162,1	17,3
MV	1,7	10	0,35	55,7	58,7	43,5	245,3	10,7
Серийный радиатор	5	9	1	32	63	102	165,5	16,9

но, что уже при 5—7 итерациях процесс оптимизации может быть завершен.

Оптимальные размеры элементов конструкции и массогабаритные показатели радиатора, полученные при применении различных стратегий, а также стандартного радиатора представлены в **таблице**.

Как видно из таблицы, от выбора стратегии существенно зависят и размеры ребер и участков основания, и массогабаритные характеристики радиатора. По сравнению со стандартным радиатором M -стратегия проектирования приводила к уменьшению толщины основания и ребер более чем в 3 раза. При этом увеличивалась длина ребер и участков основания. Подобным образом изменялись размеры и при MV -стратегии. Размеры радиаторов в V -стратегии мало отличались от размеров стандартного.

Как и следовало ожидать, наименьшую массу обеспечивает M -стратегия проектирования: по сравнению со стандартным радиатором, масса уменьшилась в 2,5 раза. При этом объем увеличился в 1,5 раза. К этим показателям приводит и MV -стратегия. При V -стратегии показатели незначительно лучше, чем у стандартного радиатора. Это означает, что стандартные радиаторы по своим параметрам близки к радиаторам минимального возможного объема.

В исследованном радиаторе размеры однотипных элементов конструкции принимались одинаковыми. Снятие этих ограничений позволит улучшить массогабаритные параметры на 20—30%. При этом количество переменных в алгоритме возрастет до $4n-1$.

Предложенные метод и алгоритм при изменении выражений для целевой функции могут использоваться для проектирования любых радиаторов, в том чис-

ле пластинчато-штыревых и радиаторов с цилиндрическими ребрами.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Полупроводниковые приборы. Транзисторы. Справочник / Под ред. В. М. Петухова. — М.: Радио и связь, 1993. [Poluprovodnikovyye pribory. Tranzistory. Spravochnik / Pod red. V. M. Petukhova. Moscow. Radio i svyaz'. 1993]
2. Скрипников Ю. Ф. Радиаторы для полупроводниковых приборов. — М.: Энергия, 1973. Skripnikov Yu. F. Radiatory dlya poluprovodnikovyykh priborov. Moscow. Energiya. 1973]
3. Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1976. [Rotkop L. L., Spokoyniy Yu. E. Obespechenie teplovykh rezhimov pri konstruirovanii radioelektronnoy apparatury. Moscow. Sov. radio. 1976]
4. Ройзен Л. И., Дулькин И. Н. Тепловой расчет ребренных поверхностей / Под ред. В. Г. Фастовского. — М.: Энергия, 1977. [Roizen L. I., Dul'kin I. N. Teplovoi raschet orebrennykh poverkhnostey / Pod red. V. G. Fastovskogo. Moscow. Energiya 1977]
5. Цесарский И. Б., Мотин Э. А. Методика расчета пластинчатых радиаторов минимального веса для полупроводниковых приборов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО. — 1970. — Вып. 2. — С. 42—49. [Tsesarskii I. B., Motin E. A. // Voprosy radioelektroniki. Ser. TRTO. 1970. Iss. 2. P. 42]
6. Мотин Э. А., Цесарский И. Б. Методика расчета пластинчатых радиаторов минимального объема // Вopr. радиоэлектроники. Сер. ТРТО. — 1971. — Вып. 3. — С. 74—76. [Motin E. A. Tsesarskii I. B. // Vopr. radioelektroniki. Ser. TRTO. 1971. Iss. 3. P. 74]
7. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. — М.: ДМК Пресс, 2010. [Alyamovskii A. A. Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation. Moscow. DMK Press. 2010]
8. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. — М.: Едиториал УРСС, 2003. [Kaplun A. B., Morozov E. M., Olfer'eva M. A. ANSYS v rukakh inzhenera: Prakticheskoe rukovodstvo. Moscow. Editorial URSS, 2003]
9. Гончаров П. С., Ельцов М. Ю., Коршиков С. Б. и др. NX для конструктора-машиностроителя. — М.: ДМК Пресс, 2010. [Goncharov P. S., El'tsov M. Yu., Korshchikov S. B. i dr. NX dlya konstruktora-mashinostroitelya. Moscow. DMK Press. 2010]

НОВЫЕ КНИГИ

Мелешин В. И., Овчинников Д. А. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. — М.: Техносфера, 2011. — 576 с.

В книге изложены принципы управления транзисторными преобразователями электрической энергии при их работе в различных импульсных режимах. Приведены схематические решения и показаны особенности работы преобразователей, широко применяемых в различных системах электропитания. Показаны последние достижения в данной области техники, позволяющие управлять преобразователями с помощью как аналоговых, так и цифровых средств. Большое внимание уделено построению систем управления, использующих различные типы контроллеров и микроконтроллеров. Показано применение DSP-процессоров для различного рода преобразователей и приложений. Рассмотрено построение некоторых систем электропитания высокой надежности.

Книга будет полезна студентам, изучающим силовую электронику и принципы управления преобразователями, а также аспирантам и специалистам, изучающим и разрабатывающим устройства и системы преобразовательной техники.



К. т. н. А. Н. ГЕРШУНИ, к. т. н. А. П. НИЩИК

Украина, НТУУ “Киевский политехнический институт”
E-mail: politekhins@gmail.com

Дата поступления в редакцию
23.07 2010 г.

Оппонент д. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО
(МПП, г. Киев)

СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ИСПАРИТЕЛЬНО-КОНДЕНСАЦИОННОГО ТИПА ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРУБОК

Исследованы свойства системы охлаждения, которая является высокоэффективным теплопроводом и одновременно обеспечивает электрическую изоляцию между источником и стоком теплоты, при ее различной ориентации в пространстве.

При работе рентгеновской трубки большая часть подводимой к ней энергии выделяется в виде теплоты, вследствие чего происходит нежелательный разогрев фокусного и околофокусного пространства анода, что приводит к эрозии поверхности вольфрамовой пластинки-зеркала. Перегрев анода ускоряет “старение” (разрыхление) поверхности зеркала, а также ухудшает вакуум в трубке, что приводит к интенсивному распылению и даже подплавлению зеркала и меди анода под зеркалом, а это влияет на интенсивность рентгеновского излучения, которая может понизиться до 1/3 от нормального значения. Уровень надежности трубки, достижение стабильной мощности и обеспечение длительного ресурса определяются выбором эффективной системы охлаждения, которая должна иметь простую, надежную и экономичную конструкцию.

В рентгеновском приборостроении охлаждение тепловыделяющих элементов осуществляется, в основном, за счет конвекции воздуха или жидкости. Низкая эффективность радиаторного воздушного охлаждения обусловлена невозможностью существенного увеличения поверхности радиатора и высоким термическим сопротивлением теплопровода, соединяющего тепловыделяющий элемент с радиатором. К тому же, такие системы охлаждения характеризуются большой массой и габаритами.

Значительно более эффективно жидкостное охлаждение, но оно недостаточно надежно: на практике встречаются случаи разгерметизации системы в результате появления неплотностей и сужения каналов для протока жидкости вследствие отложения загрязнений.

Широко распространенный способ охлаждения рентгеновского излучателя естественной конвекцией жидкого диэлектрика (трансформаторного масла) [1], когда теплота передается потоком теплоносителя к холодной плите, также не лишен существенных недостатков, ограничивающих его применение: невы-

сокий уровень интенсивности теплопередачи, значительный перегрев масла при продолжительной работе, приводящий к его разложению и снижению электрической прочности, сложность устройства из-за необходимости учитывать расширение масла при нагреве и, соответственно, невысокий уровень надежности.

Сравнительный анализ существующих способов охлаждения показывает, что применение систем охлаждения испарительно-конденсационного типа, выполненных на основе тепловых труб (ТТ) или двухфазных термосифонов и обладающих не только обычными для них свойствами, но и специальными — диэлектрическими, позволит увеличить мощность рентгеновских трубок, перейти на непрерывный режим их работы, повысить надежность [2]. В таких системах возможно использование твердых компаундов вместо трансформаторного масла, что снизит массу и габариты рентгеновского излучателя.

Целью настоящей работы являлось изучение зависимости основных характеристик разработанной системы охлаждения испарительно-конденсационного типа на основе диэлектрических тепловых труб (ДТТ) от различной ее ориентации в гравитационном поле.

Конструкция диэлектрической тепловой трубы

Диэлектрическая тепловая труба для охлаждения рентгеновских трубок должна одновременно выполнять две основные функции: служить эффективным теплопроводом, соединяющим пространственно разделенные источник теплоты (анод) и сток теплоты (холодную плиту) и электрически изолировать корпус прибора от высокого электрического потенциала анода.

Первая функция присуща устройствам, построенным по испарительно-конденсационному принципу. Оптимальным решением для выполнения второй функции является создание диэлектрической развязки в транспортной зоне ТТ. Другие возможные решения (размещение слоя диэлектрического материала между зоной испарения металлической ТТ и анодом и/или между зоной конденсации и холодной плитой; последовательное соединение через диэлектрические слои нескольких ТТ; выполнение из диэлектрических материалов всех элементов ТТ) являются либо неосуществимыми, либо низкоэффективными. Конструктивные элементы зон теплообмена ТТ (т. е. зон испарения и конденсации) целесообразно выполнять металлическими, что позволит сохранить высокую теп-

ловую эффективность металлических тепловых труб, а конструктивные элементы транспортной зоны — из диэлектрических материалов. Это, совместно с использованием теплоносителя с диэлектрическими свойствами как в жидком, так и в парообразном состоянии, обеспечит необходимую электрическую прочность. Такая система охлаждения будет работоспособной при условиях надежного (с достаточной механической прочностью) и герметичного соединения составляющих элементов системы, надежной гидравлической связи прилегающих участков капиллярной структуры, совместимости разнородных материалов с теплоносителем. Важным является также обеспечение небольших массы и габаритов системы охлаждения. Анализ возможных конструктивных решений ДТТ позволил выбрать оптимальный вариант, при котором участки корпуса соединяются неразъемно, а жидкостной и паровой каналы размещаются в разных корпусах.

Материал корпуса ДТТ должен удовлетворять не только общим требованиям к материалам корпусов ТТ, но и дополнительным требованиям, а именно:

- материал корпуса транспортной зоны должен быть неполярным диэлектриком с необходимым уровнем электрической прочности;

- диэлектрический и металлический материалы корпуса должны иметь достаточно близкие температурные коэффициенты линейного расширения в диапазоне рабочих температур;

- свойства материалов должны соответствовать режимным параметрам отдельных операций технологического процесса изготовления и сборки деталей ДТТ (например, температура плавления каждого материала должна быть выше рабочей температуры отдельных стадий технологического процесса пайки диэлектрических и металлических участков корпуса).

В качестве диэлектрических материалов могут быть использованы стекло, кварц, различные виды керамики, а в качестве металлических — медь, нержавеющая сталь, никель и т. д. Диэлектрическая капиллярная структура (КС) ДТТ должна обладать высокими капиллярно-транспортными характеристиками, а уровень ее эффективной теплопроводности (теплопроводности насыщенной теплоносителем КС) не является существенным. Исходный материал для диэлектрической КС должен быть неполярным диэлектриком с соответствующим уровнем диэлектрической прочности. В качестве исходных материалов для изготовления диэлектрической КС могут быть использованы кварц, стекло, оксиды в виде порошка или волокон.

Теплоноситель ДТТ также должен быть неполярным диэлектриком с соответствующим уровнем электрической прочности как в жидком, так и в парообразном состоянии, должен быть совместим с материалами ДТТ и иметь высокий уровень чистоты для обеспечения требуемой электрической прочности. Все указанные требования существенно уменьшают возможности выбора теплоносителя, в качестве которого в низкотемпературном диапазоне могут использоваться лишь некоторые диэлектрические теплоносители, применяемые в радиоэлектронике [3], а имен-

но: фреоны Ф-11, Ф-113, жидкости ДЭФ, МД-3Ф и некоторые другие.

Разработанная с учетом вышеперечисленных требований система охлаждения рентгеновского излучателя [2, с. 184] представлена на рис. 1.

Система охлаждения представляет собой две разъемносоединяемые ДТТ специальной конструкции, каждая из которых должна обеспечивать передачу половины теплового потока, выделяемого анодом рентгеновской трубки. Каждая ДТТ сконструирована по принципу диэлектрической развязки в транспортной зоне, при этом металлические и керамические детали каждой половины системы охлаждения соединены неразъемно с помощью пайки, а для жидкостного и парового потоков предусмотрены отдельные корпуса. В качестве теплоносителя в данной системе используется фреон Ф-113. Выбор теплоносителя обусловлен тем, что по сравнению с жидкостями ДЭФ и МД-3Ф фреоны значительно превосходят их по величине характеристических параметров $N = \sigma r / \nu_{ж}$ и $\sigma / \rho_{ж}$, где σ — коэффициент поверхностного натяжения; r — скрытая теплота парообразова-

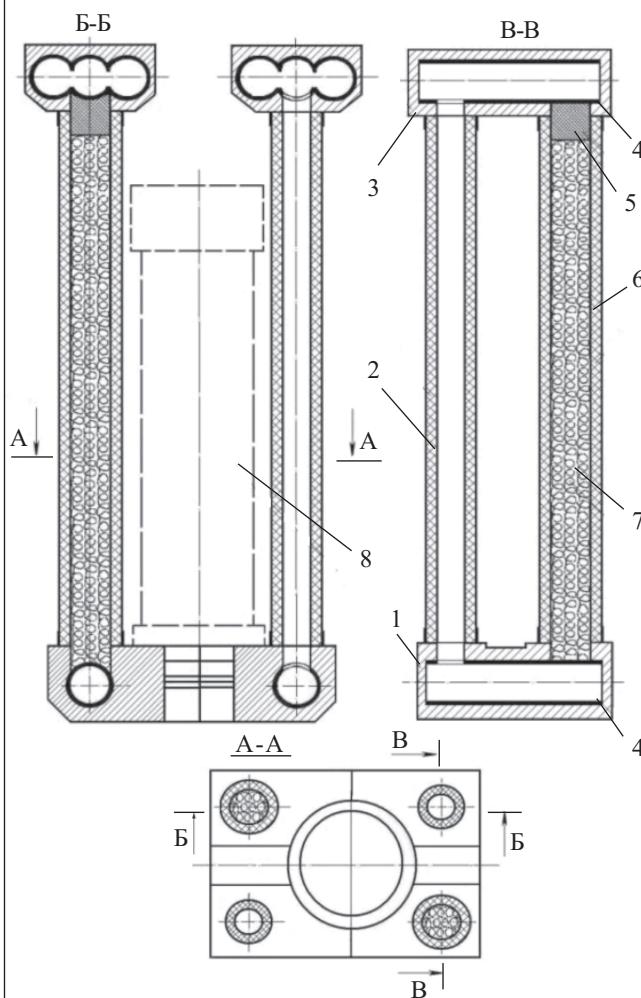


Рис. 1. Система охлаждения рентгеновской трубки: 1 — испаритель; 2 — паровая труба; 3 — конденсатор; 4 — медноволокнистая капиллярная структура; 5 — медноволокнистый цилиндр; 6 — жидкостная труба; 7 — диэлектрическая капиллярная структура; 8 — рентгеновская трубка

ния; $\nu_{\text{ж}}$ — кинематическая вязкость жидкости; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости.

Эти параметры являются основными критериями эффективности теплоносителей для тепловых труб. Кроме того, вследствие особенностей кривой упругости паров Ф-113 в заданном диапазоне рабочей температуры давление внутри ДТТ невелико (на уровне атмосферного), что облегчает обеспечение механической прочности конструкции. Важно также то, что по электрической прочности жидкая фаза Ф-113 близка к паровой.

Диэлектрические участки корпуса, выполненные из алюмооксидной радиотехнической керамики, представляют собой цилиндрические трубы длиной 170 мм с диаметром 19 мм и толщиной стенки 3,5 мм (для жидкостного потока) и диаметром 15 мм и толщиной стенки 3,0 мм (для парового потока).

Диэлектрическая капиллярная структура представляет собой войлок из отрезков кварцевой нити длиной 3 мм. Металлические детали корпуса выполнены из бескислородной меди, а соединительные винты — из латуни. Металлическая КС — медноволокнистая.

Каждая ДТТ включает в себя (см. рис. 1) металлические испаритель 1 и конденсатор 3, а также диэлектрическую транспортную зону, состоящую из паровой трубы 2 и жидкостной трубы 6. Диэлектрическая капиллярная структура 7 полностью по всему сечению и высоте заполняет внутренний объем трубы 6. Медноволокнистая капиллярная структура 4 в канале испарителя 1 имеет толщину 1,5 мм и пористость 0,68, а в канале конденсатора 3 имеет толщину 1,3 мм и пористость 0,8. Гидравлическая связь между диэлектрической КС 7 и медноволокнистой структурой 4 в канале конденсатора 3 осуществляется с помощью медноволокнистого цилиндра 5 пористостью 0,8. Медноволокнистые капиллярные струк-

туры 4 соединены со стенками испарителя и конденсатора, а цилиндр 5 — с КС 4 конденсатора методом диффузионной сварки в защитной атмосфере.

Соединение системы охлаждения с рентгеновской трубкой 8 осуществляется путем охвата анода трубки сопрягаемыми поверхностями испарителя 1 с использованием слоя высокотеплопроводной смазки для уменьшения термического сопротивления контакта. При помощи стягивающих винтов обеспечивается плотный контакт сопрягаемых поверхностей испарителя и анода рентгеновской трубки. Внешняя горизонтальная поверхность конденсатора является теплоотдающей и сопрягается с поверхностью холодной плиты через слой теплопроводной пасты.

Система охлаждения работает по принципу замкнутого испарительно-конденсационного цикла. Тепловой поток, выделяемый анодом рентгеновской трубки, воспринимается испарителем 1 (каждой половинной системы) и вызывает испарение (или кипение) теплоносителя в металлической капиллярной структуре 4 испарителя. Пар под действием градиента давления движется по каналу паровой трубы 2 в конденсатор 3, где конденсируется на поверхности металлической КС 4 конденсатора. Выделившаяся теплота конденсации переносится за счет теплопроводности через КС 4 и стенку конденсатора 3 к холодной плите. Конденсат под действием капиллярных сил возвращается к испарителю 1 по пористой системе, состоящей из гидравлически связанных капиллярных структур: медноволокнистой конденсатора, медноволокнистой цилиндра, диэлектрической, медноволокнистой испарителя.

Каждая из изготовленных ДТТ была испытана на электрическую прочность (без тепловой нагрузки) приложением постоянного электрического напряжения между испарителем (+) и конденсатором (–).

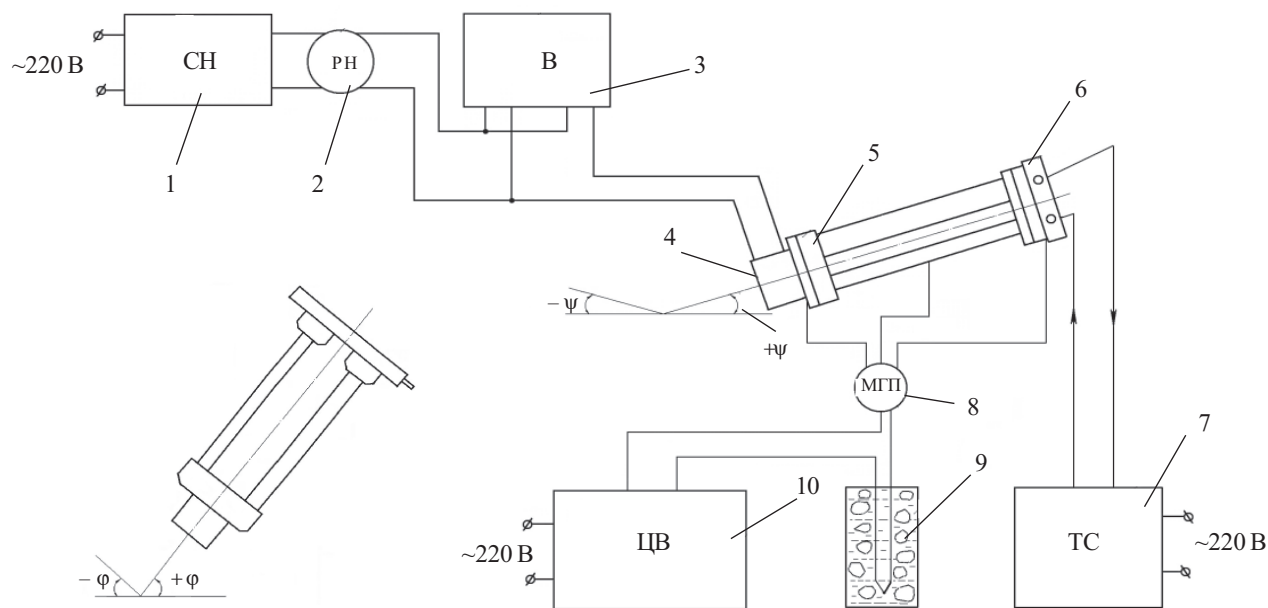


Рис. 2. Схема установки для испытания системы охлаждения:

1 — стабилизатор напряжения; 2 — регулятор напряжения; 3 — ваттметр; 4 — омический нагреватель на медном блоке; 5 — тепловые трубы; 6 — теплообменник; 7 — термостат; 8 — переключатель термопар; 9 — сосуд со льдом; 10 — цифровой вольтметр

Испытания выявили достаточно высокую электрическую прочность разработанных ДТТ на уровне более 1 кВ/мм (по отношению к длине керамических труб).

Экспериментальная установка и методика проведения измерений

Принципиальная схема установки, на которой проводились испытания системы охлаждения, приведена на рис. 2. Тепловой поток подводился к тепловым трубам 5 с помощью омического нагревателя 4, установленного на медном блоке — имитаторе анода рентгеновской трубки. На участке поверхности медного блока, не сопрягаемом с поверхностью испарителей, равномерно намотана проволока из нихрома, изолированная от материала блока слоем слюды. Изменение подводимого теплового потока осуществлялось при помощи регулятора напряжения 2, подключенного к однофазной сети (220 В, 50 Гц) через стабилизатор напряжения 1, а его измерение — при помощи ваттметра 3. Термостат 7 поддерживал температуру охлаждающей воды на заданном уровне и обеспечивал ее циркуляцию через теплообменник 6, стенка которого, прижатая к конденсаторам тепловых труб при помощи стяжек (см. рис. 3), выполняла функцию холодной плиты. Температура нагревателя, тепловых труб и холодной плиты измерялась медь-константовыми термопарами (диаметр термоэлектродов 0,1 мм) с помощью переключателя 8 и цифрового

вольтметра 10. Холодные спаи термопар размещали в сосуде с тающим льдом 9.

Термопары (см. рис. 3) закреплялись с помощью свинца в пазах, выполненных на наружных поверхностях нагревателя (термопары № 1 и 2), испарителей (№ 5 и 6) и конденсаторов (№ 11 и 12), внутренних поверхностях испарителей тепловых труб (№ 3 и 4), холодной плиты (№ 13 и 14), а также закрепляли при помощи стеклоткани на наружной поверхности керамических труб: паровых (№ 7 и 8) и жидкостных (№ 9 и 10). Термопара № 7 (на рис. 3 ее не видно) располагалась на наружной поверхности паровой трубы ТТ1 аналогично термопаре № 8 на ТТ2.

Испытания проводились при горизонтальной ориентации системы охлаждения в пространстве ($\varphi=0^\circ$, $\psi=90^\circ$; $\varphi=90^\circ$, $\psi=0^\circ$) и при углах наклона $\varphi=\pm 60^\circ$, $\psi=90^\circ$; $\varphi=90^\circ$, $\psi=\pm 60^\circ$; $\varphi=\psi=90^\circ$ (φ — угол между плоскостью разреза испарителей, проходящей через продольную ось системы охлаждения (см. рис. 1) и горизонтальной плоскостью; ψ — угол между плоскостью, проходящей через продольную ось системы охлаждения перпендикулярно плоскости разреза испарителей, и горизонтальной плоскостью. Углы φ и ψ показаны на рис. 2).

Плотное соединение нагревателя 7 (см. рис. 3) с испарителями 1 и холодной плиты 8 с конденсаторами 4 обеспечивалось с помощью винтов, шпилек и стяжек 5. Для уменьшения термического сопротивления контактов нагревателя и холодной плиты с тепловыми трубами использовали теплопроводную пасту КТП-8. Наружные поверхности нагревателя и тепловых труб (в зонах нагрева и транспорта) изолировались от окружающей среды базальтовой изоляцией.

Перепад температуры по системе охлаждения ΔT_c определяли по разности средних значений температуры нагревателя и холодной плиты $\Delta t_{\text{нп}}$:

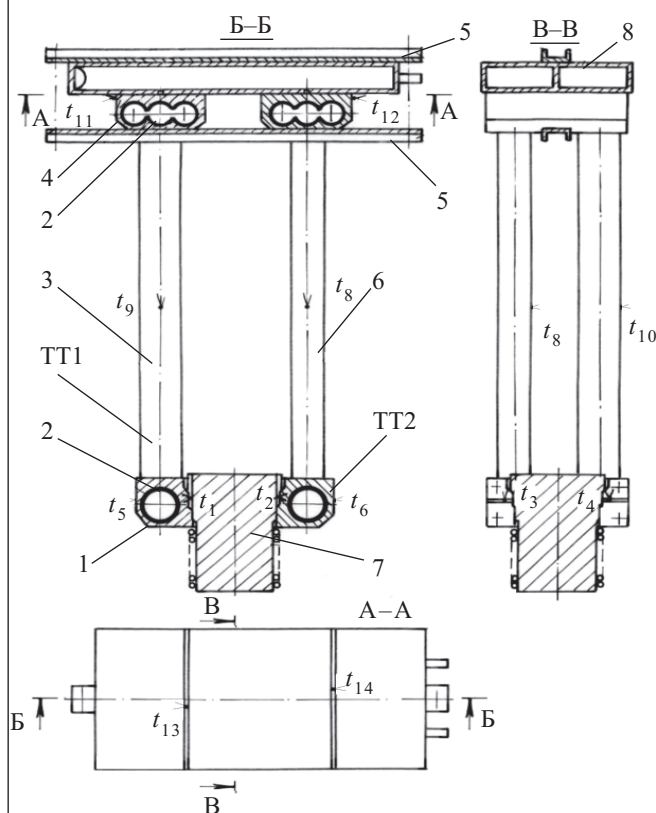


Рис. 3. Схема расположения термопар в системе охлаждения:

1 — испаритель; 2 — медноволкнистая капиллярная структура; 3 — жидкостная труба; 4 — конденсатор; 5 — стяжки; 6 — паровая труба; 7 — медный блок; 8 — теплообменник

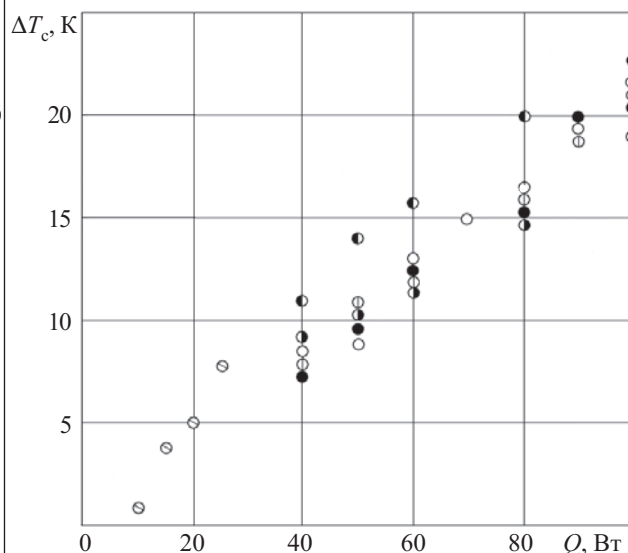


Рис. 4. Зависимость перепада температуры по системе охлаждения от передаваемого теплового потока при разной ориентации системы:

○ — $\varphi=0^\circ$, $\psi=90^\circ$ и $\varphi=90^\circ$, $\psi=0^\circ$; ◐ — $\varphi=-60^\circ$, $\psi=90^\circ$; ● — $\varphi=90^\circ$, $\psi=90^\circ$; ◐ — $\varphi=60^\circ$, $\psi=90^\circ$; ◐ — $\varphi=90^\circ$, $\psi=60^\circ$; ◐ — $\varphi=90^\circ$, $\psi=-60^\circ$

$$\Delta T_c = \Delta t_{\text{нп}} = \frac{t_1 + t_2}{2} - \frac{t_{13} + t_{14}}{2},$$

а термическое сопротивление теплопереноса от нагревателя к холодной плите определяли как отношение $\Delta t_{\text{нп}}$ к передаваемому тепловому потоку Q :

$$R = \frac{\Delta t_{\text{нп}}}{Q}.$$

Результаты исследования и их анализ

Основные результаты исследования приведены на рис. 4, где показана зависимость разности температуры (ΔT_c) между наружной поверхностью теплового имитатора анода рентгеновской трубки и поверхностью холодной плиты от передаваемого теплового потока. Опытные данные получены в таких режимах работы ДТТ, когда передаваемые тепловые потоки Q была ниже предельного значения.

Следует отметить, что при нагрузках на уровне 80—100 Вт большая часть температурного перепада (до 14 К) вызвана контактными термическими сопротивлениями: «имитатор анода рентгеновской трубки — испаритель ДТТ» и «конденсатор ДТТ — холодная плита», а разность температуры между зонами испарения и конденсации самих ДТТ составляет 2—3 К при 80 Вт и 6—8 К при 100 Вт.

Результаты экспериментов свидетельствуют о достаточно высокой эффективности теплообменных процессов в зонах испарения и конденсации, поверхности которых покрыты металловолоконистой капиллярной структурой. Термическое сопротивление системы охлаждения в исследованном диапазоне режимных параметров изменяется в пределах 0,12—0,25 К/Вт.

Как видно из рис 4, зависимость ΔT_c от Q для исследованной системы охлаждения характеризуется некоторой нелинейностью, выражающейся в уменьшении термического сопротивления с увеличением передаваемого теплового потока. Это вызвано тем, что для системы охлаждения, работающей в режиме кипения, коэффициент теплообмена в испарительных зонах ДТТ увеличивается при возрастании плотности теплового потока, а коэффициент теплообмена в зонах конденсации практически постоянен.

В связи с тем, что измерение температуры поверхностей, находящихся под высоким электрическим потенциалом, сопряжено с большими трудностями, проверка работоспособности системы охлаждения в условиях, близких к реальным, проводилась следующим образом.

Диэлектрические ТТ в сборе с тепловым имитатором помещали в емкость с трансформаторным маслом. Испарители и транспортные зоны закрывали теплоизоляцией так, что весь выделяемый тепловым имитатором тепловой поток отводился к трансформатор-

ному маслу от зон конденсации тепловых труб. Высокое напряжение (положительное относительно испарителей) подавалось на конденсаторы тепловых труб. В процессе эксперимента с помощью термопар измеряли температуру поверхностей теплового имитатора и испарителей ДТТ, а также температуру трансформаторного масла. Испытания проводились при вертикальной ориентации системы охлаждения в гравитационном поле ($\varphi=90^\circ$; $\psi=90^\circ$) для трех значений потенциала высокого напряжения: 50, 100 и 130 кВ. Уровень передаваемой мощности был постоянным и составлял 80 Вт.

В результате опытов установлено, что конструктивные параметры ДТТ обеспечивают электрическую прочность всей системы охлаждения при указанных значениях напряжения. При этом не было обнаружено заметного влияния высокого напряжения на основные теплотехнические характеристики системы охлаждения.

Для получения информации об изменении теплотехнических характеристик ДТТ при их длительной работе были проведены ресурсные испытания ДТТ в отсутствие электрического поля. Испытания проводились в течение 10000 часов. За этот период перепад температуры по длине тепловых труб остался неизменным, что свидетельствует о хорошей совместимости материалов конструкции ДТТ с теплоносителем.

Выполненные исследования подтверждают работоспособность и надежность в течение длительного времени разработанной системы охлаждения рентгеновского излучателя, сочетающей высокую эффективность процессов теплопередачи и электроизоляционные свойства при напряжениях на уровне 100 кВ.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности создания класса конструкций тепловых труб, сочетающих высокую эффективность теплопереноса и электроизоляционные свойства при напряжениях на уровне десятков и сотен киловольт.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Рентгентехника. Кн. 1 / Под ред. В. В. Ключева.— М.: Машиностроение, 1992. [Rentgenotekhnika. Kn. 1 / Pod red. V. V. Klyueva. Moscow. Mashinostroenie. 1992]
2. Семена М. Г., Гершуни А. Н., Зарипов В. К. Тепловые трубы с металловолоконистыми капиллярными структурами.— К.: Вища школа, 1984. [Semena M. G., Gershuni A. N., Zaripov V. K. Teplovyte truby s metallovoloknistymi kapillyarnymi strukturami. Kiev. Vishcha shkola, 1984]
3. Туник А. Т. Охлаждение радиоэлектронной аппаратуры жидкими диэлектриками.— М.: Сов. радио, 1973. [Tunik A. T. Okhlazhdenie radioelektronnoy apparatury zhidkimi dielektrikami. Moscow. Sov. radio. 1973]

Д. П. СОЧЕСЛАВ

Украина, Одесская государственная академия холода
E-mail: Vutys78@mail.ruДата поступления в редакцию
31.08 2010 г.Оппонент к. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ
(ЧНУ им. Ю. Федьковича, г. Черновцы)РЕЖИМ РАБОТЫ ДВУХКАСКАДНОГО
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДАЮЩЕГО
УСТРОЙСТВА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ
МИНИМАЛЬНУЮ ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ

Рассмотрена модель взаимосвязи показателей надежности и основных значимых параметров двухкаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства с последовательным электрическим соединением каскадов.

Одним из основных требований, предъявляемых при проектировании термоэлектрических устройств (ТЭУ), является обеспечение заданных значений показателей надежности. В качестве основного показателя надежности ТЭУ выбрано время безотказной работы.

При определении показателей надежности каскадных ТЭУ (КТЭУ) в условиях эксплуатации, а именно интенсивности отказов λ и вероятности безотказной работы P , полагаем:

- все термоэлементы соединены электрически последовательно, включая каскады;
- выход из строя любого термоэлемента приводит к выходу из строя модуля и устройства в целом;
- события, заключающиеся в выходе термоэлементов из строя, принимаются независимыми;
- каждый термоэлемент в каскадах работает в одном и том же токовом режиме при различных температурных условиях;
- термоэлектрические модули и КТЭУ на их основе относятся к невосстанавливаемым изделиям.

Таким образом, показатели надежности ТЭУ рассматриваются при следующих допущениях:

- отказы термоэлементов происходят внезапно;
- интенсивность отказов отдельных термоэлементов не зависит от времени;
- время наработки до отказа распределяется по экспоненциальному закону.

Анализ зависимости показателей надежности от времени по данным испытаний и эксплуатации для различных законов распределения показывает, что для описания показателей надежности КТЭУ при $P > 0,95$ оправданно применение экспоненциального закона распределения (так как отказы КТЭУ сравнительно редки и распределены во времени с почти одинаковой плотностью при длительной эксплуатации, в связи с чем можно считать их интенсивность величиной постоянной) как наиболее простого для количественной оценки показателей надежности.

При проектировании КТЭУ обычно задаются: холодопроизводительность Q_0 , т. е. суммарная тепловая нагрузка, температура теплопоглощающего спая T_0 и температура тепловыделяющего спая T . Кроме того накладываются различные ограничения (по количеству термоэлементов в каскадах, потребляемой мощности, величине рабочего тока, интенсивности отказов и т. д.), с учетом которых необходимо определить токовый режим работы охлаждающего термоэлемента.

Определим режим работы КТЭУ с последовательным электрическим соединением каскадов при условии обеспечения минимальной интенсивности отказов и максимальной вероятности безотказной работы.

Рассматриваемые КТЭУ собираются, как правило, на базе унифицированных и одинаковых ветвей термоэлементов или стандартных модулей на их основе, и поэтому для всех N каскадов должно соблюдаться условие

$$B_i I_{\max_i} = B_{i+1} I_{\max_{i+1}} = \dots = B_N I_{\max_N}, \quad i=1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где для i -го каскада:

B_i — относительный рабочий ток, $B_i = I/I_{\max_i}$;

I_{\max_i} — максимальный рабочий ток, $I_{\max_i} = \frac{e_i T_{i-1}}{R_i}$;

e_i — коэффициент термо-эдс ветви термоэлемента;

T_{i-1} — температура теплопоглощающего спая;

R_i — электрическое сопротивление ветви термоэлемента.

Общий перепад температуры на КТЭУ можно представить в виде

$$\Delta T = \sum_{i=1}^N \Delta T_i = \sum_{i=1}^N \Delta T_{\max_i} \Theta_i, \quad (2)$$

где для i -го каскада:

ΔT_{\max_i} — максимальный перепад температуры,

$$\Delta T_{\max_i} = 0,5 Z_i T_{i-1}^2;$$

Z_i — усредненный показатель термоэлектрической эффективности модуля;

Θ_i — относительный перепад температуры,

$$\Theta_i = \frac{\Delta T_i}{\Delta T_{\max_i}};$$

ΔT — рабочий перепад температуры, $\Delta T_i = T_i - T_{i-1}$.

При построении КТЭУ необходимо соблюдать условие стационарности процесса охлаждения (теплового сопряжения каскадов) — количество отводимого

го тепла от предыдущего каскада должно быть равно холодопроизводительности последующего. Воспользуемся следующими известными соотношениями.

Из условия стационарности отношение количества термоэлементов в соседних каскадах можно записать как

$$\frac{n_{i+1}}{n_i} = \frac{I_{\max i}^2 R_i}{I_{\max i+1}^2 R_{i+1}} \frac{2B_i(1 + \frac{\Delta T_{\max i}}{T_{i-q}} \Theta_i) + B_i^2 - \Theta_i}{2B_{i+1} - B_{i+1}^2 - \Theta_{i+1}}, \quad (3)$$

Холодопроизводительность КТЭУ определяется «холодным» (первым) каскадом и равна

$$Q_0 = n_1 I_{\max 1}^2 R_1 (2B_1 - B_1^2 - \Theta_1). \quad (4)$$

Мощность потребления i -го каскада КТЭУ определяется по формуле

$$W_i = 2n_i I_{\max i}^2 R_i B_i (B_i + \frac{\Delta T_{\max i}}{T_{i-1}} \Theta_i), \quad (5)$$

а холодильный коэффициент КТЭУ

$$E^N = \frac{Q_0}{\sum_{i=1}^N W_i}. \quad (6)$$

Суммарную интенсивность отказов КТЭУ можно представить в виде суммы интенсивностей отказов каждого каскада:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \lambda_i. \quad (7)$$

С учетом влияния температурных условий работы каждого каскада и тепловой нагрузки можно записать соотношения для определения относительной величины суммарной интенсивности отказов двух-каскадного ТЭУ:

$$\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_0} = \frac{n_1 B_1^2 (\Theta_1 + C_1) (B_1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \Theta_1)^2}{(1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \Theta_1)^2} K_{T_1} + \frac{n_2 B_2^2 (\Theta_2 + C_2) (B_2 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \Theta_2)^2}{(1 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \Theta_2)^2} K_{T_2}, \quad (8)$$

где λ_0 — номинальная интенсивность отказов;

C_1, C_2 — относительная тепловая нагрузка первого и второго каскада, соответственно,

$$C_1 = \frac{Q_0}{n_1 I_{\max 1}^2 R_1}, \quad C_2 = \frac{Q_0 + W_1}{n_2 I_{\max 2}^2 R_2};$$

K_{T_1}, K_{T_2} — коэффициенты значимости, учитывающие влияние пониженных температур [1, с. 67].

Для оценки вероятности безотказной работы P КТЭУ можно записать соотношение

$$P = \exp \left[- \sum_{i=1}^N \lambda_i t \right], \quad (9)$$

где t — назначенный ресурс.

Так как каждый термоэлемент в каскадах работает в одном и том же токовом режиме в различных

температурных условиях, выражение для определения оптимального относительного рабочего тока в режиме λ_{\min} можно представить в виде

$$B_1 = \eta_1 \Theta_1, \quad (10)$$

где η_1 — поправочный коэффициент токового режима первого каскада (рис. 1).

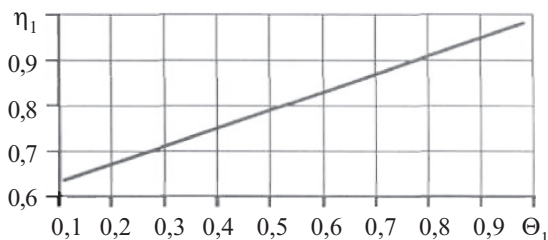


Рис. 1. Зависимость коэффициента токового режима от относительного перепада температуры в первом каскаде при $T=300$ К

Используя условие (1), после несложных преобразований получим соотношение для определения промежуточной температуры в режиме λ_{\min}

$$T_1^2 \varphi - T_0 T_1 (\varphi - 1) - T T_0 = 0, \quad (11)$$

где $\varphi = \frac{\eta_1}{\eta_2}$;

$$\beta = \frac{e_1 \sigma_1 Z_2}{e_2 \sigma_2 Z_1}.$$

Промежуточную температуру T_1 определяем методом последовательных приближений. Предварительно приняв условие равенства перепадов температуры по каскадам, определяем $e, \sigma, Z, \Delta T_{\max}, \Theta, I_{\max}$ для каждого каскада с учетом температурной зависимости параметров. Подставив полученные значения в (11), получим новое значение T_1 . Затем корректируем средние значения температуры по каскадам и вычисляем новые значения указанных величин. Практика показывает, что двух-трех приближений вполне достаточно для того, чтобы значения промежуточной температуры T_1 сходились в пределах 1%.

Результаты расчетов основных параметров и показателей надежности КТЭУ при $T=300$ К, перепадах температуры $\Delta T=60, 70, 80, 90$ К, величине тепловой нагрузки Q_0 от 0 до 1,2 Вт и $t=10^4$ ч, $\lambda_0=3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч показаны на рис. 2—5.

Анализ расчетных данных показал, что в рассматриваемом режиме λ_{\min} с ростом общего перепада температуры ΔT

— величина оптимальной промежуточной температуры T_1 уменьшается по линейной зависимости (рис. 2);

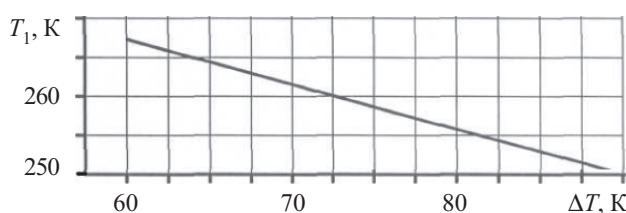


Рис. 2. Зависимость оптимальной промежуточной температуры от общего перепада температуры

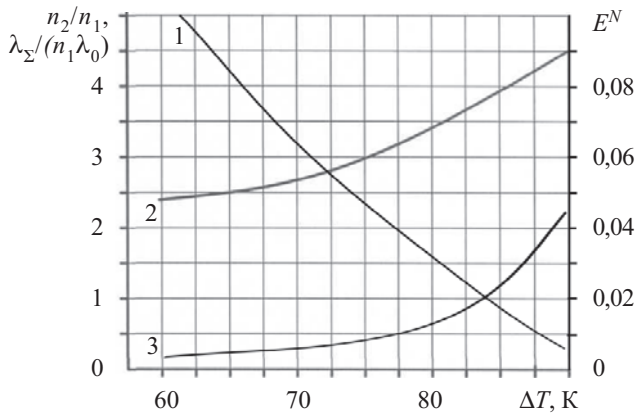


Рис. 3. Зависимость холодильного коэффициента E^N (1), отношения количества термоэлементов в смежных каскадах (2) и относительной величины суммарной интенсивности отказов (3) от общего перепада температуры

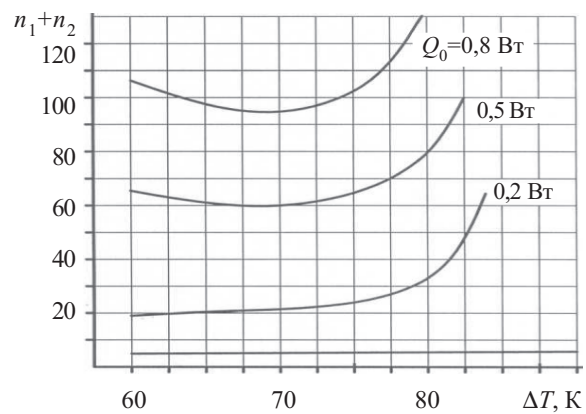


Рис. 4. Зависимость суммарного количества термоэлементов двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры для различных значений Q_0

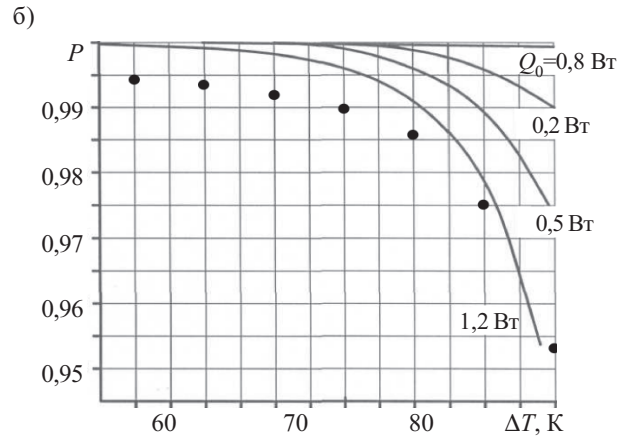
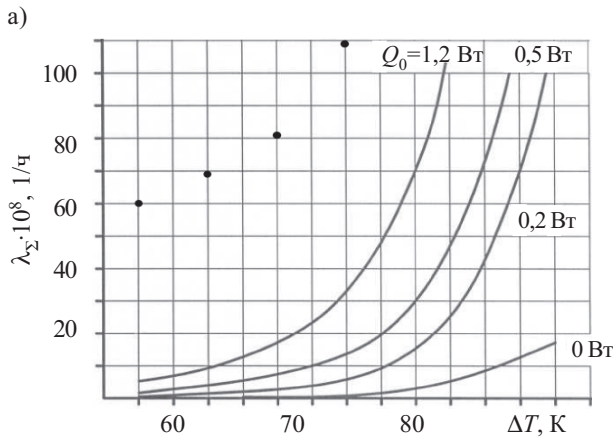


Рис. 5. Зависимость суммарной интенсивности отказов (а) и безотказной работы (б) от общего перепада температуры для различных значений Q_0

— холодильный коэффициент уменьшается (рис. 3, кривая 1);

— растет отношение числа термоэлементов в каскадах n_2/n_1 (рис. 3, кривая 2) и их суммарное количество (рис. 4);

— суммарная величина интенсивности отказов λ_Σ (рис. 5, а) и ее относительная величина $\frac{\lambda_\Sigma}{n_1\lambda_0}$ увеличиваются (рис. 3, кривая 3);

— вероятность безотказной работы P уменьшается (рис. 5, б).

При заданном перепаде температуры ΔT с ростом тепловой нагрузки суммарное количество термоэлементов увеличивается, растет интенсивность отказов, а вероятность безотказной работы уменьшается.

На рис. 5 точками обозначены данные экспериментальных исследований аналогичных конструкций КТЭУ при максимальном значении коэффициента режима $K_p = 1,0$ [1, с. 24]. Ход экспериментальных зависимостей $\lambda_\Sigma = f(\Delta T)$ и $P = f(\Delta T)$ практически идентичен теоретическим для режима $Q_{0\max}$, т. е. модель взаимосвязи показателей надежности и основных значимых параметров можно использовать для других режимов.

Наибольшее отклонение теоретической величины интенсивности отказов от экспериментальной составляет не более 10%, что определяется погрешностью, вносимой измерительными средствами контроля температурного поля, отличием конструктивных и тепловых параметров экспериментальных и теоретических аналогов КТЭУ.

Таким образом, полученные соотношения позволяют определять показатели надежности двухкаскадных ТЭУ в режиме, обеспечивающем минимальную суммарную интенсивность отказов и максимальную вероятность безотказной работы в широком диапазоне изменения перепада температуры и различной тепловой нагрузке.

Применение режима λ_{\min} позволяет построить КТЭУ повышенной надежности при приемлемых энергозатратах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Зайков В. П., Киншова Л. А., Моисеев В. Ф. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 1. Однокаскадные устройства. — Одесса: Политехперіодика, 2009. [Zaikov V. P., Kinshova L. A., Moiseev V. F. Prognostirovanie pokazatelei nadezhnosti termoelektricheskikh okhlazhdayushchikh ustroystv. Kniga 1. Odnokaskadnye ustroystva. Odessa. Politekhperіodika, 2009.]

С. В. ДУДИН, В. А. ЛИСОВСКИЙ, А. Н. ДАХОВ, В. М. ПЛЕТНЁВ

Украина, Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина
E-mail: alex.dakhov@gmail.comДата поступления в редакцию
07.09 2010 г.Оппонент к. ф.-м. н. О. А. ФЕДОРОВИЧ
(Ин-т ядерных исследований, г. Киев)

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ РЕАКТОР С АСИММЕТРИЧНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ ДЛЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Исследованы пространственное распределение параметров плазмы и однородность потока ионов, направленного на обрабатываемую поверхность в плазмохимическом реакторе. Полученные результаты могут быть использованы в технологиях производства микроэлектронных приборов.

Высокочастотный (ВЧ) емкостный газовый разряд в камерах с асимметричными электродами широко используется в различных технологических процессах для плазменного травления и модификации различных материалов, осаждения нитридных, оксидных, алмазоподобных и других тонких пленок, стерилизации медицинских инструментов и т. д. [1—3].

При конструировании плазменных технологических устройств на основе ВЧ емкостного разряда одной из ключевых задач является формирование пространственного распределения заряженных и химически активных частиц в объеме газоразрядной камеры. Наибольший интерес представляет распределение потоков частиц, направленных на обрабатываемую поверхность, а основной задачей, как правило, является достижение высокой однородности этих потоков. Решение этой задачи осложняется тем, что разрядная камера в технологических устройствах может иметь достаточно сложную геометрию, процессы передачи энергии в плазме, зарождения и ухода заряженных частиц сложны и нелинейны, а равномерный ввод энергии в плазму практически невозможен. Поэтому точный ответ на вопрос о пространственном распределении параметров заряженных частиц в конкретном устройстве может дать только экспериментальное их измерение, которое лишь констатирует сложившуюся ситуацию. Разработка же новых плазменных устройств предполагает последовательные изменения конструкции с постепенным приближением к желаемому результату. То есть эмпирический путь разработки конструкции плазменного реактора требует изготовления различных вариантов элементов реактора и может оказаться долгим, трудоемким и дорогостоящим.

Работа была выполнена при поддержке Министерства промышленной политики Украины (НИОКР № г.р. 0108U009822)

Очевидно, хорошим инструментом для разработки плазменных технологических устройств могут быть математические модели газового разряда, позволяющие изменять параметры и геометрию системы. Сложность задачи не позволяет надеяться на возможность ее аналитического решения либо установление точных функциональных закономерностей. Наиболее адекватным подходом в данном случае является построение численной двумерной компьютерной модели (технологические устройства, как правило, имеют симметрию вращения). В то же время, современный уровень развития физики газового разряда не позволяет создавать математические модели, абсолютно точно описывающие реальные устройства. Поэтому единственно возможным подходом в данном случае являются комплексные теоретические и экспериментальные исследования.

Настоящая работа посвящена исследованиям пространственного распределения параметров плазмы и однородности потока ионов, направленного на обрабатываемую поверхность в плазмохимическом реакторе на базе ВЧ емкостного разряда с асимметричными электродами.

Конструкция реактора и условия экспериментов

Исходя из результатов двумерного компьютерного моделирования плазмы внутренняя геометрия камеры была выбрана такой, чтобы обеспечить максимальную однородность параметров плазмы вблизи обрабатываемой поверхности в условиях низкого давления рабочего газа, при котором траектории ионов близки к прямолинейным, что позволяет проводить травление с высокой анизотропией.

На рис. 1 показана схема газоразрядной камеры реактора. Расстояние между электродами выбрано равным 40 мм, что примерно равно радиусу подложкодержателя. Это обеспечивает возможность работы при достаточно низком давлении рабочего газа. К тому же, при таком зазоре между электродами можно обеспечить достаточно однородную подачу технологического газа к обрабатываемой пластине и откачивание продуктов травления.

Охлаждение газоразрядной камеры и подложкодержателя — водяное. Подложкодержатель с диаметром рабочей поверхности 100 мм выполнен составным. Его обращенная в плазму верхняя часть, которая должна быть устойчива к распылению и воздей-

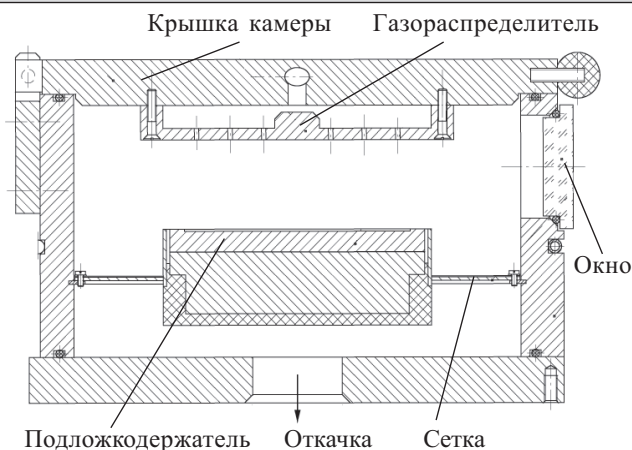


Рис. 1. Схема газоразрядной камеры

ствию химически активных радикалов, изготовлена из нержавеющей стали. Нижняя часть выполнена из алюминиевого сплава, поскольку ее основной задачей является равномерный отвод тепла и передача его трубке водяного охлаждения.

Необходимость достижения высокой однородности травления пластин требует как равномерного распределения по поверхности электрода параметров плазмы, так и равномерного напуска реактивного газа. Эта задача решается с помощью системы распределенного газонапуска — цилиндрического резервуара, расположенного непосредственно над обрабатываемой пластиной. Рабочий газ в разрядную камеру поступает через большое количество отверстий, равномерно распределенных по поверхности системы.

В этой конструкции была реализована схема с асимметричными электродами (площадь рабочей поверхности подложкодержателя примерно на порядок меньше площади поверхности газоразрядной камеры), которая позволяет получить постоянное напряжение на электроде без подключения дополнительного источника питания, а также избежать нежелательной бомбардировки стенок реактора высокоэнергетическими ионами. Такие меры снижают загрязнение обрабатываемых пластин и повышают энергетическую экономичность реактора.

К подложкодержателю через разделительный конденсатор прикладывается ВЧ-напряжение амплитудой 0—500 В, тогда как сама газоразрядная камера заземлена. Благодаря наличию разделительного конденсатора и асимметрии электродов на подложкодержателе появляется отрицательное напряжение автосмещения [3]. Измерение амплитуды ВЧ-напряжения на потенциальном электроде проводится с использованием амплитудного детектора ВЧ-напряжения с емкостным делителем. Для блокирования переменной составляющей при измерении постоянного напряжения автосмещения потенциального электрода применен RC-фильтр, который позволяет снизить амплитуду ВЧ-сигнала до уровня десятков милливольт.

Измерение плотности потока ионов из плазмы проводится с помощью одиночного плоского зонда площадью 1 см², расположенного на боковой стенке га-

зоразрядной камеры. На зонд подается постоянное напряжение –25 В относительно камеры, что обеспечивает работу на участке ионного насыщения зондовой характеристики. Непосредственное измерение плотности потока ионов, направленного на обрабатываемую поверхность, обычно затруднено, поскольку подложкодержатель находится под высоким ВЧ- и постоянным напряжением. Однако величина и радиальное распределение плотности ионного потока представляет значительный интерес при отработке технологических процессов. Поэтому была проведена серия экспериментов, в которых ВЧ-напряжение подавалось на корпус газоразрядной камеры, а для измерения радиального распределения плотности ионного тока на заземленном подложкодержателе применяли ряд радиально расположенных плоских зондов размером 5×5 мм, ионный ток насыщения с которых измерялся при помощи многоканального аналого-цифрового преобразователя PC-1710HG производства компании Advantech. Для предотвращения собирания электронов и в этом случае зонды находились под потенциалом –25 В относительно подложкодержателя.

Откачка воздуха из реактора осуществлялась при помощи турбомолекулярного насоса 01АБ-1500. Поток рабочего газа в реактор регулировался при помощи контроллера потока массы SEC-4400 производства компании HORIBA STEC с максимальным газопотоком 200 станд. см³/мин. Измерение давления газа в диапазоне 10^{–4}—10⁰ Торр проводилось при помощи емкостного манометрического преобразователя Tylan General CDL 0106, подключенного непосредственно к реактору через диагностическое окно.

Результаты математического моделирования плазмы в реакторе

Достижение высокой однородности концентрации заряженных и химически активных частиц в плазме и их потоков, направленных на обрабатываемую поверхность, является одной из целей при разработке и оптимизации плазменных технологических устройств. Для лучшего понимания процессов, происходящих в асимметричном ВЧ-разряде, было выполнено моделирование с помощью кода OOPIC Pro code (Tech-X Corporation, http://www.txcorp.com/products/OOPIC_Pro/) для зазора между плоскими электродами $L = 4$ см, при различных значениях приложенного ВЧ-напряжения и давления аргона. OOPIC Pro является двумерным кодом, работающим на основе метода «частица в ячейке» (particle-in-cell, PIC). Он создан для моделирования процессов в плазме, пучках заряженных частиц, с разнообразными граничными условиями. OOPIC Pro использует алгоритм Монте-Карло для моделирования столкновения заряженных частиц с молекулами газа, включая такие эффекты, как ион-нейтральная перезарядка, упругое рассеяние электронов, неупругие столкновения электронов с молекулами газа, приводящие к их возбуждению и ионизации газа. Временной шаг при моделировании был выбран равным $4 \cdot 10^{-10}$, а температура нейтрального газа 0,04 эВ. Начальная однородная концентрация электронов и положительных ионов была

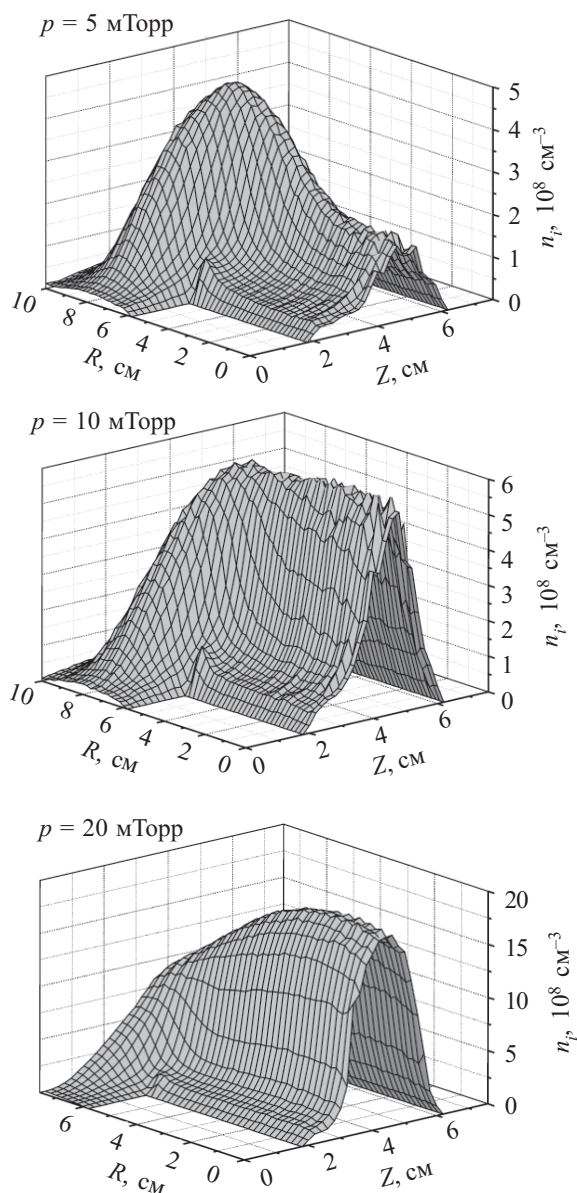


Рис. 2. Пространственное распределение плотности плазмы в объеме реактора, полученное для различных значений давления аргона при ВЧ-напряжении на электроде 200 В

равна 10^8 см^{-3} . Учитывалась также вторичная ион-электронная эмиссия с поверхности электродов, при этом коэффициент эмиссии принимался равным 0,1.

На рис. 2, где представлены результаты численного моделирования, видно, что при высоком давлении максимум плотности плазмы лежит на оси разряда, тогда как при низком — смещается на периферию. Для плазменных технологических процессах, требующих повышенной однородности распределения параметров плазмы по площади электродов, оптимальное давление p аргона составляет около 10 мТорр.

Экспериментальное исследование условий зажигания и поддержания асимметричного ВЧ-разряда

Для оптимизации плазменных технологических процессов необходимо знать условия пробоя газа в разрядном устройстве (кривую зажигания), область

существования разряда, ограниченную кривой погасания, а также режимы горения разряда. Поэтому исследование характеристик асимметричного высокочастотного емкостного разряда представляет значительный интерес.

На рис. 3 представлены кривые зажигания U_{br} и погасания U_{ext} измеренные в исследуемой камере для аргона, фреона и кислорода. Кривая зажигания симметричного ВЧ-разряда на левой ветви обычно имеет область неоднозначной зависимости ВЧ пробойного напряжения от давления газа. Такая неоднозначность позволяет поджечь ВЧ-разряд не только при повышении, но и при понижении ВЧ-напряжения при фиксированном давлении газа слева от минимума ВЧ-кривой зажигания [4—7]. Для случая когда зазор между плоскими электродами достаточно большой кривая

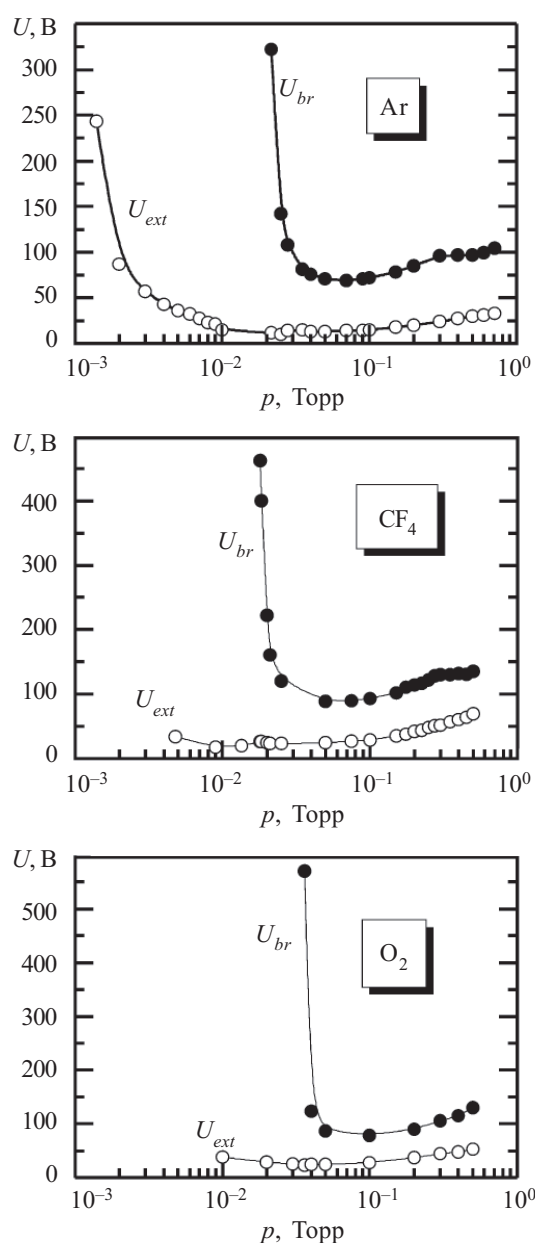


Рис. 3. Кривые зажигания U_{br} и погасания U_{ext} разряда в исследуемой камере в различных газах

зажигания ВЧ-разряда представляет собой повернутую на 45° относительно оси параболу, у которой на верхней и нижней ветвях ВЧ пробойное напряжение возрастает с повышением давления газа. Эти ветви сходятся в точке поворота, в которой амплитуда смещения электронов в ВЧ электрическом поле равна половине расстояния между электродами [8, 9]. Такое поведение кривой зажигания для плоских параллельных электродов, полностью перекрывающих поперечное сечение разрядной трубки, связано с повышенными потерями электронов в условиях, соответствующих верхней ветви кривой зажигания, из-за ухода электронов на электроды и стенки трубки вследствие дрейфа и диффузии.

В асимметричной камере, как видно из рис. 3, верхняя ветвь и, соответственно, область неоднозначности отсутствуют. Левая ветвь кривой зажигания представляет собой практически вертикальную линию, т. е. зажигание разряда возможно только при достаточно высоком давлении (например, для аргона при $p > 0,02$ Торр). Отсутствие стенки трубки, ограничивающей зазор между плоскими электродами, а также наличие заземленных стенок разрядной камеры большего диаметра приводит к снижению потерь заряженных частиц, а также к возможности зажигания ВЧ-разряда не только между плоскими электродами, но и в области вне этого зазора.

Из трех исследованных газов наиболее высокое пороговое давление газа, необходимое для зажигания ВЧ-разряда в асимметричной камере, наблюдается для кислорода. Это связано, по-видимому, с процессом «прилипания» свободных электронов к молекулам кислорода, что затрудняет пробой газа.

Исследуемая разрядная камера подобна широко используемой зарубежной камере “GEC cell” (Gaseous Electronics Conference reference cell) [10]. В связи с этим полученные результаты могут быть полезны при разработке и оптимизации широкого класса плазменных технологических процессов для этого типа разрядных камер.

Из рис. 3 следует также, что в исследуемой камере возможно поддержание горящего разряда при гораздо более низком давлении ($p \geq 1$ мТорр), при котором положительные ионы, образовавшиеся в объеме плазмы, редко сталкиваются с молекулами газа и бомбардируют электроды и полупроводниковые пластины практически по нормали к их поверхности. Это позволяет проводить в данной камере процессы анизотропного травления полупроводниковых материалов.

В случае симметричного разряда он может гореть только в зазоре между плоскими электродами, при этом значительная часть заряженных частиц теряется не только на поверхности электродов, но и на стенках диэлектрической трубки, ограничивающей разряд. И чем ниже давление газа, тем выше эти потери.

В случае асимметричного незамкнутого разряда возможно его поддержание не только в зазоре между плоскими электродами, но и вне этого зазора, на периферии камеры. В данной области разряда потери электронов вследствие дрейфа и диффузии на стенки камеры меньше, чем в зазоре между электродами, что позволяет поддерживать горение разряда при бо-

лее низком давлении газа и существенно влияет на однородность плазмы.

Режимы горения асимметричного ВЧ-разряда

Для исследования режимов горения асимметричного ВЧ-разряда была измерена плотность тока положительных ионов, направленного на зонд, расположенный на заземленной стенке камеры, для различного давления газа. Из рис. 4 видно, что при низком давлении газа горение разряда возможно только при достаточно высоком ВЧ-напряжении ($U_{rf} > 150$ В), в то время как при более высоком давлении возможно поддержание разряда при $U_{rf} = 15$ В (что согласуется с результатами на рис. 3). Кривая для давления 4 мТорр описывает поведение плотности j_p тока на пристеночный зонд с ростом ВЧ-напряжения. Как показывают наблюдения, при низком давлении аргона сначала разряд имеет форму кольца, расположенного вне зазора между плоскими электродами. При значениях $U_{rf} < 120$ В плотность тока возрастает с повышением ВЧ-напряжения. Затем наблюдается небольшое уменьшение плотности тока, когда разряд заполняет и зазор между электродами. Дальнейший рост ВЧ-напряжения сопровождается монотонным повышением плотности тока на пристеночный зонд. При более высоком давлении газа разряд во всем диапазоне ВЧ-напряжений заполняет всю ка-

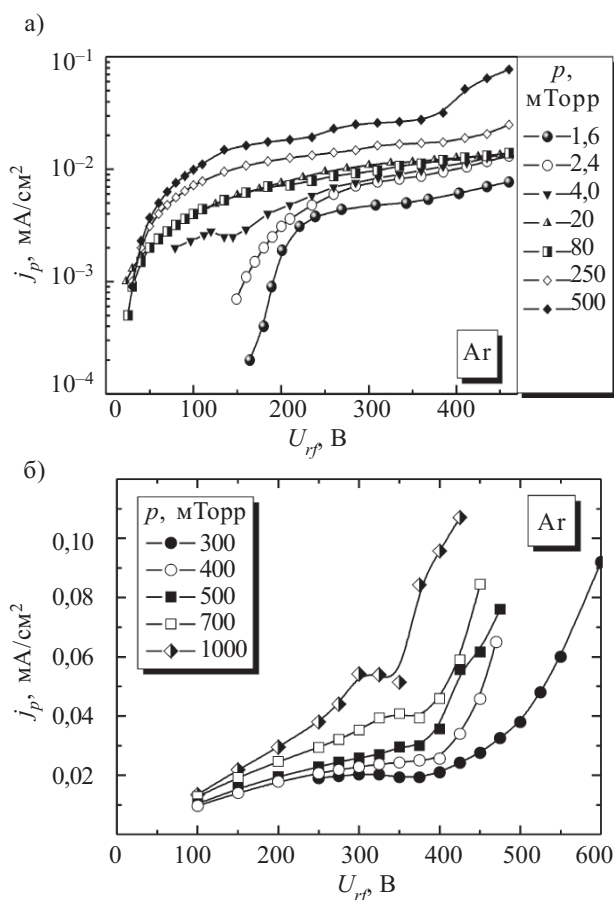


Рис. 4. Зависимость плотности тока ионов на пристеночный зонд от ВЧ-напряжения при низких (а) и высоких (б) значениях давления аргона

меру, наблюдается монотонное повышение плотности ионного тока с ростом ВЧ-напряжения.

На кривых, представленных на рис. 4, б, при больших значениях ВЧ-напряжения появляется характерный излом, соответствующий переходу ВЧ-разряда из α -режима (слаботочного) в γ -режим (сильноточный). В α -режиме электроны приобретают энергию, достаточную для ионизации атомов газа в ВЧ-поле в квазинейтральной плазме, при этом эмиссия электронов с поверхностей электродов в поддержании разряда большой роли не играет. Проводимость приэлектродных слоев мала, а ток между плазмой и электродами замыкается, в основном, током смещения. Кроме того, в α -режиме электроны заполняют приэлектродный слой в течение анодной фазы. В катодной фазе движущаяся граница расширяющегося слоя выталкивает эти электроны обратно в плазму, при этом они могут приобретать энергию благодаря повышенному электрическому полю в слое. Скорость ионизации газа электронами, вытесненными расширяющейся границей слоя, может значительно превышать скорость ионизации электронами, получившими энергию от ВЧ электрического поля в плазменном объеме.

В γ -режиме в приэлектродных слоях развиваются электронные лавины, ионизация газа электронным ударом происходит, в основном, вблизи границы «приэлектродный слой — квазинейтральная плазма», при этом эмиссия электронов с поверхности электродов существенно увеличивает количество электронов и влияет на поддержание разряда. Приэлектродные слои в γ -режиме обладают значительной проводимостью и по характеристикам подобны катодному слою тлеющего разряда постоянного тока. Известно [11—20], что ВЧ-разряд при среднем давлении газа переходит из α - в γ -режим скачкообразно (что видно на рис. 4, б на кривой для 1000 мТорр), при этом значительно возрастают плотность плазмы в разрядном объеме и амплитуда ВЧ-тока. При более низком давлении ВЧ-разряд переходит из одного режима в другой плавно, без скачков.

Из рис. 4 следует также, что плотность тока на пристеночный зонд остается практически неизменной при изменении давления газа в диапазоне от единиц до примерно 100 мТорр. Более подробно этот эффект виден на рис. 5. По-видимому, в этом диапазоне давления газа более плотная плазма концентрируется в зазоре между плоскими электродами, а вне этого зазора скорость ионизации газа электронами снижается. Но с ростом давления газа снижается скорость диффузионного ухода заряженных частиц на стенки камеры вследствие амбиполярной диффузии. По-видимому, в определенном диапазоне давления газа скорость ионизации близка к скорости диффузионного ухода, что и приводит к постоянству плотности тока ионов на пристеночный зонд с изменением давления. С повышением давления газа выше 100 мТорр в зазоре между электродами рождается все больше заряженных частиц, плотность плазмы возрастает во всем объеме разрядной камеры, увеличивается и поток ионов на стенки камеры. Особенно ярко этот эффект выражен при достаточно высоком ВЧ-напряжении, когда разряд горит в сильноточном режиме.

Важной характеристикой асимметричной разрядной камеры является постоянное напряжение автосмещения, которое возникает из-за различия потоков электронов и ионов на электроды различной площади. В случае когда ВЧ-электрод имеет меньшую площадь, чем все заземленные поверхности камеры (как в нашем случае), между электродами возникает постоянное напряжение, при этом меньший по площади электрод приобретает отрицательный потенциал [12]. Эта особенность асимметричного ВЧ емкостного разряда позволяет значительно увеличить поток положительных ионов на ВЧ-электрод и расположенные на нем обрабатываемые пластины, что повышает скорость ионно-плазменного травления. Из рис. 6 видно, что напряжение автосмещения увеличивается практически линейно с ростом ВЧ-напряжения. Некоторые особенности процессов, наблюдаемые на этих кривых (например, для давления 500 мТорр и

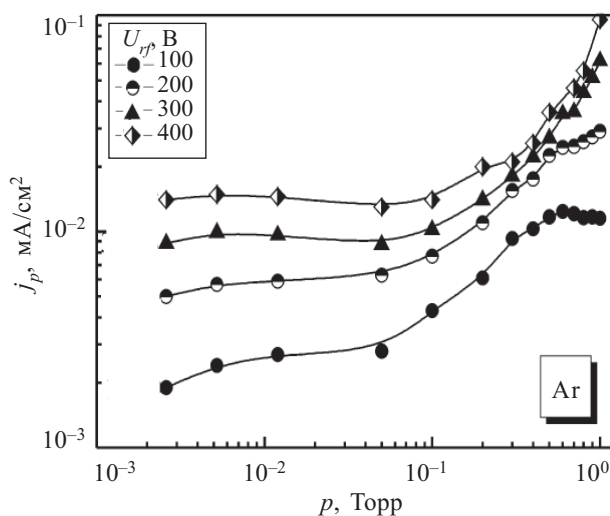


Рис. 5. Зависимость плотности тока ионов на пристеночный зонд от давления аргона при различных значениях приложенного ВЧ-напряжения

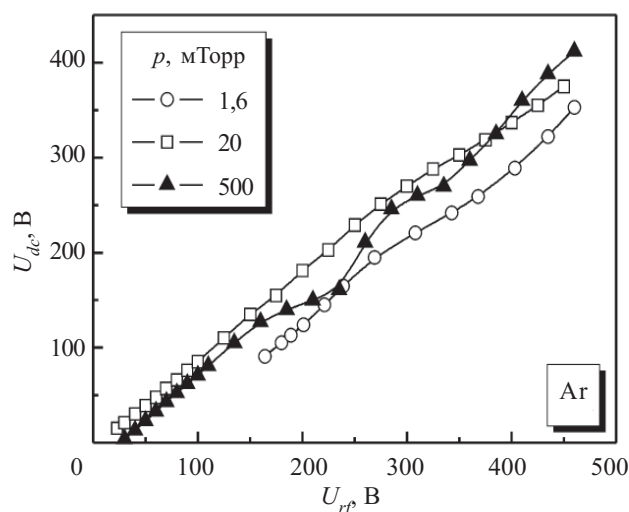


Рис. 6. Зависимость постоянного напряжения автосмещения U_{dc} от ВЧ-напряжения при различном давлении аргона

ВЧ-напряжения 240 В) можно объяснить переходом ВЧ-разряда из слаботочного в сильноточный режим и сопровождающей его перестройкой разрядной структуры.

Радиальное распределение плотности потока ионов из плазмы ВЧ-разряда на обрабатываемую поверхность

Следует отметить, что плотность j тока ионов из плазмы на обрабатываемую поверхность и ее радиальное распределение относятся к важнейшим характеристикам плазмохимического реактора с прикладной точки зрения, а достижение высокой плотности тока при условии максимальной однородности является одной из основных задач при конструировании плазменных технологических устройств. В связи с этим, при изучении физических и технологических параметров описанного реактора особое внимание было уделено именно изучению закономерностей формирования радиальных профилей распределения j . При этом измерения проводились с использованием в качестве рабочего газа как аргона, наиболее удобного для экспериментальных исследований и моделирования, так и молекулярных химически активных газов, широко используемых в технологии.

Как видно из рис. 7, а, при давлении аргона 55 мТорр и ВЧ-напряжении на электроде в диапазоне 25—225 В характер радиального распределения плотности тока ионов практически не меняется, неоднородность плотности тока по радиусу составляет порядка $\pm 5\%$, а абсолютная величина j монотонно растет с ростом ВЧ-напряжения. На этом же рисунке

пунктирной линией показаны также результаты расчета, полученные для значения ВЧ-напряжения 200 В с помощью кода ООРИС, которые, как видно, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Наблюдаемый небольшой максимум вблизи центра электрода можно объяснить небольшим градиентом давления газа, возникающим вследствие радиального характера движения потока газа при откачке.

Подобный характер поведения радиального профиля распределения j при изменении давления виден на рис. 7, б. В диапазоне давлений 50—500 мТорр форма профиля остается качественно неизменной, а величина j монотонно растет с ростом давления аргона. Если же в качестве рабочего газа используется фреон (рис. 7, в, г), радиальный профиль j при изменении давления изменяется иначе. При низком давлении, как и для аргона, плотность тока практически постоянна по радиусу. При более высоком давлении разряд становится торообразным, в связи с чем профиль распределения плотности тока становится сильно неоднородным. Абсолютная величина плотности тока на оси разряда изменяется немонотонно с ростом давления фреона.

Появление неоднородности ионного потока на обрабатываемую поверхность при высоком давлении газа можно объяснить тем, что с ростом давления область интенсивного свечения плазмы и интенсивной ионизации смещается к краю подложкодержателя, где присутствует сильное ВЧ электрическое поле в зазоре между подложкодержателем и заземленным экраном. Неоднородность ионизации определяется длиной релаксации энергии, поглощенной электро-

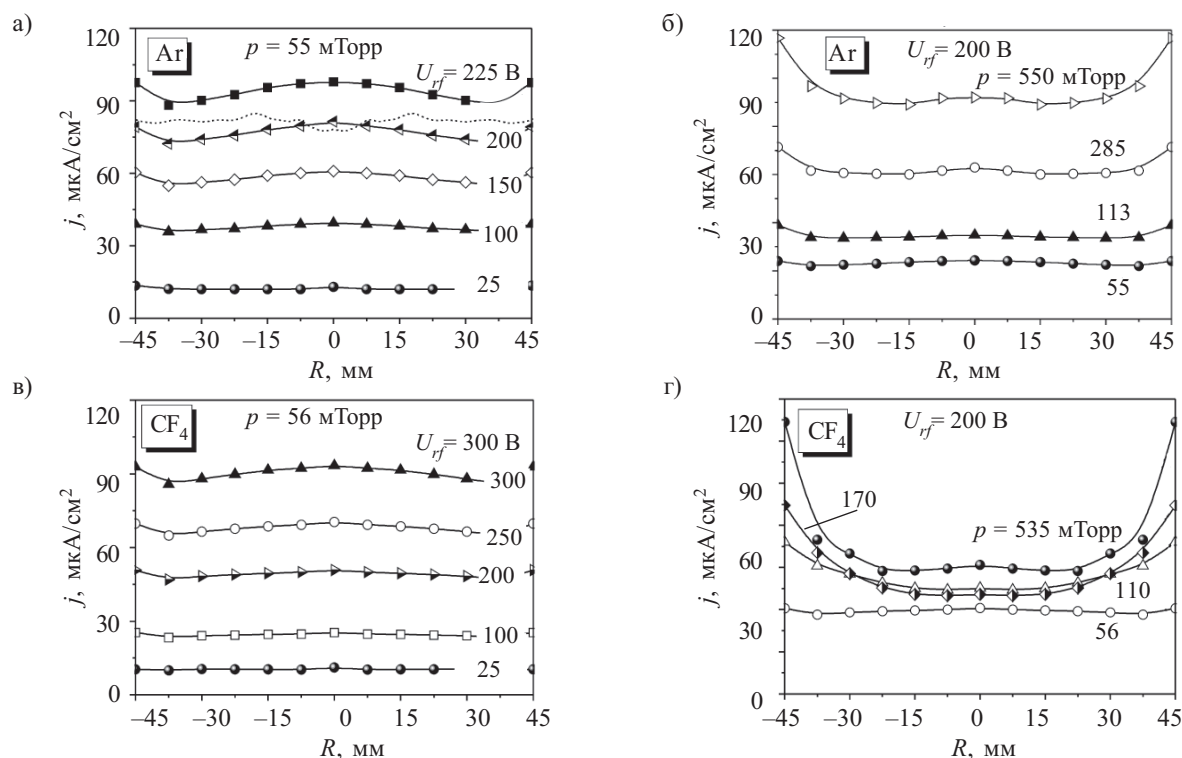


Рис. 7. Типичные радиальные профили плотности j ионного тока на поверхность подложкодержателя, полученные при различных значениях ВЧ-напряжения на электроде (а, в) и разном давлении (б, г) рабочего газа в камере: а, б — аргона; в, г — фреона

нами в области сильного ВЧ-поля. Известно, что длина релаксации энергии различна для молекулярных и атомарных газов [20]. Так, например, при использовании CF_4 энергия, поглощаемая плазмой от электрического поля, расходуется, в основном, на возбуждение молекулярных колебаний [3] вблизи области сильного поля, а в центре разряда количество электронов с энергией, достаточной для ионизации, сокращается. При использовании аргона электроны с энергией до 11,5 эВ испытывают только упругие столкновения с атомами, в которых потери энергии электронов очень малы. Следовательно, длина релаксации энергии электронов в аргоне больше, чем в молекулярном газе CF_4 , что приводит к уменьшению неоднородности плазмы.

Выводы

Таким образом, в результате математического моделирования газового разряда и исследования пространственного распределения параметров плазмы предложена конструкция газоразрядной камеры плазмохимического реактора, позволяющая при достаточно низком давлении рабочего газа проводить анизотропное травление обрабатываемой поверхности с повышенной скоростью.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Roth J. R., Industrial plasma engineering. Vol. 2. Applications to Nonthermal Plasma Processing.— Bristol, Philadelphia: Institute of physics, 2001.
2. Sugawara M. Plasma etching: fundamentals and applications.— Oxford: Oxford University Press, 1998.
3. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. Principles of plasma discharges and materials processing.— Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
4. Левитский С. М. Исследование потенциала зажигания высокочастотного разряда в газе в переходной области частот и давлений // Журнал технической физики.— 1957.— Т. 2, № 5.— С. 970—977. [Levitskii S. M. // Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 1957. Vol. 2, N 5. P. 970]
5. Кропотов Н. Ю., Лисовский В. А., Егоренков В. Д. и др. Особенности пробоя газа низкого давления в высокочастотном однородном поле // Письма в ЖТФ.— 1988.— Т. 14, № 4.— С. 359—363. [Kropotov N. Yu., Lisovskii V. A., Egorenkov V. D. i dr. // Pis'ma v ZhTF. 1988. Vol. 14, N 4. P. 359]
6. Lisovskiy V. A., Yegorenkov V. D. RF breakdown of low-pressure gas and a novel method for electron drift velocity determination in gases // J. Phys. D: Appl. Phys.— 1998.— Vol. 31, N 23.— P. 3349—3357.
7. Lisovskiy V. A., Booth J.-P., Landry K. et al. Similarity law for RF breakdown // Europhysics Letters.— 2008.— Vol. 82, N 1.— P. 15001 (1—5).
7. Lisovskiy V. A., Booth J.-P., Landry K. et al. Similarity law for RF breakdown // Europhysics Letters.— 2008.— Vol. 82, N 1.— P. 15001 (1—5).
8. Lisovskiy V. A., Booth J.-P., Landry K. et al. Electron drift velocity in argon, nitrogen, hydrogen, oxygen and ammonia in strong electric fields determined from RF breakdown curves // J. Phys. D: Appl. Phys.— 2006.— Vol. 39, N 4.— P. 660—665.
9. Lisovskiy V. A., Booth J.-P., Landry K. et al. The effect of discharge chamber geometry on the ignition of low-pressure RF capacitive discharges // Physics of Plasmas.— 2005.— Vol. 12, N 9.— P. 093505 (1—8).
10. Olthoff J. K., Greenberg K. E. The Gaseous Electronics Conference RF Reference cell — an introduction // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.— 1995.— Vol. 100, N 4.— P. 327—340.
11. Кропотов Н. Ю., Лисовский В. А., Егоренков В. Д. и др. Особенности вольт-амперных характеристик слаботочной формы высокочастотного разряда Е-типа // Письма в ЖТФ.— 1989.— Т. 15, № 21.— С. 17—21. [Kropotov N. Yu., Lisovskii V. A., Egorenkov V. D. i dr. // Pis'ma v ZhTF. 1989. Vol. 15, N 21. P. 17]
12. Райзер Ю. П., Шнейдер М. Н., Яценко Н. А. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения.— М.: Изд-во МФТИ «Наука-Физматлит», 1995. [Raizer Yu. P., Shneider M. N., Yatsenko N. A. Vysokochastotnyi emkostnyi razryad: Fizika. Tekhnika eksperimenta. Prilozheniya. Moscow. Izd-vo MFTI «Nauka-Fizmatlit». 1995]
13. Яценко Н. А. Связь высокого постоянного потенциала плазмы с режимом горения высокочастотного емкостного разряда среднего давления // Журнал технической физики.— 1981.— Т. 51, № 6.— С. 1195—1204. [Yatsenko N. A. // Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 1981. Vol. 51, N 6. P. 1195]
14. Belenguer Ph., Boeuf J. P. Transition between different regimes of RF glow discharges // Phys. Rev. A.— 1990.— Vol. 41, N 8.— P. 4447—4459.
15. Godyak V. A., Kanneh A. S. Ion bombardment secondary electron maintenance of steady RF discharge // IEEE Trans. Plasma Sci.— 1986.— Vol. PS-14, N 2.— P. 112—123.
16. Райзер Ю. П., Шнейдер М. Н. Структура приэлектродных слоев высокочастотного разряда и переход между двумя его формами // Физика плазмы.— 1987.— Т. 13, № 4.— С. 471—479. [Raizer Yu. P., Shneider M. N. // Fizika plazmy. 1987. Vol. 13, N 4. P. 471]
17. Godyak V. A., Piejak R. B., Alexandrovich B. M. Electrical characteristics of parallel-plate RF discharges in argon // IEEE Trans. Plasma Sci.— 1991.— Vol. 19, N 4.— P. 660—676.
18. Vidaud P., Durrani S. M. A., Hall D. K. Alpha and gamma RF capacitive discharges in N_2 at intermediate pressures // J. Phys. D: Appl. Phys.— 1988.— Vol. 21, N 1.— P. 57—66.
19. Lisovskiy V. A., Booth J.-P., Yegorenkov V. D. et al. Modes and the alpha-gamma transition in RF capacitive discharges in N_2O at different RF frequencies // Physics of Plasmas.— 2006.— Vol. 13, N 10.— P. 103505.
20. Райзер Ю. П. Физика газового разряда.— М.: Наука, 1987. [Raizer Yu. P. Moscow: Nauka. 1987]

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

8-й Беларусско-Российский Семинар

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ И СИСТЕМЫ НА ИХ ОСНОВЕ

г. Минск, 17—20 мая 2011

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси

Направления работы семинара:

- Лазерные диоды
- Лазеры с электронным и оптическим возбуждением
 - Источники и приемники излучения
- Полупроводниковые материалы и гетероструктуры
 - Оптоэлектронные устройства

<http://www.semiconductor-lasers-and-systems.by/ru>

К. т. н. С. Б. АЛЕКСАНДРОВ, К. М. КРУПАЛЬНИК,
Н. А. КОРНИЛОВ, Т. А. КОНДРАТЬЕВА

Россия, г. Санкт-Петербург, ЗАО «Научное и технологическое оборудование»
E-mail: sales@semiteq.ru

Дата поступления в редакцию
06.10 2010 г.

Оппонент к. т. н. В. И. БОСЫЙ
(НПП «Сатурн», г. Киев)

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ A_3B_5

Рассмотрены принципы построения технологических модулей. Показаны значения контактного сопротивления пленок, полученных с помощью установок электронно-лучевого напыления серии STE EB и установок быстрого термического отжига серии STE RTA.

Современные полупроводниковые приборы на основе гетероструктур A_3B_5 являются перспективной элементной базой микроэлектроники. В России создание на их основе транзисторов, СВЧ интегральных схем и т. п. сейчас находится на стадии завершающихся опытно-конструкторских работ. За последние десять лет был решен ряд сложных технологических задач, в том числе связанных с этапами постростового цикла планарных операций. Однако все еще существуют сложности с реализацией таких важнейших операций, как формирование омических контактов к приборам на основе гетероструктур A_3B_5 .

Технологический процесс формирования омического контакта состоит из двух основных этапов: создание непосредственно контактной металлизации и ее дальнейшая термическая обработка. Полученный контакт должен иметь как можно более высокую электропроводность и теплопроводность, вносить как можно меньшие механические напряжения, иметь хорошую адгезию к поверхности эпитаксиальной структуры, низкую шероховатость, быть технологичным и воспроизводимым.

Формирование контактной металлизации

Самым современным методом формирования контактной металлизации является электронно-лучевое напыление. Такая технология предполагает низкий уровень предоперационного давления — не более $1 \cdot 10^{-7}$ Па и позволяет осаждать сверхчистые металлические покрытия в высоком и сверхвысоком вакууме, что исключает влияние фона установки на ход технологического процесса и его результаты для приборов на основе широкозонных и слаболегированных полупроводников [1].

На чистоту осажденного покрытия непосредственно влияет процесс загрузки образцов в технологический модуль, а также процесс предварительной подготовки образца. Так, например, если проводить очистку образца ионным пучком, то это приведет к

распылению загрязнений и оксидов с его поверхности и к конденсации удаляемых продуктов на внутренней поверхности камеры напыления и на нагреваемых узлах испарителя (на мишени). В процессе напыления слоя металла эти загрязнения встроются в поток вещества и, как следствие, в состав пленки.

Для устранения влияния перечисленных факторов на процесс осаждения пленки металлизации была предложена двухкамерная система электронно-лучевого напыления. Первая камера (шлюз) по сути является камерой очистки и подготовки образцов, в которой при необходимости может быть установлена ионная пушка для очистки образцов. Загрузка образцов в камеру напыления происходит через шлюзовую затвор, что полностью исключает загрязнение камеры до начала процесса напыления, во время загрузки и очистки образца, а также после напыления, при последующей перезагрузке. В камере напыления также может быть установлено дополнительное аналитическое оборудование.

Этот принцип разделения камеры на две лег в основу создания выпускаемых компанией ЗАО «НТО» установок электронно-лучевого напыления серии STE EB. Наиболее совершенной из них является двухкамерная установка STE EB 71 (рис. 1), позволяющая располагать ионную пушку в камере подготовки. Конструкция камеры напыления обеспечивает уровень предоперационного давления до 10^{-9} Па. Установка снабжена электронно-лучевым испарителем мощностью 6 кВт и варьлируемым набором ячеек (до 7) объемом от 7 до 15 см³. Расстояние между испарителем и

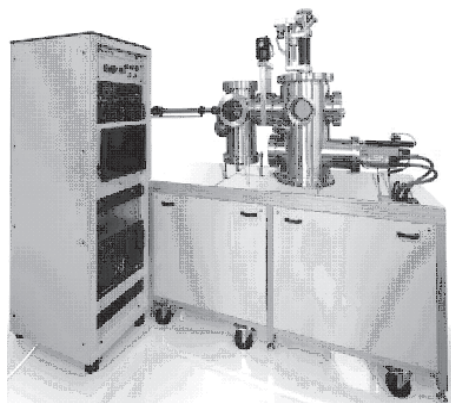


Рис. 1. Установка электронно-лучевого напыления STE EB 71

обрабатываемыми образцами изменяется в диапазоне 200—400 мм. Можно обрабатывать образцы диаметром до 150 мм или несколько образцов меньших диаметров на плоском или сферическом держателе с возможностью его прогрева и вращения в процессе осаждения. Загрузка и выгрузка образцов автоматизирована.

Термическая обработка

Термическая обработка пленки контактной металлизации после ее осаждения определяет такие ключевые параметры контакта как морфология и омическое сопротивление. При этом обработка образцов на основе гетероструктур A_3B_5 , имеющих в качестве подложек материалы с неоднородным поглощением оптического излучения по поверхности, такие как карбид кремния, сапфир и др., сопряжена с рядом технологических трудностей.

Важнейшими технологическими параметрами процесса термической обработки являются температура процесса, скорость и однородность нагрева образца. Так, для отжига контактной металлизации к транзисторным гетероструктурам на основе нитрида галлия требуется скорость нагрева образца порядка $30^\circ\text{C}/\text{с}$ при максимальной температуре $800\text{—}850^\circ\text{C}$ [2]. Допустимая неоднородность нагрева при этом не должна превышать 5—7% для образца диаметром 100 мм. Подобные технологические параметры используются для создания контактной металлизации на основе системы металлов «титан — алюминий», например $\text{Ti}/\text{Al}/\text{Ni}/\text{Au}$. При этом относительно низкая температура плавления алюминия диктует необходимость в высокой скорости нагрева образца для исключения влияния расплавленного алюминия на структуру контакта во избежание его деградации [3]. Высокая максимальная температура процесса обусловлена высокой, более 800°C , температурой образования фазы Ti_xN_y , которая «связывает» азот из приповерхностного слоя полупроводника, создавая вакансии, которые, в свою очередь, являются донорами для нитридных материалов.

Таким образом, для формирования омических контактов полупроводниковых приборов на основе гетероструктур A_3B_5 необходимо провести быструю высокотемпературную обработку металлизации. Такой процесс принято называть взрывным вжиганием [4]. В ряде случаев для термической обработки контактной металлизации к нитридным гетероструктурам используется так называемый флеш-процесс [5].

В составе конструкции большинства современных установок термической обработки имеется нагревательный элемент на основе галогенных ламп накаливания. Такие нагревательные элементы обладают низкой инерционностью и позволяют достичь скорости нагрева образца $40^\circ\text{C}/\text{с}$ и более, а также реализовать ПИД-закон для прецизионного управления процессом температурной обработки.

Общий принцип построения установок термической обработки представлен на рис. 2. Однако он имеет ряд существенных недостатков, основным из которых является значительная неоднородность нагрева образцов с неоднородным поглощением оптиче-

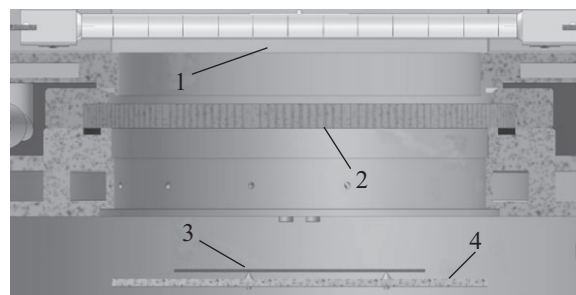


Рис. 2. Принципиальная схема установки термической обработки контактной металлизации:

1 — массив галогенных ламп накаливания; 2 — кварцевое окно для ввода излучения; 3 — образец; 4 — держатель образца

ского излучения по поверхности. К подобным образцам относятся, например, полупроводниковые транзисторные гетероструктуры, выращенные на сапфировых подложках. Такие образцы, как правило, не имеют постоянной степени заполнения металлом сформированной на поверхности пленки, что приводит к неоднородности нагрева образца и низкой повторяемости технологического процесса в производственном цикле, особенно при обработке мелких серий образцов различных типов.

Кроме того, принцип расположения ламп внутри нагревательного элемента также влияет на однородность нагрева образца за счет неоднородного распределения падающего на его поверхность излучения. При температурах порядка $600\text{—}800^\circ\text{C}$ это влияние проявляется в появлении светлых и темных пятен на поверхности полупроводниковой пластины, соответствующих форме и расположению галогенных ламп накаливания в нагревательном элементе. Такой недостаток можно компенсировать, располагая несколько массивов ламп с разных сторон образца в различных конфигурациях, в том числе это могут быть два параллельных массива, образующие решетку.

Спектр излучения линейных галогенных ламп накаливания также влияет на однородность и эффективность нагрева образца. Так, наиболее распространенные линейные галогенные лампы с биспиральной нитью накаливания имеют широкий спектр излучения, часть которого лежит в видимом диапазоне. В то же время, подложка и сформированная металлизация имеют различные коэффициенты поглощения такого излучения, что и обуславливает неоднородность нагрева. Эффективность нагрева образца определяется его коэффициентом поглощения, который увеличивается с увеличением длины волны излучения. С этой точки зрения, видимая часть спектра излучения галогенных ламп накаливания уменьшает эффективность нагрева образца. Для повышения эффективности нагрева можно использовать инфракрасные галогенные лампы, спектр излучения которых также широкий, однако его пик значительно сдвинут в длинноволновую область.

Для компенсации перечисленных недостатков нагревательных элементов на основе галогенных ламп накаливания была предложена конструкция термостатирующего элемента, которая легла в основу линии

серийно выпускаемых установок быстрого термического отжига компании ЗАО «НТО». В качестве термостатирующего элемента в них используется держатель образца, изготовленный из материала, позволяющего улучшить распределение падающего на образец излучения. В этом случае образец поглощает не первичное излучение от галогенных ламп, а вторичное излучение термостатирующего элемента, испускаемое на длине волны, соответствующей его температуре. На основе расчетов и проведенных экспериментов в качестве материала для термостатирующего элемента был выбран пиролитический графит. Предложенный термостатирующий элемент представляет собой два плоских диска, между которыми располагается образец. При температурах процесса порядка 800—1000°C спектр излучения подобного элемента будет лежать в инфракрасной области. Образец будет более эффективно поглощать такое излучение, чем излучение галогенных ламп с более широким спектром. Кроме того, использование двух дисков способствует выравниванию температуры образца, т. к. фактически тепловая «засветка» происходит с двух сторон. Помимо термостатирующего элемента, во всех установках термического отжига также применяются системы тепловых экранов, позволяющие повысить эффективность и увеличить однородность нагрева образца (рис. 3).

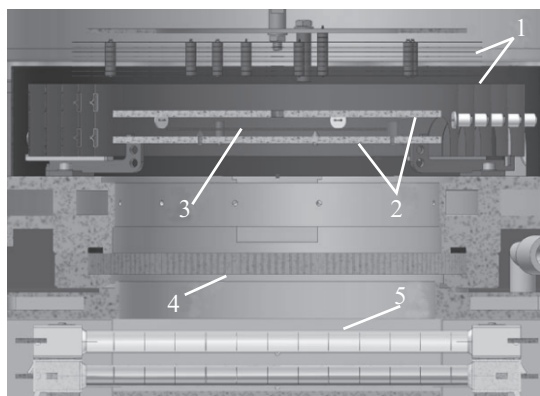


Рис. 3. Общая схема построения установок термического отжига серии STE RTA:

1 — тепловые экраны; 2 — термостатирующие элементы;
3 — образец; 4 — кварцевое окно для ввода излучения;
5 — массив галогенных ламп

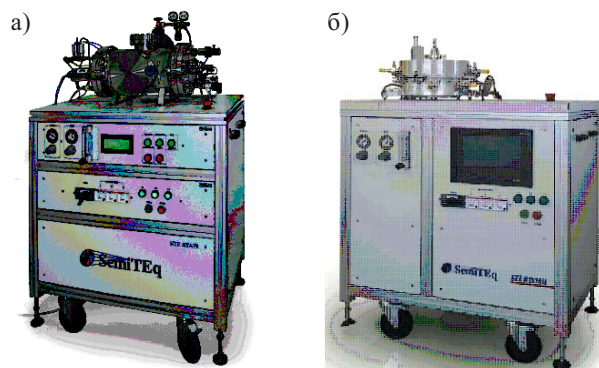


Рис. 4. Установки быстрого термического отжига STE RTA79 (а) и STE RTA70 Н (б)

По такой схеме были реализованы установки STE RTA 79 и STE RTA 70Н (рис. 4), предназначенные для проведения быстрой температурной обработки в управляемой газовой среде. Установка STE RTA 79 позволяет проводить кратковременные (до 10 мин) процессы термической обработки в инертной атмосфере при температуре до 900°C и при более высоких скоростях нагрева, чем в установке STE RTA 70Н с температурой отжига до 1300°C и временем отжига до 120 мин. При этом отжиг может проводиться в вакууме, в инертной или химически активной среде. Обе установки позволяют проводить многостадийный отжиг образцов в полностью автоматическом режиме.

Экспериментальные результаты

В ходе проведения экспериментов на установке STE EB 71 осаждались многослойные металлические покрытия Ti/Al/Ni/Au и Ni/Ge/Au для омических контактов приборов на основе нитридных (Al,Ga)N/GaN и арсенидных (Al,Ga)As/GaAs гетероструктур, соответственно. Неоднородность напыления составила 0,5% для образца диаметром 100 мм.

На установке STE RTA 79 в ЗАО «Светлана-Рост» был проведен ряд экспериментов по вжиганию полученных многослойных металлических систем. Скорость нагрева образцов на линейном участке кривой зависимости температуры от времени составила 35—40°C/с (для нитридных структур) при неоднородности нагрева не более 2% на диаметре 100 мм.

Полученные значения контактного сопротивления составляют для нитридных гетероструктур 0,4—0,6 Ом·мм при значении шероховатости поверхности 0,2—0,09 мкм, для слаболегированных арсенидных слоев 0,15—0,25 Ом·мм при шероховатости 0,05—0,01 мкм.

Аналогичные результаты были получены на такой же установке в ЗАО «Светлана-Электронприбор». Значение контактного сопротивления для арсенидных контактных слоев составило 0,1—0,15 Ом·мм при шероховатости 0,05—0,02 мкм.

Следует отметить, что во всех случаях вжигания омических контактов к нитридным и арсенидным гетероструктурам разброс полученных значений сопротивления не превышал 5% для образца диаметром 76 мм. Незначительная неоднородность, которую можно наблюдать на некоторых нитридных образцах, выращенных на сапфировых подложках и подложках из карбида кремния, является следствием неплотного прилегания пластины к держателю образца. Это обусловлено тем, что поверхность образца со стороны подложки не идеально ровная вследствие внутренних механических напряжений самой структуры. В настоящий момент ведутся эксперименты по устранению этой неоднородности за счет использования держателя образцов специальной конструкции.

Таким образом, показано, что созданные в компании ЗАО «НТО» установки электронно-лучевого напыления серии STE EB и установки быстрого термического отжига серии STE RTA в составе комплекса оборудования планарного технологического цикла позволяют проводить как исследовательские, так и

промышленные работы по формированию низкоомных омических контактов полупроводниковых приборов на основе современных материалов A_3B_5 . Установки целесообразно использовать при разработке СВЧ- и оптоэлектронных приборов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Александров С. Б., Алексеев А. Н., Веселова Е. А. и др. Отечественные установки электронно-лучевого напыления. Реализация низкоомных омических контактов к мощным нитридным СВЧ-транзисторам на основе тугоплавких материалов // Тр. 9-й Междунар. конф. "Пленки и покрытия — 2009".— Россия, С.-Петербург.— 2009.— С. 179. [Aleksandrov S. B., Alekseev A. N., Veselova E. A. i dr. Otechestvennye ustanovki elektronno-luchevogo napyleniya. Realizatsiya nizkoomnykh omicheskikh

kontaktov k moshchnym nitridnym SVCh-tranzistoram na osnove tugoplavkikh materialov // Tr. 9-i Mezhdunar. konf. "Plenki i pokrytiya - 2009". Russia, St. Petersburg. 2009. P. 179]

2. Ruvimov S. Microstructure of Ti/Al and Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts for n-GaN // Applied Physics Letters.—1996.— Vol. 69, N 11.— P. 1556—1558.

3. Luther B. P., Mohny S. E. Investigation of the mechanism for Ohmic contact formation in Al and Ti/Al contacts to n-type GaN // Applied Physics Letters.— 1997.— Vol. 70.— P. 57—59.

4. Fiory A. T. Methods in microelectronics for rapid thermal annealing of implanted dopants // 11th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cell Materials and Processes.— Estes Park, Colorado.— 2001.— P. 102—105.

5. Prucnal S., Sun J. M. Flash lamp annealing vs rapid thermal and furnace annealing for optimized metal-oxide-silicon-based light-emitting diodes // Solid-State Letters.— 2007.— Vol. 10.— Is. 2.— P. H50—H52.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



НОВЫЕ КНИГИ



Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. — М.: Техносфера, 2009.— 472 с.



Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum. Описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового теле- и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

Представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающее вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимально необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схмотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

Наноструктурные покрытия / Под ред. А.Кавалейро, Д. де Хоссона.— М.: Техносфера, 2011.— 752 с.

Сборник подготовлен международным коллективом ведущих специалистов в области нанонауки и наноструктурных покрытий. Изложены основные сведения о синтезе сверхтвердых пленок на основе тугоплавких соединений, их структуре, фазовом составе, физико-механических свойствах и сферах применения. Подробно характеризуются методы исследования покрытий: просвечивающая электронная микроскопия, наноиндентирование и компьютерный эксперимент. Детально анализируются теоретические и опытные данные о природе деформации и разрушения сверхтвердых покрытий. Особое внимание уделено их трибологическим характеристикам и термической стабильности.

Сборник будет полезен ученым, инженерам и преподавателям высшей школы, студентам и аспирантам, специализирующимся в области нанотехнологий, наноматериалов и нанопокровтий.

Д. ф.-м. н. М. И. САМОЙЛОВИЧ, д. ф.-м. н. А. Б. РИНКЕВИЧ,
д. т. н. А. Ф. БЕЛЯНИН, к. т. н. П. В. ПАЩЕНКО

Россия, г. Москва, ЦНИТИ “Техномаш”,
НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобелыцина МГУ;
г. Екатеринбург, Институт физики металлов УрО РАН
E-mail: samoylovich@technomash.ru

Дата поступления в редакцию
29.07 2010 г.

Оппонент д. т. н. Ю. А. ЗАГОРУЙКО
(г. Харьков, ГНУ НТК «Институт монокристаллов»)

3D-НАНОКОМПОЗИТЫ — ОПАЛОВЫЕ МАТРИЦЫ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО Co И СЛОИСТЫЕ СТРУКТУРЫ «ОПАЛОВАЯ МАТРИЦА — Co/Ir»

Изучено строение и возможности применения в СВЧ-технике слоистых структур Co/Ir на подложках из регулярных упаковок наносфер SiO_2 (опаловых матриц) и образцов опаловых матриц, содержащих в нанополостях кобальт.

В настоящее время прогресс в создании устройств и приборов гражданской и военной техники во многом определяется возможностями используемых материалов. Многочисленные разработки в данном направлении чаще всего основываются на «классических», давно известных материалах и методах анализа. Предполагается, что новые типы материалов — в частности, слоистые структуры на основе решетчатых упаковок наносфер (центры сфер образуют гексагональную кубическую решетку) кремнезема (рентгеноаморфный SiO_2) откроют путь к получению новых свойств и функциональности, недостижимых для встречающихся в природе или ранее использовавшихся материалов. Практическая значимость таких материалов определяется тем, что их свойствами можно управлять, изменяя размер наносфер SiO_2 , а также варьируя состав и строение тонкопленочных структур. Однако для изготовления перспективных устройств различных отраслей техники требуется разработка и изготовление подобных наноконструкций конкретных составов и строения, а также создание условий применения полученных материалов.

Несмотря на то, что свойства метаматериалов начали привлекать пристальное внимание исследователей только в самое последнее время, уже сформировался целый спектр быстро развивающихся направлений фундаментальных и технологических исследований в данной, как оказалось, очень широкой области, среди которых можно выделить несколько наиболее перспективных: разработка металлодиэлектрических, сегнетодиэлектрических и пьезоэлектрических метаматериалов. Разрабатываемые метаматериалы с пространственной дисперсией этих свойств в заданном диапазоне позволяют применять новые ре-

шения при разработке современных устройств радиоэлектроники, возникающих, в частности, при использовании наноконструкций с запрещенной фотонной зоной в СВЧ-диапазоне (от десятков ГГц до единиц ТГц).

Целью настоящей работы является получение на опаловых матрицах слоистых структур Co/Ir с заданными характеристиками, получение метаматериалов на основе опаловых матриц с пространственной дисперсией электрических или диэлектрических характеристик в диапазоне 150—300 нм при заполнении межсферических нанополостей кластерами металлического Co, а также изучение возможности применения указанных наноконструкций в СВЧ-технике.

Получение наноконструкций

В работе использовались опаловые матрицы — упорядоченные решетчатые упаковки наносфер SiO_2 , сформированные по разработанным в [1, 2] методикам. Синтезированные образцы состояли из плотноупакованных, близких по диаметру (отклонения в пределах 5%) наносфер SiO_2 с диаметром от 200 до 400 нм в зависимости от условий получения. Строение поверхности образцов (рис. 1) изучали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) CARL ZEISS LEO 1430 VP, оснащенного энергетическим дисперсионным спектрометром. Процесс формирования наноструктуры на основе плотнейших решетчатых упаковок сферических частиц SiO_2 основан на реакции гидролиза тетраэтаксисилана $(\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4)$ в $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ в присутствии NH_4OH . На первой стадии реакции гидролиза образуются мелкие разветвленные полимерные частицы кремнезема, которые за счет внутренней поликонденсации превращаются в аморфные частицы сферической формы. После отстаивания суспензии, удаления гидролизата и упрочнения осадка получали объемный материал с упорядоченным расположением наносфер SiO_2 . Правильность кубической упаковки наносфер SiO_2 сохраняется при введении в межсферические нанополости (в том числе и в процессе их формирования) различных веществ. Такая регулярная упаковка наносфер SiO_2 образует трехмерную решетку, которая может быть охарактеризована в целом как «оптический» или «фотонный» кристалл.

Одна из основных проблем получения метаматериалов на основе дисперсных сред состоит в отсут-

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 09-02-13531, а также программы ОФН РАН.

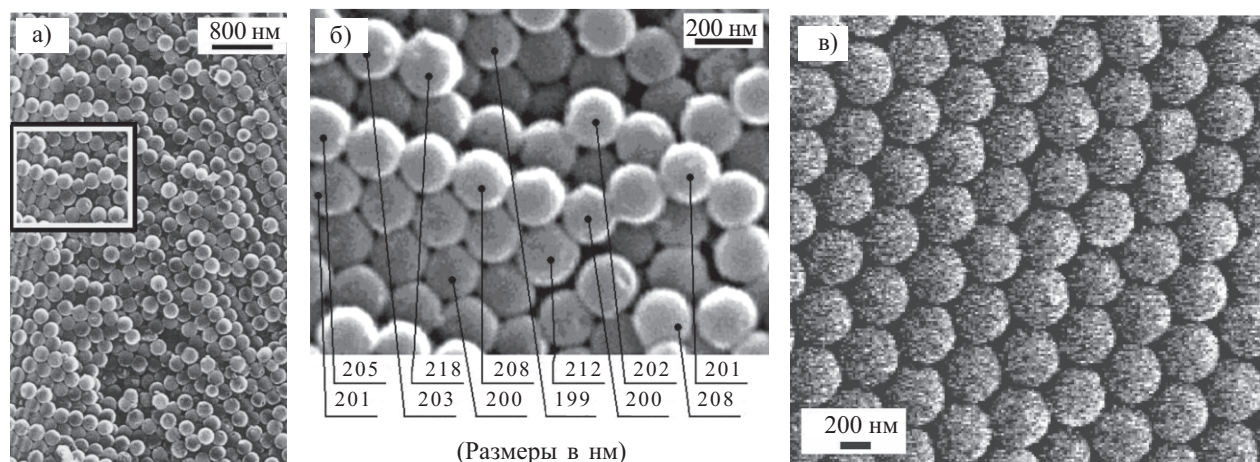


Рис. 1. РЭМ-снимок поверхности опаловой матрицы (а) и его выделенный участок в увеличенном виде (б, в)

ствии данных о поведении рентгеноаморфных и кристаллических наночастиц исследуемых веществ в нанополостях опаловых матриц при различных температурах и концентрациях. В частности, из предварительно полученных данных следовало, что фазовые соотношения для исследуемых веществ значительно (до 400—500°C в сторону уменьшения) отличаются от данных фазовых диаграмм для массивных образцов тех же (по составу и структуре) веществ. Следовательно, было необходимо определить не только методики введения веществ в нанополости, но и установить области их устойчивой кристаллизации (по температурам и условиям термообработки), температурные диапазоны начала взаимодействия вводимого материала с рентгеноаморфным кремнеземом, из которого сложены наносферы в опаловых матрицах, с образованием силикатов — с одной стороны, а также исследовать температурные области начала превращения рентгеноаморфного кремнезема с образованием кристаллических фаз (преимущественно, кри-

стобалита) — с другой. Высокая устойчивость опаловых матриц к термической обработке позволила проводить исследования в области 800—1200°C.

Главную роль в получении нанокмозитов приборного качества (с требуемыми эксплуатационными характеристиками) на основе опаловых матриц играет совершенство трехмерной решетчатой упаковки из наносфер SiO_2 . При формировании свободных (не на подложке) опаловых матриц большую роль в инициировании дефектов играет форма и размер образующих матрицу частиц SiO_2 , при этом наличие разницы в диаметрах шаров более 10% приводит к зернистости строения.

Получены 3D правильные упаковки наносфер SiO_2 объемом 2—3 см³ с размерами монодоманных областей до 0,1 мм³. Изготовлены партии опаловых матриц с заданными характеристиками (отсутствие неоднородностей пористости и включений, отклонения диаметров наносфер меньше 4%, размер моноблоков более 150 мкм, стойкость к механическим нагрузкам

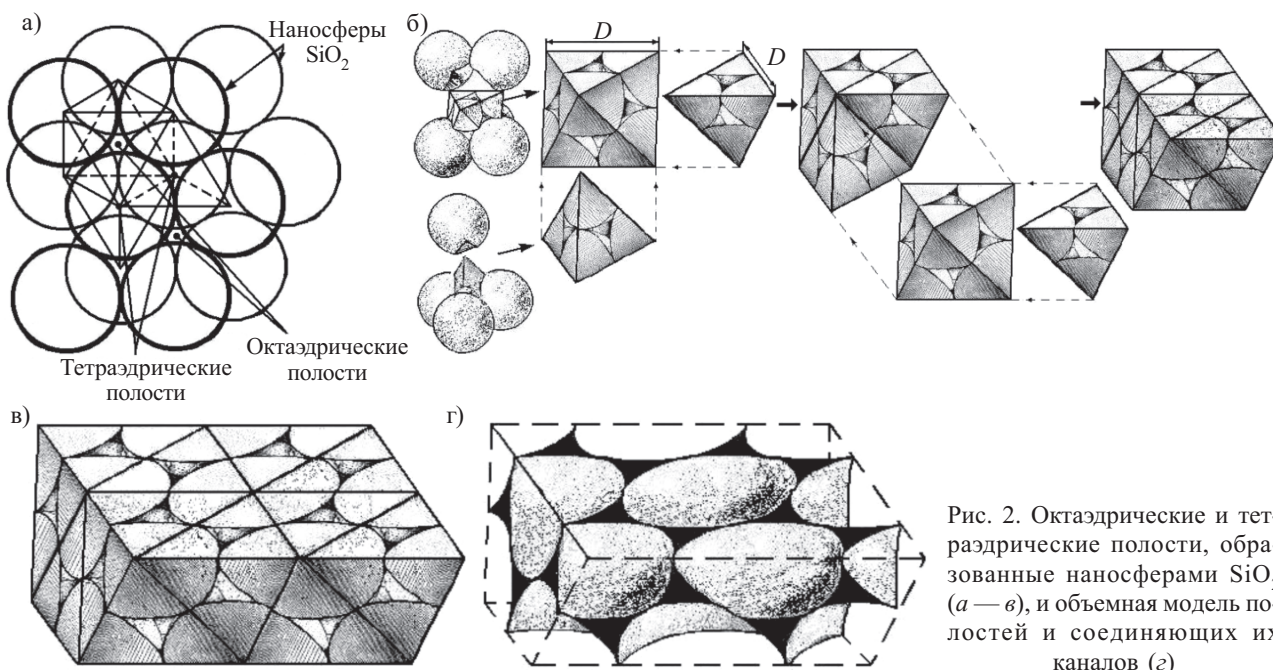


Рис. 2. Октаэдрические и тетраэдрические полости, образованные наносферами SiO_2 (а — в), и объемная модель полостей и соединяющих их каналов (г)

более $0,8 \text{ кг/см}^2$), а также партии метаматериалов (нанокмполитов) на их основе с отклонением элементного состава веществ, вводимых в межсферическое пространство, от заданного менее 1,5 весовых % при степени кристалличности более 95 объемных %.

Упаковки наносфер содержат систему сообщающихся полостей, которые занимают 26% объема матрицы. В плотнейшей решетчатой упаковке центры сфер образуют тетраэдрические и октаэдрические полости (по числу формирующих полость сфер). Каждую наносферу SiO_2 окружает по 6 октаэдрических и 8 тетраэдрических полостей, соединяющихся каналами (рис. 2). Минимальные размеры каналов около $0,3D$ определяют эффективность применения метода пропитки при введении растворов в межсферические нанополости и последующего синтеза необходимых соединений.

Для разрабатываемых метаматериалов на основе опаловых матриц использовались оригинальные технологические приемы и методики жидкофазного синтеза (для различных исходных компонентов, их относительных концентраций и температурных режимов обработки и синтеза) для получения в межсферических нанополостях кластеров необходимого состава и размеров [3, 4]. Для изучения систем, содержащих Co (в результате пропитки опаловых матриц водным раствором нитрата Co), был проведен цикл исследований особенностей образования оксидов на основе Co при различной температуре. При температурах выше 800°C стабильно формировались поликристаллические частицы Co, при этом синтезированный материал не взаимодействовал (по данным рентгенофазового анализа) с наносферами SiO_2 . При температурах выше 1000°C происходит рекристаллизация рентгеноаморфного SiO_2 . Опаловые матрицы до 25 раз пропитывались раствором нитрата Co и отжигались на воздухе (1100°C , 6 ч) на каждом этапе пропитки с последующим отжигом в водороде после проведения 10 пропиток. Рентгенофазовый анализ образцов решетчатых упаковок наносфер SiO_2 с синтезированным в нанополостях Co (нанокмполит OM:Co) позволил установить две фазы (рис. 3): Co — кубическая сингония, пространственная группа $\text{Fm}\bar{3}\text{m}$; Co^* — гексагональная сингония, $\text{P6}_3/\text{mmc}$. Решетчатая упаковка формируется в двух модификациях

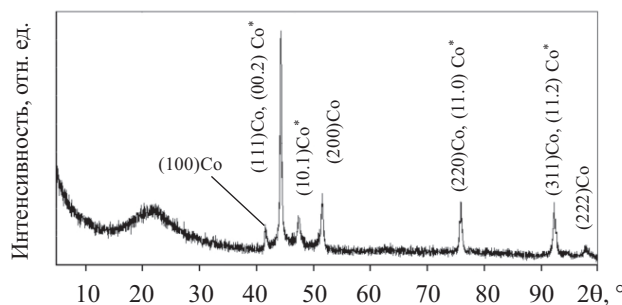


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма (дифрактометр XRD-6000, Cu $K\alpha$ -излучение, $\lambda=0,15405 \text{ нм}$, графитовый монохроматор), полученная для образца нанокмполита OM:Co

за счет разупорядочения слоев плотнейшей упаковки в кристаллитах кобальта. Фазовый состав и строение фаз синтезированного Co зависел от состава, концентраций и условий отжига пропитывающего раствора. Соотношение объемов кристаллических и рентгеноаморфных фаз Co, сформированных в межсферических нанополостях кубических упаковок наносфер SiO_2 , оценить не удалось. Размер областей когерентного рассеивания (ОКР) кристаллических фаз составляет 24—56 нм для Co, 18—36 нм для Co^* . Кристаллические фазы состоят из незначительно вытянутых (в соотношении примерно 2:3) по направлению $[001]$ кристаллитов Co и равноосных кристаллитов Co^* .

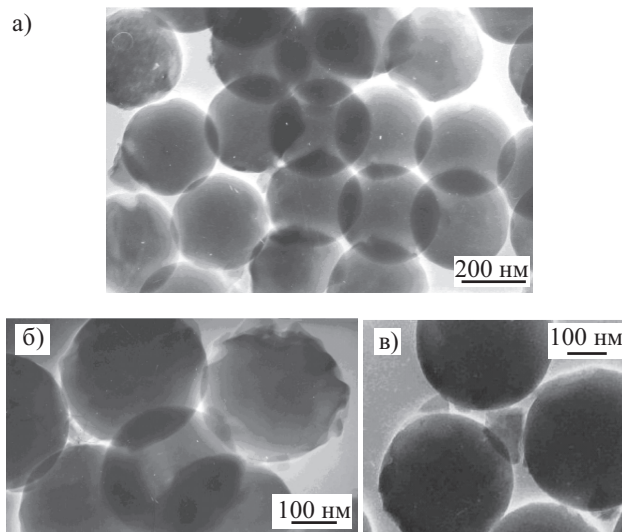
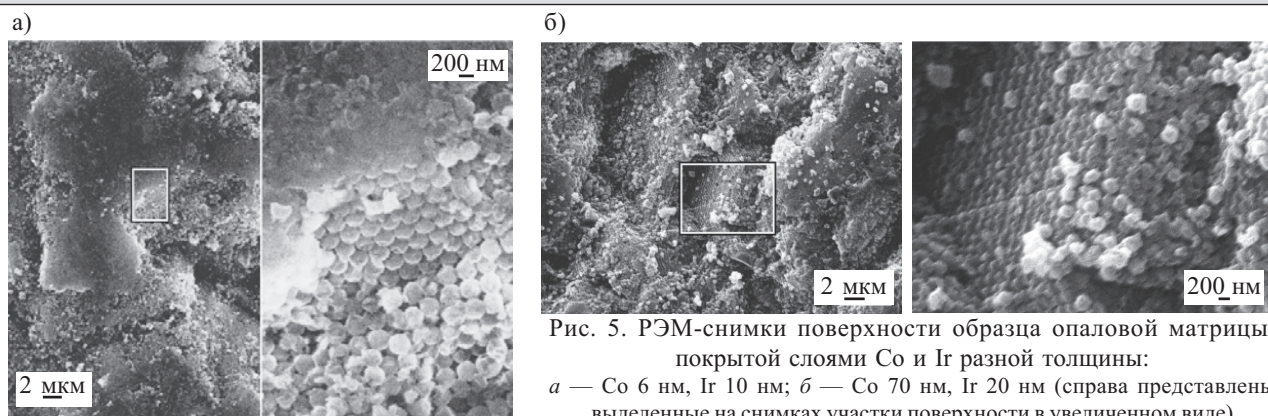


Рис. 4. ПЭМ-снимки опаловой матрицы без включений (а) и нанокмполита OM:Co (б, в)

Строение решетчатых упаковок наносфер SiO_2 , с синтезированными в межсферических нанополостях соединениями на основе Co, исследовались с использованием просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JEM 200С. Методика подготовки образцов для исследований, позволяющая разделять наносферы SiO_2 и наночастицы веществ, синтезированных в межсферических полостях, включала их измельчение и размещение на сетке. Исследование опаловых матриц, не содержащих в межсферических нанополостях материалы, показало, что они состоят из наносфер SiO_2 одинакового размера (рис. 4, а). При полном заполнении нанопустот включения имеют форму тетраэдров и октаэдров (рис. 4, в).

Строение, состав и свойства опаловой матрицы со слоистой структурой Co/Ir

Технология получения тонких пленок должна обеспечивать сохранность строения опаловой матрицы и воспроизведение функциональных свойств нанокмполита. Применение методов формирования на поверхности опаловых матриц тонких пленок, предусматривающих нагрев опаловых матриц до температуры выше 600°C (например, методы тлеющего и дугового разрядов), осложнено процессами перекристаллизации и предплавления SiO_2 . Пленки Ir и Co



формировали на вакуумных установках, оснащенных специально разработанными цельнометаллическими магнетронами [5, 6]. Распыление проводили при постоянном токе в Ar-плазме мишеней из Ir и Co (диаметр 68 мм) на подложки из опаловых матриц. Условия формирования пленок Ir и Co были следующие: давление Ar в вакуумной камере 1,2—1,3 Па; напряжение разряда 600—840 В; ток разряда 100—200 мА; температура подложки 300—600°C; расстояние между мишенью и подложкой 100 мм.

Полученные слоистые структуры Co/Ir отжигали в течение 1 ч при 700°C в вакууме (10^{-4} Па) для очистки поверхности и межсферических нанополостей от привнесенных в процессах подготовки образцов примесей. РЭМ-анализ показал, что последовательно нанесенные тонкие пленки Co и Ir не являются сплошными, а представляют собой островки, нерегулярно покрывающие поверхность отдельных наносфер SiO_2 (или их объединений) и частично заполняющие межсферические нанополости и соединяющие их каналы (рис. 5).

Форма поверхности наносфер SiO_2 после осаждения пленок металлов и диэлектриков зависит от параметров процесса, а также от толщины и материала формируемых слоев (результаты РЭМ-анализа пленок Ir представлены на рис. 6).

Анализ элементного состава поверхности опаловой матрицы, покрытой слоями Co и Ir, показал, что Co и Ir в процессе их осаждения (температура поверхности образца 300—600°C) химически не взаимодей-

ствовали. При механическом стирании пленки Ir пики Co начинают проявляться. Результаты РЭМ-анализа отожженных в течение 1 ч при 650°C, 10^{-4} Па образцов с различной толщиной слоев Ir и Co показаны на рис. 7 (в таблицах представлены результаты обработки спектров). Большая толщина слоев Ir по сравнению со слоем Co позволила полностью накрыть иридием островковые пленки Co. Атомное содержание Ir на поверхности слоистой структуры Co (6 нм)/Ir (10 и 20 нм) меняется от 0,18 до 1,92% (рис. 7, а, б). На различных участках поверхности образца опаловой матрицы, покрытой пленками Co толщиной 70 нм и Ir толщиной 20 нм, атомная доля Co изменяется от 0,12 до 0,38%, а Ir — от 1,41 до 3,93% (рис. 7, в, г). Основная масса Co и Ir сосредоточена на выступающих фрагментах макронеоднородностей поверхности опаловой матрицы, сформированной механообработкой (резкой и шлифовкой).

Микроволновые характеристики

Отличие пленочного нанокompозита от ранее исследованных объемных опаловых матриц, содержащих наночастицы Co в межсферических полостях [7], заключается в том, что содержащиеся в объемном нанокompозите частицы имеют такую же проводимость, что и металлы. Однако поскольку размеры частиц существенно меньше глубины скин-слоя на рассматриваемых частотах миллиметрового диапазона, сильного проявления скин-эффекта ожидать не следует. Следовательно, указанная проводимость наночастиц дает основания предположить, что в микроволновых характеристиках нанокompозита будет проявляться антирезонанс.

Микроволновые измерения проводили в частотном диапазоне 26—38 ГГц с использованием стандартных волноводов, работающих на основной моде H_{10} [8]. Во всем интервале частот осуществляется одномодовый режим. Для выполнения микроволновых измерений образец помещался поперек СВЧ-тракта волновода сечением 7,2×3,6 мм. Внешнее постоянное магнитное поле H , создаваемое электромагнитом, прикладывалось перпендикулярно волновому вектору волны q . Внешнее магнитное поле лежит в плоскости образца либо параллельно, либо перпендикулярно вектору микроволнового магнитного поля H_{\perp} . В измерениях такого нанокompозита при помещении в волно-

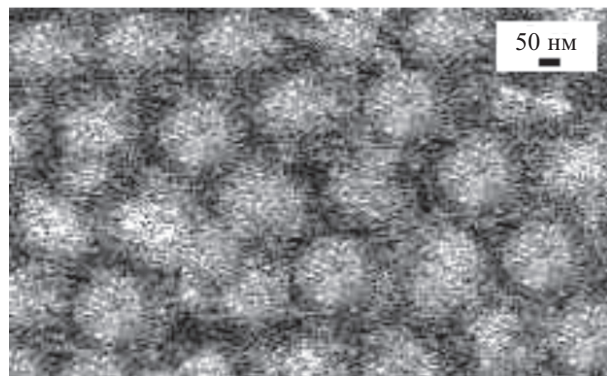
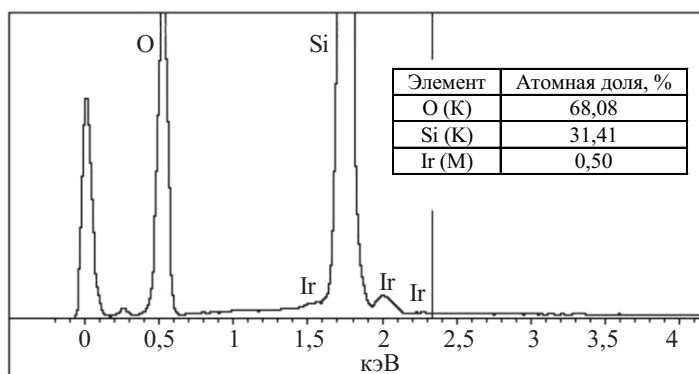
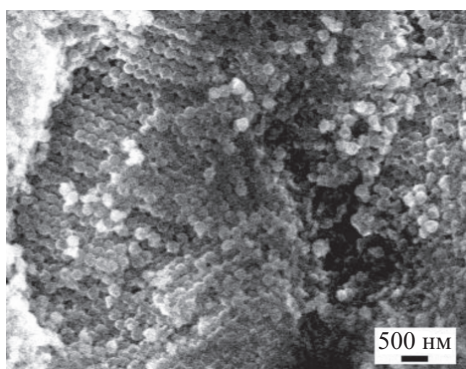
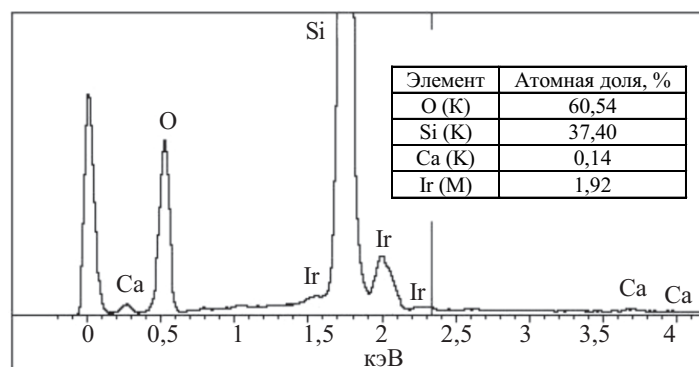
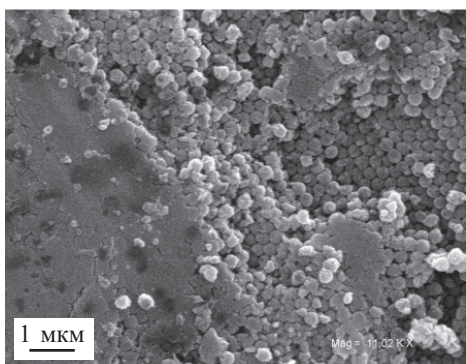


Рис. 6. РЭМ-снимок поверхности опаловой матрицы после осаждения пленки Ir толщиной 0,3 мкм

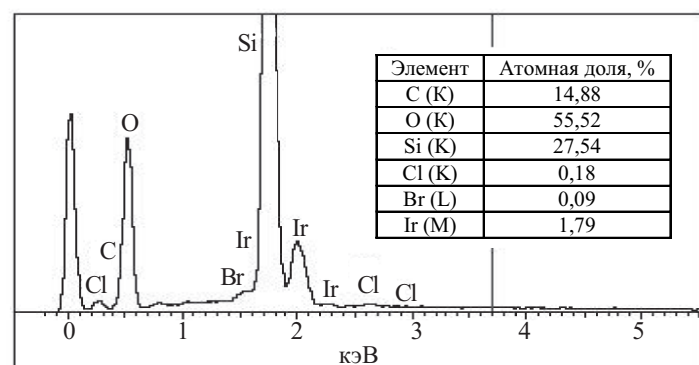
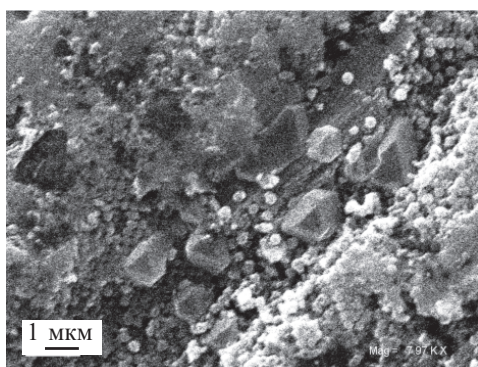
а)



б)



в)



г)

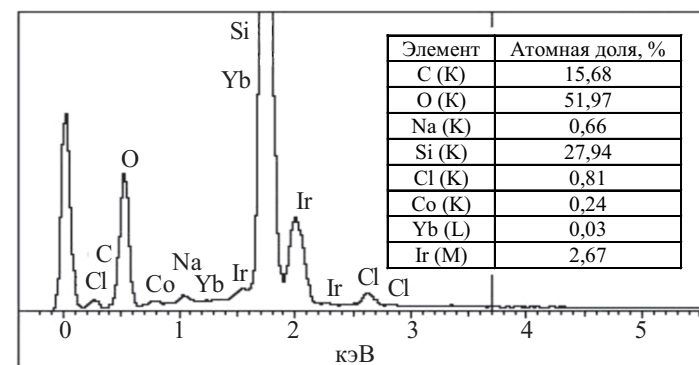
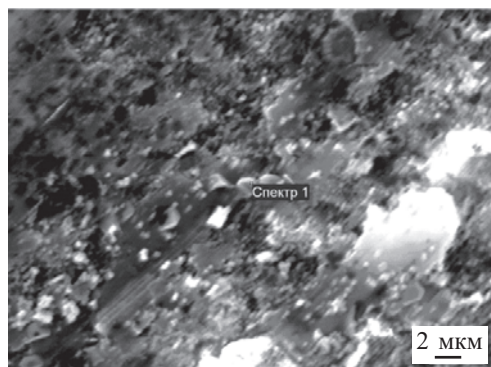


Рис. 7. РЭМ-снимки поверхности и энергетический спектр опаловой матрицы, покрытой слоями Co и Ir разной толщины (в нм):

а — Co 6, Ir 10; б — Co 6, Ir 20; в, г — Co 70, Ir 20 (различные участки пленки)

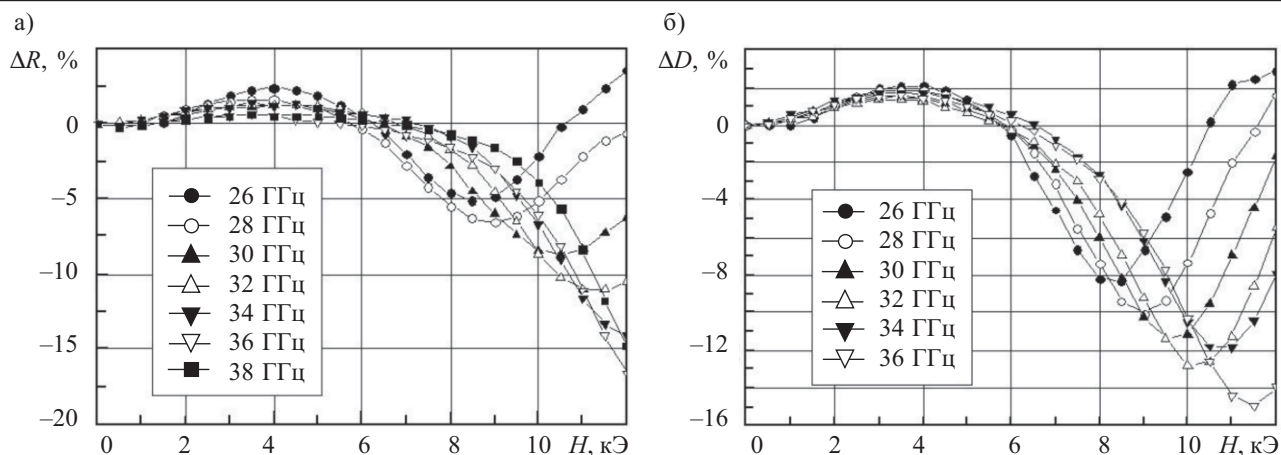


Рис. 8. Зависимость относительных изменений коэффициента отражения ΔR (а) и коэффициента прохождения ΔD (б) от напряженности магнитного поля H для магнитного нанокompозита ОМ:Со

вод была реализована такая конфигурация полей, когда \mathbf{H} перпендикулярно плоскости \mathbf{H}_0 . Результаты измерения полевой зависимости коэффициентов отражения R и прохождения D показаны на рис. 8.

Эксперименты показали, что кроме минимума коэффициента прохождения, вызванного магнитным резонансом, в полях меньшей напряженности присутствует еще и его максимум (рис. 8, б), который можно трактовать как антирезонанс в отражении волн. В области магнитных полей, меньших резонансного, действительная часть магнитной проницаемости μ' отрицательна [2]. Кроме этого, наличие антирезонанса подтверждает сделанное предположение о существовании в нанокompозите проводящих частиц. Поэтому вполне можно утверждать о наблюдении микроволновых характеристик двойной левой среды. Измеренные частотные характеристики коэффициентов прохождения и отражения позволяют оценить диэлектрическую проницаемость и проводимость нанокompозита.

Результаты измерений и расчета частотных зависимостей коэффициентов R и D показаны на рис. 9, а. Расчетные зависимости приведены для значений удельной проводимости $\sigma = 0,36$ См/м и действительной части диэлектрической проницаемости $\epsilon' = 3,3$, при

которых получены наименьшие среднеквадратичные отклонения от экспериментальных значений. Как видно из рисунка, в рассматриваемом интервале зависимость и проводимости, и диэлектрической проницаемости от частоты слабая. Величина проводимости данного нанокompозита невелика, но само ее существование объясняет наблюдаемые микроволновые свойства, в частности наличие магнитного антирезонанса. Совокупность полученных микроволновых данных позволяет утверждать, что в области полей от поля антирезонанса до поля магнитного резонанса такой нанокompозит следует рассматривать как 3D двойную левую среду.

Проводилось также экспериментальное исследование неотожженных образцов опаловых матриц со слоями Со и Иг размером $7,2 \times 3,6 \times 3$ мм. На рис. 9, б приведены результаты измерений и расчетные зависимости, построенные для сопротивления $\rho = 1,9 \cdot 10^4$ Ом/м. Здесь видно, что хорошее соответствие расчетных и экспериментальных зависимостей существует во всем частотном диапазоне. Поэтому можно сделать заключение о слабой частотной дисперсии проводимости этого пленочного нанокompозита на волнах миллиметрового диапазона.

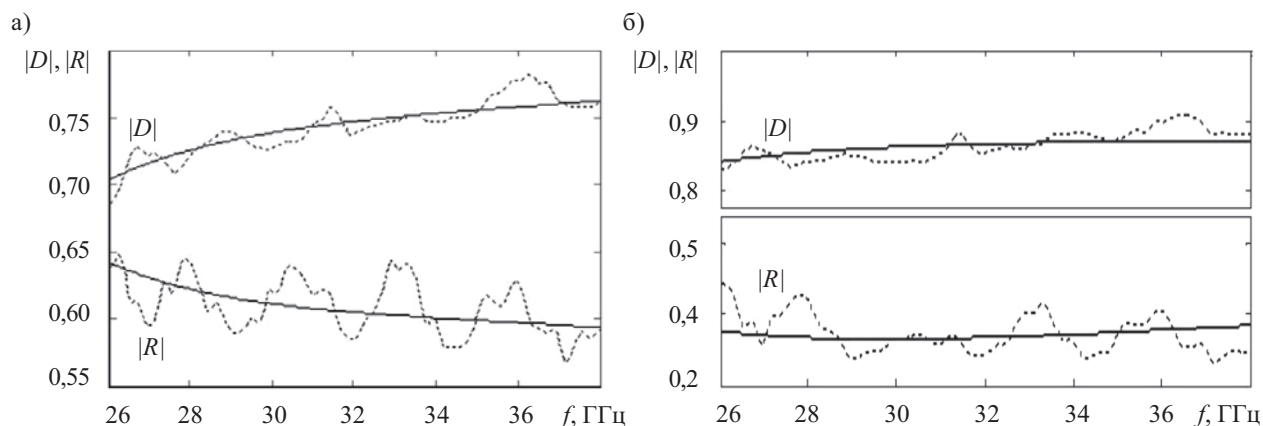


Рис. 9. Частотные зависимости коэффициентов прохождения D и отражения R для магнитного нанокompозита ОМ:Со (а) и опаловой матрицы с нанесенными на поверхность слоями Со (6 нм) и Иг (10 нм) (сплошные — расчет, пунктирные — эксперимент)

Заключение

Были изучены некоторые физико-технические характеристики нанокompозитных материалов, содержащих кластеры металлического Co, и образцы опаловых матриц с нанесенными на поверхность слоями Co и Ir разной толщины методом магнетронного распыления. Строение образцов было исследовано с использованием рентгеновской дифрактометрии, электронной микроскопии, энергетической дисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Полученные результаты создают предпосылки для разработки управляемых магнитным полем высокочастотных устройств, работа которых будет основана на использовании микроволнового магнитного резонанса. Такие устройства конструктивно просты и могут быть эффективны в применении.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Самойлович М. И., Клещева С. М., Белянин А. Ф. и др. Трехмерные нанокompозиты на основе упорядоченных упаковок наносфер кремнезема. Ч. 1—3 // Микросистемная техника. — 2004. — № 6. — С. 3—7; № 7. — С. 2—11; № 8. — С. 9—17. [Samoilovich M. I., Kleshcheva S. M., Belyanin A. F. i dr. Trekhmernye nanokompozity na osnove uporyadochennykh upakovok nanosfer kremnezema. Ch. 1-3 // Mikrosistemnaya tekhnika. 2004. N 6. P. 3; N 7. P. 2; N 8. P. 9]
2. Наноматериалы. III. Фотонные кристаллы и нанокompозиты на основе опаловых матриц / Под ред. М. И. Самойловича. — М.: Техномаш, 2007. [Nanomaterialy. III. Fotonnye kristally i nanokompozity na osnove opalovykh matrity / Pod red. M. I. Samoilovicha. Moscow. Tekhnomash. 2007]

3. Белянин А. Ф., Клещева С. М., Самойлович М. И. и др. Особенности метаматериалов (нанокompозитов) на основе регулярных упаковок наносфер SiO_2 // Наука и технологии в промышленности. — 2009. — № 3. — С. 61—68. [Belyanin A. F., Kleshcheva S. M., Samoilovich M. I. i dr. // Nauka i tekhnologii v promyshlennosti. 2009. N 3. P. 61]

4. Самойлович М. И., Бовтун В., Ринкевич А. Б. и др. Пространственно-неоднородные материалы на основе решетчатых упаковок наносфер SiO_2 // Инженерная физика. — 2010. — № 6. — С. 24—31. [Samoilovich M. I., Bovtun V., Rinkevich A. B. i dr. // Inzhenernaya fizika. 2010. N 6. P. 24]

5. Белянин А. Ф., Гуляев Ю. В., Самойлович М. И., Багдасарян А. С. Оборудование для формирования пленок алмаза и алмазоподобных материалов для акустоэлектроники // Наука и технологии в промышленности. — 2006. — № 4. — С. 19—38. [Belyanin A. F., Gulyaev Yu. V., Samoilovich M. I., Bagdasaryan A. S. // Nauka i tekhnologii v promyshlennosti. 2006. N 4. P. 19]

6. Белянин А. Ф., Самойлович М. И. Наноматериалы. Ч. IV. Тонкие пленки как наноструктурированные системы. — М.: Техномаш, 2008. [Belyanin A. F., Samoilovich M. I. Nanomaterialy. Ch. IV. Tonkie plenki kak nanostrukturirovannye sistemy. Moscow. Tekhnomash. 2008]

7. Ринкевич А. Б., Перов Д. В., Самойлович М. И. и др. Частотная зависимость коэффициента поглощения миллиметровых волн в 3D-нанокompозитах на основе опаловых матриц // Радиотехника и электроника. — 2009. — Т. 54, № 8. — С. 996—1000. [Rinkevich A. B., Perov D. V., Samoilovich M. I. i dr. // Radiotekhnika i elektronika. 2009. Vol. 54, N 8. P. 996]

8. Ринкевич А. Б., Перов Д. В., Самойлович М. И. и др. Опаловые матрицы со слоистой структурой Co/Ir и 3D-нанокompозиты опаловая матрица — соединения Co // Инженерная физика. — 2009. — № 10. — С. 18—24. [Rinkevich A. B., Perov D. V., Samoilovich M. I. i dr. // Inzhenernaya fizika. 2009. N 10. P. 18]

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Родунер Э. Размерные эффекты в наноматериалах. — М.: Техносфера, 2011г. — 352 с.

Нанотехнологии, позволяющие манипулировать веществом на уровне атомов и молекул и обещающие в значительной степени изменить жизнь будущих поколений, становятся ведущим направлением развития общества в XXI столетии. На основе нанотехнологий можно создавать новые материалы, системы и устройства, которые по своим характеристикам значительно превосходят существующий уровень.

В монографии преимущественно на примере наночастиц рассмотрено проявление физико-химических свойств материалов, связанных с размерными эффектами. Основное внимание уделено структуре, электронному строению, магнитным характеристикам, каталитическим и термодинамическим особенностям. Рассматриваются также разнообразные возможности применения нанотехнологий во многих областях техники, медицины, науки и общественной жизни.

Для студентов, аспирантов, научных сотрудников и разработчиков, специализирующихся в области нанотехнологий и наноматериалов.



НОВЫЕ КНИГИ

Нанотехнологии, метрология, стандартизация и сертификация в терминах и определениях / Под ред. М. В. Ковальчука, П. А. Тодуа. — М.: Техносфера, 2009. — 136 с.

Терминологический словарь содержит следующие разделы: основные понятия, основные физические, химические и биологические явления и понятия в нанотехнологиях, объекты нанотехнологий, основные процессы и методы в нанотехнологиях, методы и средства исследования нанобъектов, метрология, стандартизация и сертификация, информатика, электроника, квантовые компьютеры.

Имеются указатели терминов на русском и английском языках, приведен список международных, региональных и зарубежных национальных организации в области стандартизации и сертификации, список распространенных англоязычных сокращений.

Для научных работников, инженеров, аспирантов, студентов, специализирующихся в различных областях нанотехнологий, их метрологического обеспечения и стандартизации.



К. ф.-м. н. К. А. КАТРУНОВ, А. И. ЛАЛАЯНЦ,
к. ф.-м. н. Л. П. ГАЛЬЧИНЕЦКИЙ, д. т. н. Н. Г. СТАРЖИНСКИЙ,
А. В. ЖУКОВ, к. т. н. С. Н. ГАЛКИН,
к. х. н. Е. Ю. БРЫЛЁВА, И. М. ЗЕНЯ, О. Г. ТРУБАЕВА

Украина г. Харьков, Институт сцинтилляционных материалов НАНУ
E-mail: kkatrunov@isma.kharkov.ua

Дата поступления в редакцию
14.06 2010 г.

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

ЭФФЕКТИВНЫЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{ZnS}_{1-x}\text{Te}_x$ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Изучен процесс образования твердого раствора при спекании порошков ZnS и ZnTe , подобраны оптимальные соотношения исходных компонентов и режим синтеза, изучено влияние дополнительной термообработки на люминесцентные и сцинтилляционные свойства полученных материалов.

Среди материалов, которые могут излучать свет под воздействием ионизирующего излучения, только малая часть является сцинтилляторами — веществами, по характеристикам свечения которых можно в режиме реального времени определять параметры ионизирующего излучения. С другой стороны, известно, что нет идеальных сцинтилляторов, которые подходили бы для решения всех проблем радиационной физики. Среди основных сцинтилляционных свойств всегда желательны высокий световой выход, низкая инерционность и радиационная стойкость.

В последнее время, помимо широко применяемых щелочно-галогидных и оксидных сцинтилляторов, появился новый класс сцинтилляторов на основе полупроводниковых соединений $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$, которые получают путем изовалентного легирования кристаллов ZnSe [1, 2]. Такое легирование приводит к образованию ассоциатов собственных дефектов, определяющих оптические и люминесцентные свойства кристаллов. Расширение класса сцинтилляторов такого типа происходит за счет использования других соединений этой группы, что требует выяснения возможности их легирования, а также направленного дефектообразования, приводящего к возникновению необходимых для сцинтиллятора излучательных центров. В частности, интерес представляет широкозонный полупроводник ZnS , легированный изовалентными примесями (Te , Se). Это связано с высокой конверсионной эффективностью преобразования энергии в нем, а также с широкими возможностями влиять на спектры излучения и на другие выходные параметры. Кроме того, ZnS имеет достаточно низкий эффективный атомный номер ($Z_{\text{эфф}}=24$), что создает перспективы для использования сцинтилляторов на его основе в современной медицинской аппаратуре, где требуется малая лучевая нагрузка на пациента, а также возможность получения дополнительного низкоэнергетиче-

ского канала при создании мультисенсорных детектирующих систем в интроскопической аппаратуре. Хотя изучению этого материала посвящено огромное количество работ, исследование его свойств по-прежнему перспективно и актуально.

Как известно, область существования твердого раствора (ТР) $\text{ZnS}_{1-x}\text{Te}_x$ ограничена с двух сторон и находится в пределах $0 \leq x \leq 0,08$ и $0,8 \leq x \leq 1$ [3]. В то же время, имеются данные о неограниченной растворимости при получении ТР методом молекулярной эпитаксии [3].

В настоящей работе были проведены исследования процессов образования твердого раствора при спекании порошков ZnS и ZnTe , по определению оптимального состава, влиянию дополнительных отжигов, получению порошкообразных и объемных сцинтилляторов состава $\text{ZnS}_{1-x}\text{Te}_x$, и исследованы их люминесцентные и сцинтилляционные свойства.

Термодинамика протекания основных реакций

Для определения оптимальных условий образования твердых растворов были проведены термодинамические расчеты протекания основных реакций и вычислены их константы равновесия K_p в интервале температуры 600—1400 К при синтезе в инертной и восстановительной атмосферах:

1. $\text{ZnO}_{(\text{ТВ})} + \text{H}_{2(\text{Г})} = \text{Zn}_{(\text{Ж})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{Г})}$;
2. $\text{ZnS}_{(\text{ТВ})} + \text{H}_{2(\text{Г})} = \text{Zn}_{(\text{Ж})} + \text{H}_2\text{S}_{(\text{Г})}$;
3. $\text{ZnTe}_{(\text{ТВ})} + \text{H}_{2(\text{Г})} = \text{Zn}_{(\text{Ж})} + \text{H}_2 + \text{Te}_{(\text{Г})}$;
4. $\text{ZnS}_{(\text{ТВ})} + \text{Te}_{(\text{Ж})} = \text{ZnTe}_{(\text{ТВ})} + \text{S}_{(\text{Г})}$;
5. $\text{ZnS}_{(\text{ТВ})} = \text{Zn}_{(\text{Ж})} + 1/2\text{S}_{2(\text{Г})}$;
6. $\text{ZnTe}_{(\text{ТВ})} = \text{Zn}_{(\text{Ж})} + \text{Te}_{(\text{Ж})}$;
7. $\text{ZnTe}_{(\text{ТВ})} = \text{Zn}_{(\text{Ж})} + 1/2\text{Te}_{2(\text{Г})}$;
8. $1/2\text{S}_{2(\text{Г})} + \text{H}_{2(\text{Г})} = \text{H}_2\text{S}_{(\text{Г})}$;
9. $\text{H}_{2(\text{Г})} + 1/2\text{Te}_{2(\text{Г})} = \text{H}_2\text{Te}_{(\text{Г})}$.

При расчетах K_p использовалось приближение Улиха [4]:

$$\lg K_p = (\Delta S_{298}^{\circ} + \Delta H_{298}^{\circ} / T) / 2,3R = A - B/T$$

где ΔS_{298}° , ΔH_{298}° — изменения энтропии и энтальпии, соответственно, в результате реакции при $T=298$ К;

R — универсальная газовая постоянная.

Константы A и B для различных реакций рассчитывались по термодинамическим данным [5—7]. Ход температурной зависимости констант равновесия рассмотренных реакций в реальном для каждой реакции температурном интервале показан на **рис. 1**.

При расчете реакций, протекающих в системе ZnS—ZnTe в процессе спекания исходных компонентов с участием водорода, были учтены, кроме собственно процесса спекания реагентов (ZnS и ZnTe), диссоциация этих реагентов (реакции 5—7) и реакции взаимодействия водорода с продуктами диссоциации (реакции 8, 9).

Известно, что спекание порошков происходит эффективно, если температура процесса лежит в диапазоне 0,65—0,75 от температуры плавления компонентов [8, 9].

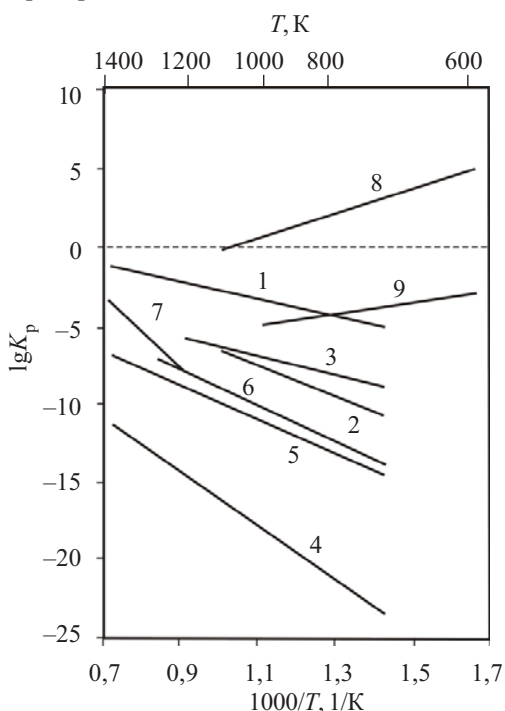


Рис. 1. Зависимость константы равновесия основных реакций от температуры (номера кривых соответствуют номерам реакций)

Анализируя представленные на рис. 1 данные, можно сделать следующие выводы.

Учитывая значения температуры плавления исходных реагентов $T_{\text{пл}}$ (ZnS)=1991 К и $T_{\text{пл}}$ (ZnTe)=1570 К [10, с. 77—86], следует ожидать, что в данной системе приемлемые эффективные значения температуры спекания находятся в диапазоне 1200—1400 К.

В указанном температурном интервале можно пренебречь реакциями взаимодействия ZnS и ZnTe с водородом (реакции 2 и 3), т. к. вероятность их протекания при таких температурах очень низка. По этой же причине также не вносят существенного вклада в процесс спекания реакции диссоциации соединений ZnS и ZnTe (реакции 5—7), взаимодействия ZnS с Te (реакция 4) и взаимодействия серы и теллура с водородом (реакции 8 и 9). К тому же, соединения H_2S и H_2Te существуют при гораздо более низкой температуре, чем температура спекания (H_2S — при темпе-

ратуре ниже 1000 К, а H_2Te — при температуре ниже 300 К [11]). Эти данные хорошо согласуются с данными, представленными на рис. 1 значениями $\lg K_p$.

Таким образом, единственная реакция, которая имеет наибольшую вероятность протекания в диапазоне 1200—1400 К, это реакция восстановления оксида цинка водородом (реакция 1), которая приводит к интенсификации процесса спекания ZnS и ZnTe и образованию ТР $\text{ZnS}_{1-x}\text{Te}_x$, т. к. пленка ZnO только тормозит этот процесс. Причем, как видно из анализа температурного хода реакции 1, ее вероятность с повышением температуры растет.

Эксперимент

Была проведена серия синтезов в системе ZnS—ZnTe, основанных на результатах термодинамических расчетов, при различных условиях спекания, в частности варьировались среда и продолжительность синтеза. Исходная шихта представляла собой смесь порошков ZnS и ZnTe марки ХЧ (г. Зеленоград, Россия); масса навески составляла 10 г. Процесс спекания смеси проводился в инертной атмосфере аргона и в восстановительной атмосфере водорода. Была подготовлена также серия образцов с разным содержанием ZnTe в области малых концентраций. С учетом сказанного ранее, температура проведения синтеза была выбрана равной 1000°C. Массовая доля ZnTe в исходной шихте составляла 0,5; 1; 2; 3; 5; 7 и 10%. Содержания теллура контролировали методом атомно-эмиссионной спектроскопии (АЭС) на спектрометре Trace ScanAdvantage Termo Jarrell Asc и оптическим методом (по измерению диффузного отражения на спектрофотометре КСВУ-23 с приставкой ПДО-1). Из спектров диффузного отражения по сдвигу края на спектральной зависимости $R_{\text{диф}}(\lambda)$, который соответствует краю фундаментальной полосы поглощения (E_g), можно получить информацию о полноте реакции образования твердого раствора. Такой метод использовался в [1, 12, 13] при изучении образования твердых растворов $\text{ZnSe}_{1-x}\text{Te}_x$. Его эффективность связана со значительными изменениями ширины запрещенной зоны в ТР при малых изменениях x , что дает возможность оценивать величину сдвига края полосы, а следовательно, и ориентировочное содержание теллура в решетке. По форме кривой в спектре можно также судить о монофазности образца.

Кроме содержания Te, контролировалась масса исходного продукта в процессе спекания. Спектры рентгенолюминесценции измерялись на спектрофотометре КСВУ-23 с использованием рентгеновского аппарата РЕИС-И с напряжением на трубке 30 кВ. Измерение уровня послесвечения η через заданное время производилось с помощью измерительно-вычислительного комплекса по исследованию кинетических характеристик кристаллов. Световой выход относительно эталонного образца определялся токовым методом с использованием Si-фотодиода при рентгеновском облучении.

Результаты и их обсуждение

Анализ спектров диффузного отражения образцов ТР с массовой долей ZnTe 2 %, полученных при различных условиях спекания (**рис. 2**), показывает, что

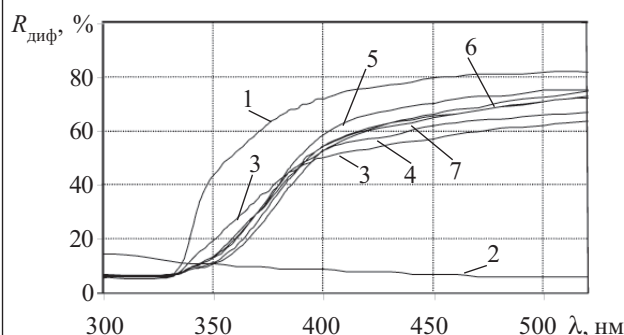


Рис. 2. Спектры диффузного отражения образцов ZnS (1), ZnTe (2) и твердого раствора ZnS+2% ZnTe, полученного при разном времени синтеза в водороде и аргоне: 3 — 1 ч, Ar; 4 — 3 ч, Ar; 5 — 5 ч, Ar; 6 — 3 ч, H₂; 7 — 5 ч, H₂

продолжительность синтеза даже в течение 3 ч в атмосфере как аргона, так и водорода, приводит к образованию твердого раствора, судя по одинаковому положению подъема в спектре $R_{\text{диф}}(\lambda)$, причем содержание теллура в решетке в обоих случаях практически одинаково. Более высокий уровень отражения в длинноволновой области спектра образцов, полученных при длительном синтезе объясняется большим испарением («уносом») непрореагировавшего ZnTe, который обладает в этой области спектра поглощающими свойствами (кривая 6). Это подтверждается большей потерей массы и уменьшением общего содержания Te при увеличении времени синтеза (табл. 1).

Процесс спекания порошков и образование ТР тормозит пленка ZnO. В то же время, как было показано выше, при протекании реакции в присутствии водорода существует большая вероятность протекания восстановительной реакции 1 (см. рис. 1). Поэтому спекание в атмосфере водорода приводит к более быстрому, чем в атмосфере аргона, химико-термическому стравливанию слоя ZnO. При этом усложняется кинетика и термодинамика процесса, однако это не является принципиальным препятствием вследствие рыхлости структуры слоя ZnO [13].

Спектры диффузного отражения образцов ТР, полученных в результате спекания порошков с различным содержанием исходных компонентов в атмосфере водорода и аргона, показаны на рис. 3. Там же приведены зависимости $R_{\text{диф}}(\lambda)$ для исходных компонентов ZnS и ZnTe.

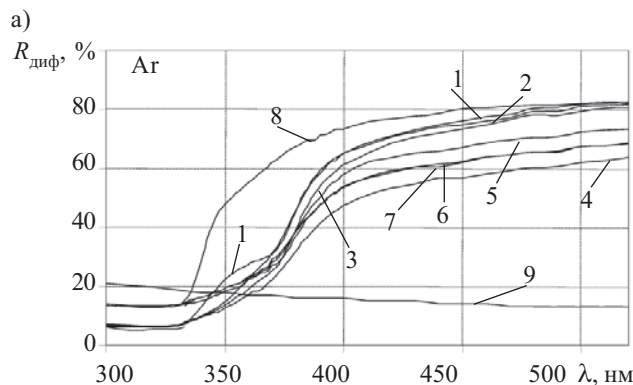


Рис. 3. Спектры диффузного отражения исходных образцов ZnS (8) и ZnTe (9) и образцов ТР $\text{ZnS}_{1-x}\text{Te}_x$, полученных при спекании порошков в атмосфере аргона (а) и водорода (б) с различным содержанием ZnTe в шихте (в % от массы): 1 — 0,5 %; 2 — 1 %; 3 — 2 %; 4 — 3 %; 5 — 5 %; 6 — 7 %; 7 — 10 %

Таблица 1

Содержание Te и потеря массы исходного продукта в твердом растворе ZnS+2% ZnTe при различных условиях синтеза ($T=1000^\circ\text{C}$)

Условия синтеза	Массовая доля Te, %	Потеря массы исходного продукта, %
2 ч, Ar	0,58	0,91
3 ч, Ar	0,38	1,92
5 ч, Ar	0,15	2,23
3 ч, H ₂	0,66	1,95
5 ч, H ₂	0,34	3,82

Сравнивая спектры для образцов, имеющих одинаковый состав, но полученных в разных средах, можно сделать вывод о том, что в атмосфере водорода ТР получается более гомогенным, о чем свидетельствует большая крутизна кривых. Содержание Te в решетке в обоих случаях не сильно меняется от состава шихты и, по всей вероятности, ограничивается двумя-тремя % от массы, что определяет предел его растворимости, который достигается при таких условиях. Содержание теллура оказалось более высоким в случае синтеза в водороде (табл. 2), что свидетельствует о более полном прохождении реакции в этом случае.

Следует учитывать, что реальный процесс спекания порошков ZnS–ZnTe в атмосфере водорода представляет собой сложную гетерогенную реакцию, на которую оказывают влияние как чисто термодинамические параметры, характерные для равновесного состояния, так и кинетические (скорость стравливания слоя оксида цинка, скорость реакции водорода с компонентами, скорость образования ТР при спекании и др).

Спектры рентгенолюминесценции (РЛ) полученных твердых растворов представляют собой наложение ряда полос, основными из которых являются полосы с $\lambda_{\text{max}}=460$ нм и $\lambda_{\text{max}}=520$ нм, присутствующие и в исходном образце ZnS (рис. 4). Такие полосы обычно свидетельствуют о «самоактивированной» люминесценции, обусловленной либо собственными дефектами, либо их ассоциатами, образованными с

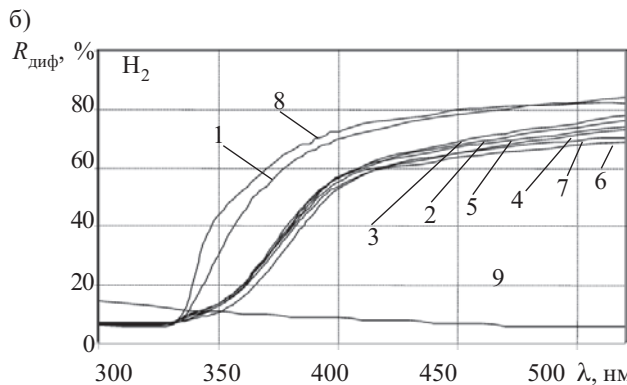


Таблица 2

Содержание Te в образцах ТР ZnS–ZnTe с разным составом, полученных при 1000°C в течение 3 ч в разной атмосфере

Содержание ZnTe в шихте, %	Массовая доля теллура, %	
	Синтез в Ar	Синтез в H ₂
0,5	0,047	0,20
1	0,11	0,26
2	1,16	0,83
3	0,84	1,58
5	0,54	1,52
7	1,20	5,61
10	2,94	5,73

кислородом [14]. Так, полосу 460 нм принято приписывать двухзарядной вакансии цинка или ассоциату на ее основе [15].

Основной особенностью полученных спектров является перераспределение интенсивности этих полос при изменении состава ТР, синтезированных и в атмосфере водорода, и в инертной среде: при большем содержании ZnTe в шихте преобладает длинноволновая полоса с $\lambda=520$ нм и наоборот.

Как было показано в [2], для сцинтилляционных кристаллов ZnSe, легированных изовалентными примесями, определяющим фактором при формировании излучательных центров является послеростовая термическая обработка в насыщенных парах цинка.

При этом существенно (до 10 раз) повышается интенсивность люминесценции. Поэтому представляло интерес изучение влияния дополнительной термической обработки на формирование излучательных центров в системе ZnS–ZnTe. Исследования проводились для состава ZnS + 2% ZnTe, полученного при спекании в потоке водорода в течение 5 ч. Термическая обработка проводилась при разном времени выдержки в замкнутом объеме при температуре 1000°C как в насыщенных парах цинка, так и в инертной среде (аргоне).

При отжиге в парах цинка порошок приобретает сероватый оттенок. В спектрах диффузного отражения это проявляется как снижение уровня отражения в длинноволновой области. При этом положение края полосы поглощения не изменяется (рис. 5). Интенсивность рентгенолюминесценции также практически не изменяется, хотя и наблюдается незначительное перераспределение полос (рис. 5, б). Отсюда можно сделать вывод, что отжиг в парах цинка образцов твердого раствора ZnS–ZnTe либо вообще не приводит к формированию центров, характерных для ZnSe(Te), либо сформированные центры малоэффективны как излучательные.

Для аналогичных образцов, прошедших термическую обработку в инертной атмосфере (Ar, 72 ч) при той же температуре, интенсивность люминесценции существенно (до 20 раз) увеличивается, при этом доминирующей становится полоса $\lambda=450$ нм. Существенно снижается и послесвечение (табл. 3), достигая значений, характерных для классического

Таблица 3

Влияние термической обработки в различных условиях на параметры сцинтилляторов на основе ТР состава ZnS+2% ZnTe

Состав сцинтиллятора	Условия термообработки	Массовая доля теллура, %	Содержание фазы, %		Световых выходов, отн. ед.	Уровень послесвечения, %, по истечении заданного времени			
			вюрцит	сфалерит		3 мс	5 мс	10 мс	20 мс
ZnS	—	—	—	—	1,5	43,5	42,3	39,6	35,5
ZnS+2% ZnTe	Без термообработки	0,83	64,0	9,3	2,7	8,64	8,59	8,47	8,24
	Ar, 72 ч, 1000°C	1,0	1,4	72,6	28,5	3,81	3,75	3,63	3,41
	Zn, 4 ч, 1000°C	0,3	—	—	3,4	27,2	26,5	24,8	22,0
	Zn, 72 ч, 1000°C	0,36	40,8	21,2	5,1	17,4	15,7	12,6	9,35

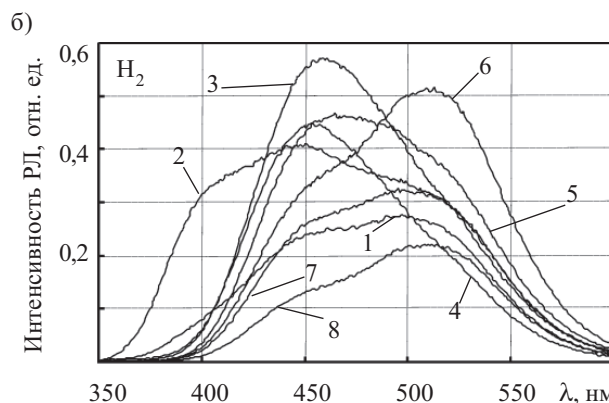
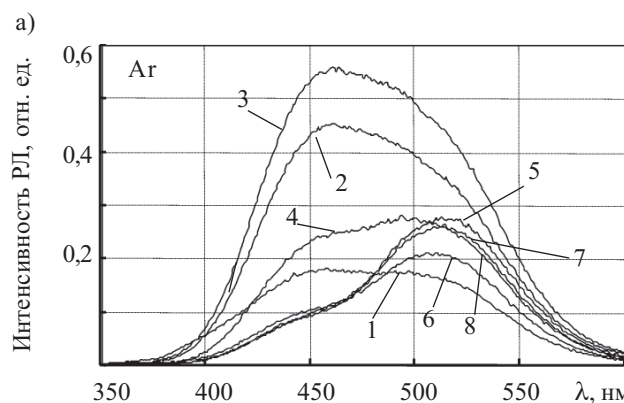


Рис. 4. Спектры рентгенолюминесценции ZnS (8) и образцов ТР ZnS–ZnTe, полученных при спекании в атмосфере аргона (а) и водорода (б) порошков с различным содержанием ZnTe в шихте (в % от массы):

1 — 0,5 %; 2 — 1 %; 3 — 2 %; 4 — 3 %; 5 — 5 %; 6 — 7 %; 7 — 10 %

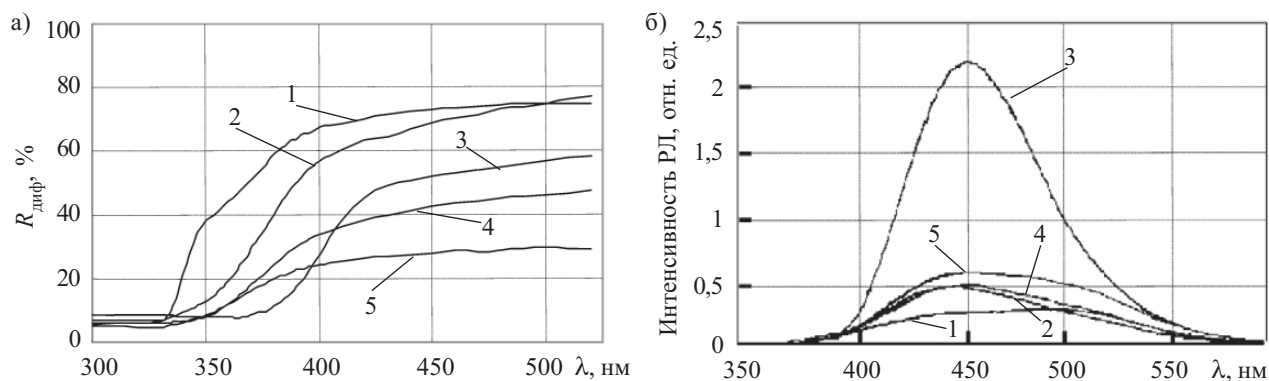


Рис. 5. Спектры диффузного отражения (а) и рентгенолюминесценции (б) образцов исходного ZnS (1) и твердого раствора ZnS+2% ZnTe до (2) и после (3—5) отжига при разных условиях:

3 — в Ar, 72 ч; 4 — в парах Zn, 4 ч; 5 — в парах Zn, 72 ч

сцинтилляционного материала CsI(Tl). Край полосы поглощения в спектрах диффузного отражения отожженных образцов сдвинут по сравнению со спектрами неотожженных образцов того же состава, что можно объяснить увеличением количества растворенного теллура в системе. Также следует отметить, что результаты рентгенофазового анализа (РФА) показали кардинальное изменение содержания фаз при указанной термообработке. Если до отжига в составе образца, в основном, наблюдалась фаза вюрцита, то после отжига в инертной атмосфере при 1000°С это, в основном, была фаза сфалерита (табл. 3). В случае отжига в парах цинка подобное фазовое превращение не наблюдается. Кроме того, РФА показал, что параметры решетки каждой фазы заметно превышают параметры чистых вюрцита и сфалерита, что свидетельствует о наличии теллура в решетке сульфидов цинка.

Таким образом, установлено, что спекание смеси порошков ZnS и ZnTe в атмосфере аргона или водорода при 1270 К в течение 3 часов приводит к образованию твердого раствора $\text{ZnSe}_{1-x}\text{Te}_x$ в области $0,01 \leq x \leq 0,1$, а его состав зависит от газовой среды.

Спекание порошков в водороде приводит к более эффективному образованию твердого раствора, благодаря протеканию химических реакций, приводящих к разрушению слоя ZnO, который ограничивает скорость спекания.

Последующий отжиг материала в инертной атмосфере приводит к перестройке решетки, увеличению светового выхода более чем в 20 раз, формированию новой полосы излучения и снижению уровня послесвечения до 2—3% через 20 мс. Полученные результаты могут быть использованы при изготовлении качественных сцинтилляционных материалов на основе твердых растворов $\text{ZnSe}_{1-x}\text{Te}_x$.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Галкин С. Н., Гальчинецкий Л. Н., Катрунов К. А. и др. Изучение взаимодействия компонентов в системе ZnSe-ZnTe-Se-H_2 // Журнал неорганической химии. — 1993. — Т. 38, № 42. — С. 711—713. [Galkin S. N., Gal'tsinetskii L. N., Katrunov K. A. i dr. // Zhurnal neorganicheskoi khimii. 1993. Vol. 38, N 42. P. 711]
2. Старжинский Н. Г., Гринев Б. В., Гальчинецкий Л. П., Рыжиков В. Д. Сцинтилляторы на основе соединений A^2B^6 . — Харьков: Институт монокристаллов, 2007. [Starzhinskii N. G., Grinev B. V., Gal'chinetskii L. P., Ryzhikov V. D. Stsintillyatory na osnove soedinenii A^2B^6 . Khar'kov. Institut monokristallov. 2007]

3. Твердые растворы в полупроводниковых системах. Справочник / Под ред. А. В. Новоселовой. — М.: Наука, 1978. [Tverdye rastvory v poluprovodnikovyykh sistemakh. Spravochnik / Pod red. A. V. Novoselovoi. Moscow. Nauka 1978]
4. Карапет'янц М. Х. Химическая термодинамика. — М.: Химия, 1975. [Karapet'yants M. Kh. Khimicheskaya termodinamika. M. Khimiya. 1975]
5. Термические константы веществ / Под ред. В. П. Глушко. — М.: ВИНТИ, 1966. [Termicheskie konstanty veshchestv / Pod red. V. P. Glushko. Moscow. VINITI 19666]
6. Верятин У. Д., Маширев В. П., Рябцев Н. Г. и др. Термодинамические свойства неорганических веществ. — М.: Атомиздат, 1965. [Veryatin U. D., Mashirev V. P., Ryabtsev N. G. i dr. Termodinamicheskie svoistva neorganicheskikh veshchestv. Moscow. Atomizdat. 1965]
7. Базы данных. Термические константы веществ [Электронный ресурс] / МГУ им. М. В. Ломоносова, Химический факультет. Режим доступа: www.chem.msu.ru/cgi-bin/tkv.pl?show=welcome.html [Bazy dannykh. Termicheskie konstanty veshchestv [Elektronnyi resurs] / MGU im. M. V. Lomonosova, Khimicheskii fakul'tet. Rezhim dostupa: www.chem.msu.ru/cgi-bin/tkv.pl?show=welcome.html]
8. Герузин Я. Е. Физика спекания. — М.: Наука, 1984. [Geguzin YA. E. Fizika spekaniya. Moscow. Nauka. 1984]
9. Теория и технология спекания / Под ред. Г. В. Самсонова. — Киев: Наукова думка, 1974. [Teoriya i tekhnologiya spekaniya / Pod red. G. V. Samsonova. Kiev. Naukova dumka. 1974]
10. Томашик В. Н. Полупроводниковые материалы на основе соединений типа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$, $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ / В кн.: Неорганическое материаловедение. Т. 2. Материалы и технологии // Под ред. В. В. Скорохода, Г. Г. Гнесина. — Киев: Наукова думка, 2009. [Tomashik V. N. / V kn.: Neorganicheskoe materialovedenie. T. 2. Materialy i tekhnologii // Pod red. V. V. Skorokhoda, G. G. Gnesina. Kiev. Naukova dumka. 2009]
11. Химическая энциклопедия. — М.: Большая российская энциклопедия, 1992. [Khimicheskaya entsiklopediya. M. Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya. 1992]
12. Галкин С. Н., Гальчинецкий Л. П., Катрунов К. А. и др. Образование твердых растворов $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ при спекании порошков CdS и CdTe // Неорганические материалы. — 1992. — Т. 28. — С. 2058—2062. [Galkin S. N., Gal'chinetskii L. P., Katrunov K. A. i dr. // Neorganicheskie materialy. 1992. Vol. 28. P. 2058]
13. Галкин С. Н., Гальчинецкий Л. П., Дмитриев Ю. Н. и др. Изучение процесса образования твердых растворов $\text{ZnSe}_{1-x}\text{Te}_x$ при спекании порошков ZnS и ZnTe. // Журнал неорганической химии. — 1990. — Т. 35. — № 12. — С. 3178. [Galkin S. N., Gal'chinetskii L. P., Dmitriev Yu. N. i dr. // Zhurnal neorganicheskoi khimii. 1990. Vol. 35. N 12. P. 3178]
14. Казанкин О. И., Марковский Л. Я., Миронов И. А. и др. Неорганические люминофоры. — Л.: Химия, 1975. [Kazankin O. I., Markovskii L. YA., Mironov I. A. i dr. Neorganicheskie lyuminoformy. L. Khimiya. 1975]
15. Морозова Н. К., Кузнецов В. А. Сульфид цинка. Получение и оптические свойства. — М.: Наука, 1987. [Morozova N. K., Kuznetsov V. A. Sul'fid tsinka. Poluchenie i opticheskie svoistva. Moscow. Nauka. 1987]

К. ф.-м. н. Н. С. БОЛТОВЕЦ, к. ф.-м. н. С. Б. МАЛЬЦЕВ

Украина, г. Киев, НИИ «Орион»
E-mail: ndiorion@tsua.net

РАЗВИТИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЧ-ТЕХНОЛОГИЙ В НИИ «ОРИОН» (к пятидесятилетию НИИ «Орион»)

В марте 2011 года исполняется 50 лет со дня основания научно-исследовательского института «Орион» – одного из старейших институтов прикладной науки страны с богатыми традициями. Государственный научно-исследовательский институт «Орион», первоначально называвшийся Институтом радиотехнических проблем АН УССР, был создан в соответствии со специальным постановлением правительства в 1961 г. на базе Лаборатории токов высокой частоты Института электротехники АН УССР. В 1968 г. Институт радиотехнических проблем был переименован в НИИ «Орион» и переведен в Министерство электронной промышленности СССР, в настоящее время находится в подчинении Министерства промышленной политики Украины.

Работы по созданию и развитию полупроводникового приборостроения в диапазоне частот до 200 ГГц в НИИ «Орион» были начаты в первой половине 1970-х годов с создания собственной производственно-технологической базы, обеспечивающей изготовление широкой номенклатуры полупроводниковых приборов и компонентов СВЧ на основе кремния и арсенида галлия. За эти годы в НИИ была создана научная школа исследования и разработки полупроводниковых СВЧ-приборов и модулей миллиметрового диапазона длины волны. Во многом этому способствовали научные и деловые контакты с родственными предприятиями отрасли, а также с институтами Академий наук Украины и России.

В настоящее время на производственных площадях НИИ «Орион» (более 2000 м²) организованы технологические линии, обеспечивающие замкнутый цикл изготовления СВЧ-диодов, начиная от исходных эпитаксиальных структур кремния и арсенида галлия и до сборки чипов с мезаструктурами в фирменные корпуса и комплексных испытаний диодов, включающих проверку их надежности. Для повышения воспроизводимости параметров технологических процессов и эффективности замкнутого технологического цикла разработок и производства СВЧ-диодов проведена модернизация серийного оборудования. Кроме того, разработаны, изготовлены и внедрены в производственный процесс новые оригинальные установки для высокоточной сборки корпусированных диодов миллиметрового диапазона.

Создание и организация промышленного выпуска полупроводниковых приборов диапазона милли-

метровых волн базировались на успешном решении ряда ключевых и проблемных вопросов, основные из которых приведены ниже.

Проведена оптимизация профилей легирования и конфигурации мезаструктур методами математического и конструкторско-технологического моделирования. На основе разработанных специалистами НИИ «Орион» локально-полевой модели и алгоритмов проведено моделирование IMPATT-диодов $p^+-p-n-n^+$ - и p^+-n-n^+ -типов непрерывного и импульсного режимов работы в 2-, 4-, 5- и 8-мм диапазонах длины волны. Созданы прикладные пакеты информации с импедансными характеристиками диодов для разных режимов работы, а также определены условия достижения максимальных значений мощности и эффективности при заданных тепловых режимах активной области. Результаты моделирования используются при проектировании диодов и СВЧ-компонентов на их основе.

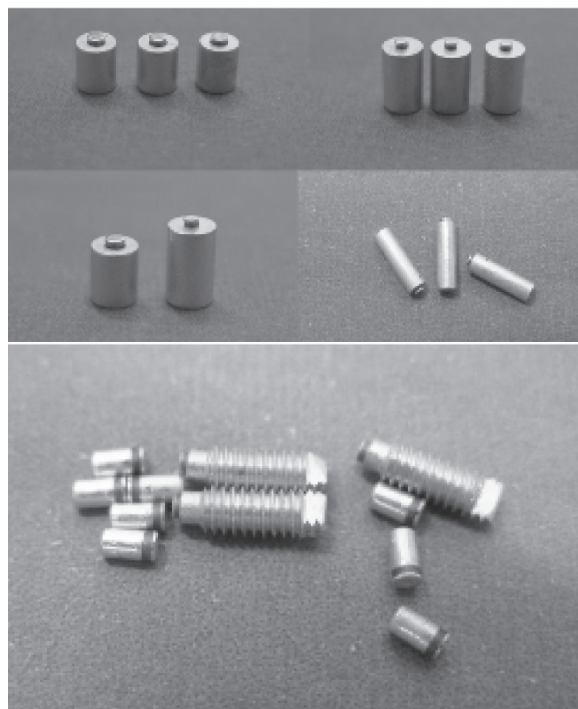


Рис. 1. Корпусированные кремниевые IMPATT-диоды (а) и GaAs-диоды Ганна (б)

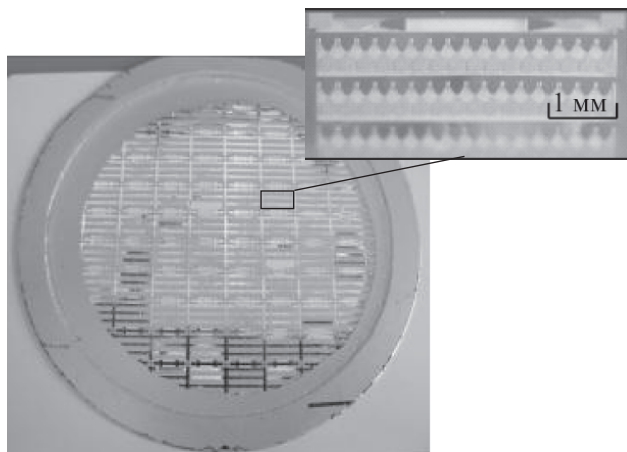


Рис. 2. Кремниевые быстродействующие переключа-
тельные $p-i-n$ -диоды миллиметрового диапазона с ба-
лочными выводами

Проведены комплексные исследования формиро-
вания контактов к твердотельным СВЧ-приборам [1].
Созданы высокостабильные контактные системы к
кремниевым [2, 3], карбид-кремниевым [4, 5], арсе-
нид-галлиевым, нитрид-галлиевым [6, 7] и фосфид-
индиевым приборным структурам [8, 9]. Разработки
были направлены на создание контактных систем,
которые обеспечивают минимальное контактное элек-

трическое и тепловое сопротивление, стабильных при
длительной эксплуатации (при температуре 200—
250°C) и совместимых с технологическими процес-
сами изготовления мезоструктур и сборки диодов
[10]. На основе комплексных исследований опреде-
лены наиболее перспективные контактные системы на
основе Pd, Pt, TiB_2 , которые применяются в настоя-
щее время в НИИ «Орион» в процессе производства
кремниевых и арсенид-галлиевых СВЧ-диодов.

Изучена стабильность параметров IMPATT-дио-
дов, диодов Ганна и переключаемых диодов с кон-
тактными системами на основе Pd, Pt, TiB_2 при мо-
делировании длительной эксплуатации в ускоренных
режимах и при воздействии γ -радиации [11]. Время
медианной наработки IMPATT-диодов и диодов Ган-
на при температуре активной области 220°C состав-
ляет не менее $(3-4) \cdot 10^6$ часов. Время наработки пе-
реключаемых диодов при температуре 150°C пре-
вышает $1,5 \cdot 10^6$ часов.

Все это позволило разрабатывать, изготавливать
и выпускать в диапазоне частот 30—155 ГГц крем-
ниевые IMPATT-диоды непрерывного и импульсного
режимов работы, GaAs-диоды Ганна (рис. 1), крем-
ниевые $p-i-n$ -диоды и варикапы с балочными выво-
дами (рис. 2).

Параметры разработанных в НИИ «Орион» дио-
дов не уступают лучшим мировым образцам (см.
табл. 1—4).

Таблица 1

Параметры кремниевых IMPATT-диодов импульсного режима работы

Наименование параметра, единица измерения	Типичные значения		
	УКА 802	УКА 803	УКА 805
Частотный диапазон, ГГц	33—37	92—96	135—155
Импульсная выходная мощность, Вт	20	10	2
Пробивное напряжение, В	35—40	13—16	10,5—12,5
Рабочий ток, А	8—15	10—12	2—5
Длительность СВЧ-импульса, нс	100—300	100—150	100—150
Емкость при $U=0$ В, пФ	12—22	6—8	2—6
Корпус	ОР-1	ОР-4	ОР-5

Таблица 2

Параметры кремниевых IMPATT-диодов непрерывного режима работы

Наименование параметра, единица измерения	Типичные значения			
Частотный диапазон, ГГц	33—37	58—62	92—96	130—150
Выходная мощность, Вт	0,20	0,20	0,15	0,05
Пробивное напряжение, В	32—40	20—26	12—15	10—12
Рабочее напряжение, В	38—46	26—32	18—31	16—18
Рабочий ток, мА	80—120	100—150	150—200	180—260
Емкость при $U=0$ В, пФ	1,3—1,8	0,9—1,2	0,7—1,1	0,5—0,8

Таблица 3

Параметры арсенид-галлиевых диодов Ганна непрерывного режима работы

Наименование параметра, единица измерения	Типичные значения	
	УАА 701	УАА 702
Частотный диапазон, ГГц	41—43	30,0—37,5
Выходная мощность, мВт	0,5—1,0	50—100
Рабочее напряжение, В	4,0	5,5
Рабочий ток, А	0,12	0,5—1,0
Корпус	ОР-6	ОР-6

В настоящее время в НИИ «Орион» проводятся также фундаментальные и прикладные исследования и ведутся разработки, направленные на создание нового поколения СВЧ-приборов на основе кремния [12, 13], арсенида галлия, фосфида индия [14], нитрида галлия [15], карбида кремния [16, 17], а также синтетического алмаза [18].

Имеющиеся технологии, модернизированная технологическая база и высококвалифицированный персонал обеспечили решение фундаментальных задач оптимизации конструкций микроволновых диодов и трансформации импеданса диодов, что позволило создать параметрические ряды диодов и широкую номенклатуру СВЧ-устройств на их основе. При этом были созданы физико-технологические основы производства СВЧ-диодов миллиметрового диапазона длины волны и выполнены комплексные исследования, направленные на обеспечение их высоких энергетических и надежных характеристик, а также на организацию мобильного производства широкой номенклатуры СВЧ-диодов в условиях рыночной экономики.

Стабильное функционирование собственной производственно-технологической базы изготовления СВЧ-диодов во многом обеспечивало и обеспечивает лидерство НИИ «Орион» в освоении техники миллиметрового диапазона длины волны, поскольку на-

личие собственных эффективных активных приборов в этом перспективном диапазоне позволяет создавать активные и пассивные СВЧ-приборы и модули. На их основе специалистами предприятия были разработаны различные классы твердотельных компонентов и устройств, совокупность которых составляет компонентную базу радиотехнической аппаратуры, систем и комплексов, в том числе:

— многофункциональные твердотельные устройства (синтезаторы частот, приемные, передающие и приемопередающие СВЧ-модули);

— однофункциональные полупроводниковые СВЧ-компоненты (генераторы, усилители, умножители частоты, смесители, переключатели, аттенюаторы, модуляторы, фазовращатели).

Выполненные специалистами НИИ разработки являются инновационными, базируются на предложенных и развитых в НИИ «Орион» новых технических решениях и принципах построения, что позволило оптимизировать схемы и конструкции твердотельных компонентов и модулей диапазона ММВ с целью достижения максимальных энергетических, диапазонных и спектральных характеристик приборов. Это обеспечило создание отвечающей самым современным требованиям компонентной базы перспективной радиотехнической аппаратуры диапазона миллиметровых волн, которая вполне удовлетворяет схмотехническим запросам разработчиков радиоэлектронной аппаратуры, оборудования и систем этого диапазона (см. табл. 5).

Технические решения, которые применены в созданных специалистами НИИ «Орион» СВЧ-компонентах, защищены 411 авторскими свидетельствами СССР и патентами Украины, России, США; по результатам исследований напечатано более чем 2150 научных трудов в периодических научно-технических отечественных и иностранных изданиях. За время существования НИИ в его стенах подготовлено более 70 кандидатов и докторов наук. За выдающиеся достижения в разработке и организации промышленного производства электровакуумных и полупроводниковых приборов 22 ученым и инженерно-техническим работникам предприятия присвоено

Таблица 4

Параметры кремниевых быстродействующих переключаемых диодов с балочными выводами

Наименование параметра, единица измерения	Типичные значения			
	УКА502 А-1	УКА502 Б-1	УКА502 В-1	УКА502 Г-1
Общая емкость на частоте $f=1$ МГц при $U_R=10$ В, пФ	0,02—0,04	0,05—0,07	0,08—0,12	0,13—0,20
Постоянное обратное напряжение, В, при $I_R=1$ мкА, не менее	40	40	40	40
Прямое сопротивление потерь, Ом, на частоте $f=3,5$ ГГц при $I_F=10$ мА, не более	2,0	2,0	2,0	2,0
Время обратного восстановления, нс, при $I_F=(10\pm 0,1)$ мА, $U_{RM}=(10\pm 0,1)$ В, $\tau_M=0,2\pm 0,1$ мкс, не более	15	15	15	15
Габаритные размеры, мм, не более	0,9×0,28×0,05	0,9×0,28×0,05	0,9×0,28×0,05	0,9×0,28×0,05

Твердотельная компонентная база СВЧ-электроники производства НИИ «Орион»

Многофункциональные модули СВЧ	ППМ для радиолокационной аппаратуры																
	ППМ для аппаратуры и систем связи																
	Синтезаторы частот для РЛС и систем связи																
	ППМ для научных исследований																
Генераторные и усилительные модули СВЧ	Генераторы и усилители непрерывного режима																
	Генераторы и усилители импульсного режима																
	Генераторы с перестройкой частоты																
	Генераторы шума																
	Малошумящие усилители																
Преобразовательные модули СВЧ	Умножители частоты высокой кратности																
	Смесители частоты																
	Детекторы																
Управляющие модули СВЧ на $p-i-n$ -диодах	Модуляторы																
	Аттенюаторы																
	Многоканальные переключатели																
	Дискретные фазовращатели																
Диапазон частот, ГГц		1	15	30	40	60	100	140	200	300							

звание Лауреата Государственной премии Украины в области науки и техники.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Агеев О. А., Беляев А. Е., Болтовцев Н. С. и др. Фазы внедрения в технологии полупроводниковых приборов и СБИС// Состояние и перспективы развития функциональных материалов для науки и техники.— Харьков: НТК «Институт монокристаллов», 2008. [Ageev O. A., Belyaev A. E., Boltovets N. S. i dr. // Sostoyanie i perspektivy razvitiya funktsional'nykh materialov dlya nauki i tekhniki. Khar'kov. NTK «Institut monokristallov». 2008]
2. Беляев А. Е., Болтовцев Н. С., Капитанчук Л. М. и др. Омические контакты Au-Ti-n⁺-Si и Au-Ti-Pd₂Si-n⁺-Si к кремниевым СВЧ-диодам // Техника и приборы СВЧ.— 2009.— №2.— С. 31—34. [Belyaev A. E., Boltovets N. S., Kapitanchuk L. M. i dr. // Tekhnika i Pribory SVCh. 2009. N 2. P. 31]
3. Патент Украины № 49867. Лавино-пролётный диод з термостійкою контактною системою / Болтовець М. С., Веремійченко Г. М., Коростинська Т. В. та ін.— 11.05.2010. [Patent Ukrainy № 49867. Lavino-prolittnyi diod z termostiikoju kontaktnoyu sistemoyu / Boltovets' M. S., Veremiichenko G. M., Korostins'ka T. V. ta in. 11.05.2010]
4. Болтовцев Н. С., Борисенко А. Г., Иванов В. Н. и др. Формирование мезаструктур 4HSiC p-i-n-диодов методом ионно-плазменного травления // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре.— 2009.— № 5.— С. 45—48. [Boltovets N. S., Borisenko A. G., Ivanov V. N. i dr. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature. 2009. N 5. P. 45]
5. Беляев А. Е., Болтовцев Н. С., Иванов В. Н. и др. Термо- и радиационно стабильные контакты к SiC на основе квазиморфных пленок ZrB₂ // Физика и техника полупроводников.— 2009.— Т. 43.— № 6.— С. 755—758. [Belyaev A. E., Boltovets N. S., Ivanov V. N. i dr. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2009. Vol. 43. N 6. P. 755]
6. Беляев А. Е., Болтовцев Н. С., Иванов В. Н. и др. Свойства контактов GaN(SiC)-Ti(Zr)B_x, подвергнутых быстрому термоотжигам // Физика и техника полупроводников.— 2009.— Т. 43.— № 8.— С. 1125—1130. [Belyaev A. E., Boltovets N. S., Ivanov V. N. i dr. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2009. Vol. 43. N 8. P. 1125]
7. Беляев А. Е., Болтовцев Н. С., Витусевич С. А. и др. Влияние микроволновой обработки на механизмы протекания тока в омических контактах Au-TiB_x-Al-Ti-n⁺-n-n⁺-GaN-Al₂O₃ // Физика и техника полупроводников.— 2010.— Т. 44.— Вып. 6.— С. 775—781. [Belyaev A. E., Boltovets N. S., Vitusevich S. A. i dr. / Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2010. Vol. 44. Iss. 6. P. 775]
8. Болтовцев Н. С., Иванов В. Н., Ковтонюк В. М. и др. Диоды Ганна из InP с катодным контактом, инжектирующим «горячие» электроны. Часть 1. Межфазные взаимодействия в катодных контактах // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре

- ре.— 2010.— № 1.— С. 1—4. [Boltovets N. S., Ivanov V. N., Kovtonyuk V. M. i dr. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature. 2010. N 1. P.1]
9. Патент України на корисну модель № 49990. Діод Ганна з фосфіду індія / Беляєв О. Є., Конакова Р. В., Кудрик Я. Я. та ін.— 25.05.2010. [Patent Ukrayini na korisnu model' № 49990. Diod Ganna z fosfidu indiya / Belyaev O. E., Konakova R. V., Kudrik Ya. Ya. та ін. 25.05.2010]
10. Беляев А. Е., Басанец В. В., Болтовец Н.С. и др. Влияние перегрева $p-n$ -перехода на деградацию мощных импульсных кремниевых лавинно-пролетных диодов // Физика и техника полупроводников.— 2011.— Т. 45, вып. 2.— С. 256—262. [Belyaev A. E., Basanets V. V., Boltovets N.S. i dr. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2011. Vol. 45, iss. 2. S. 256]
11. Belyaev A. E., Boltovets N. S., Venger E.F. et al. Physico-Technological Aspects of Degradation of Silicon Microwave Diodes.— Kiev: Akadempriodyka, 2011.
12. Басанец В. В., Болтовец Н. С., Зоренко А. В. и др. Мощные кремниевые импульсные лавинно-пролетные диоды 8-мм диапазона // Техника и приборы СВЧ.— 2009.— № 1.— С.27—30. [Basanets V. V., Boltovets N. S., Zorenko A. V. i dr. // Tekhnika i pribory SVCh. 2009. N 1. P. 27]
13. Кривуца В. А., Басанец В.В., Болтовец Н.С. и др. Кремниевые высокочастотные бескорпусные переключательные СВЧ $p-i-n$ -диоды с пробивным напряжением не менее 2000 В // Техника и приборы СВЧ.— 2010.— № 1.— С. 16—18. [Krivutsa V. A., Basanets V.V., Boltovets N.S. i dr. // Tekhnika i pribory SVCh. -2010. N 1. P. 16]
14. Иванов В. Н., Ковтонюк В. М., Раевская Н. С., Николаенко Ю. Е. Особенности технологии и конструирования InP- диодов Ганна / / Техника и приборы СВЧ.— 2009.— № 1.— С.31—33. [Ivanov V. N., Kovtonyuk V. M., Raevskaya N. S., Nikolaenko Yu. E. // Tekhnika i pribory SVCh. 2009. N 1. P. 31]
15. Беляев А. Е., Болтовец Н. С., Иванов В. Н. и др. Радиационные дефекты в многослойных омических контактах Au-Ti-Al-Ti-n-GaN // Физика и техника полупроводников.— 2009.— Т. 43, №7.— С. 904—908. [Belyaev A. E., Boltovets N. S., Ivanov V. N. i dr. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2009. Vol. 43, N 7. P. 904]
16. Camara N., Zekentes K., Romanov L. P. et al. Microwave $p-i-n$ -diodes and switches based on 4H-SiC // IEEE Electron Dev. Lett.— 2006.— Vol. 27, N 2.— P. 108—110.
17. Агеев О. А., Беляев А. Е., Болтовец Н. С. и др. Карбид кремния: технология, свойства, применение.— Харьков: ИСМА, 2010. [Ageev O. A., Belyaev A. E., Boltovets N. S. i dr. Karbid kremniya: tekhnologiya, svoystva, primenenie. Khar'kov. ISMA. 2010]
18. Болтовец Н. С., Беляев А. Е., Конакова Р. В. и др. Формирование линий передач СВЧ интегральных схем на подложках из синтетического алмаза // Техника и приборы СВЧ.— 2009.— № 2.— С. 26—30. [Boltovets N. S., Belyaev A. E., Konakova R. V. i dr. // Tekhnika i pribory SVCh. 2009. N 2. P. 26]

АННОТАЦІЇ К СТАТТЯМ НОМЕРА

Волоконно-оптичні демультиплексори з підвищеною стійкістю до механічної дії. Дементьєв С. Г., Ключник М. Т., Кузнєцов В. А., Яковлєв М. Я.

Розглянуто можливості створення сплавлених одно-модових демультиплексорів із підвищеною стійкістю до механічної дії. Представлено технологію та обладнання для виготовлення таких пристроїв. Досліджено залежності резонансних частот механічних коливань ділянки сплавлювання від конструктивних параметрів демультиплексорів.

Автоматизована діагностика хімічних джерел струму. Дзензерський В. О., Бєда М. О., Житник М. Я., Лісничий В. М., Плаксін С. В., Ткаченко Ю. О.

Запропоновано метод автоматизованої діагностики хімічних джерел струму (ХДС), в основу якого покладено аналіз хронопотенціограм, які відображають кінетику електрохімічного процесу, що відбувається в ХДС під впливом імпульсу струму, та їх подальшу програмну обробку для визначення параметрів ХДС.

Радіаційна стійкість ниткоподібних кристалів SiGe, що використовуються для сенсорів фізичних величин. Дружинін А. О., Островський І. П., Ховерко Ю. М., Литовченко П. Г., Павловська Н. Т., Павловський Ю. В., Цмоць В. М., Поварчук В. Ю.

Вивчено вплив опромінення γ -квантами (випромінювання Co^{60}) з дозами до $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ та магнітного поля з індукцією до 14 Тл на електропровідність ниткоподібних кристалів $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,03$) з питомим опором $0,08\text{—}0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ в інтервалі температур $4,2\text{—}300 \text{ К}$. Встановлено, що опір кристалів слабо змінюється в процесі опромінення дозами до $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, в той же час спостерігаються істотні зміни магнітоопору. На основі проведених досліджень запропоновано умови створення радіаційно стійких сенсорів деформації, дієздатних в умовах сильних магнітних полів.

Збільшення чутливості сенсорів зміни показника заломлення середовища на основі поверхневого плазмонного резонансу. Ушенін Ю. В., Самойлов А. В., Христосенко Р. В.

Проаналізовано результати комп'ютерного моделювання вимірів кутового спектру поверхневого плазмонного резонансу в металевих плівках за допомогою приладу ПЛАЗМОН-5 з інфрачервоним випромінювачем. Показано, що використання інфрачервоного джерела випромінювання дозволяє поліпшити чутливість сенсору в порівнянні з джерелом видимого світла. На прикладі виміру показників заломлення діелектрика приладом ПЛАЗМОН-5 здійснено експериментальну перевірку теоретичних розрахунків.

Fiber-optic demultiplexers with high mechanical resistance. Dementyev S. G., Klyuchnik N. T., Kuznetsov V. A., Yakovlev M. Ya.

The paper observes possibilities of fused fiber-optic multiplexer-demultiplexer creation with resistance to mechanical effect. Fabrication method and the equipment for their production are presented. Resonant frequency of weld area mechanical oscillations dependences from fused fiber-optic demultiplexer design characteristics are investigated.

Automated diagnosis of chemical current sources. Dzenzerskiy V. A., Beda M. A., Zhitnik N. E., Lesnichiy V. N., Plaksin S. V., Tkachenko Yu. O.

A method for automated chemical current sources (CSC) diagnosis, which is based on the chronopotentiogram analysis displaying the kinetics of electrochemical process in CSC under the influence of a current pulse followed by program processing for the characterization of CSC.

Stability to irradiation of SiGe whisker crystals used for sensors of physical values. Druzhinin A. A., Ostrovskiy I. P., Khoverko Yu. N., Litovchenko P. G., Pavlovskaya N. T., Pavlovskiy Yu. V., Tsmots V. M., Povarchuk V. Yu.

An influence of γ -irradiation (Co^{60}) with dose up to $1\text{—}10^{18} \text{ cm}^{-2}$ and magnetic field with induction up to 14 T on conduction of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,03$) whisker crystals with resistivity of $0,08\text{—}0,025 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$ in temperature range $4,2\text{—}300 \text{ K}$ have been studied. It is shown that whisker crystals resistance faintly varies under irradiation with dose $2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, while their magnetoresistance substantially changes. The strain sensors stable to irradiation action operating in high magnetic fields on the base of the whiskers have been designed.

Increase in sensitivity of sensor units of environment refraction index change based on superficial plasmon resonance. Ushenin Yu. V., Samoylov R. V., Khristosenko R. V.

Results of computer modeling of an angular spectrum superficial plasmon resonance in metal films measurements with device PLAZMON-5 with infra-red radiator are analysed. It is shown that use of an infra-red source of radiation allows to improve sensitivity of sensor device in comparison with source of visible light. On an example of dielectric refraction indexes measurement with PLAZMON-5 device experimental check of theoretical calculations has been carried out.

Температурна залежність робочих характеристик п'єзоелектричних сенсорів на основі полівініліденфториду. Ревенюк Т. А., Федосов С. Н.

Встановлено, що п'єзоелектричні сенсори на основі поліаризованих плівок полівініліденфториду (ПВДФ) надійно працюють у діапазоні температури від -20 до $+80^{\circ}\text{C}$. При температурі експлуатації 80°C впродовж двох років п'єзоефективний коефіцієнт d_{33} зменшується на 2%, що є припустимим. За більш високих температур відбувається незворотне зменшення п'єзоефективності. Нижня границя робочого діапазону наближена до температури склування аморфної фази ПВДФ. Відпал плівок при 80°C забезпечує стабільність характеристик сенсорів протягом кількох років.

Автотрасовий газоаналізатор. Дев'ятко Г. О., Кучменко В. А., Лацис С. А., Орлов М. О., Партишев В. О., Подольський В. Я.

Визначено джерела забруднення повітря вздовж автомагістралей населених пунктів. Розглянуто принципи роботи, побудову та методи покращення селективності електрохімічних сенсорів автотрасового газоаналізатора. Приведено результати експлуатації автотрасового газоаналізатора у складі системи екологічного моніторингу ступеню забруднення повітря вздовж автомагістралей м. Києва.

Роль пластичної деформації в одержанні нанокремнію. Сминтина В. А., Кулініч О. А., Яцунський І. Р., Марчук І. О.

Показано якісний і кількісний аналіз зв'язку пластичної деформації поверхні і приповерхневої області кремнію із отриманням наноструктурованого кремнію. Показано, що в результаті високотемпературного окислення кремнію, а також ряду додаткових причин в приповерхневих шарах утворюється складна дефектна область, яка складається з шару дрібноблокового кремнію і шару, що містить дислокаційні сітки. Стравлювання діоксиду кремнію і обробка різними вибірконими протравлювачами поверхні дозволяє отримувати наноструктурований кремній із заданою топологією.

Деякі особливості обмежувача струму на польовому транзисторі. Карімов А. В., Джуряєв Д. Р., Йодгорова Д. М., Рахматов А. З., Абдулхасєв О. А., Каманов Б. М., Тураєв А. А.

Проведено дослідження залежності струму стабілізації від зовнішнього опору, що з'єднує витік і затвор польового транзистора в режимі обмежувача струму — двополосника. При припущенні про квадратичну залежність струму від запірної напруги експериментальні криві добре узгоджуються з розрахунковими даними. Встановлений взаємозв'язок між струмом стабілізації і зовнішнім опором має бути цікавим при розробці джерел і обмежувачів струму.

Temperature dependence of working characteristics of piezoelectric sensors based on polyvinylidene fluoride. Revenyuk T. A., Fedosov S. N.

It has been found that the piezoelectric sensors produced on the basis of electrified films of polyvinylidene fluoride (PVDF) work reliably in the temperature range from -20°C to $+80^{\circ}\text{C}$. At the operating temperature of 80°C d_{33} piezocoefficient decreases by 2% during two years that is permissible. At higher temperatures irreversible reduction of the piezocoefficient was observed. The lowest temperature of the working range is close to the glass transition temperature of the amorphous phase of PVDF. Annealing of the films at 80°C ensures stable characteristics of the sensors within a few years.

Alignment gas analyzer. Devyatko G. A., Kuchmenko V. A., Latsis S. A., Orlov M. A., Partyshev V. O., Podolskiy V. Y.

The air pollution sources along populated area motorways are defined. The principle of working, development and ways of selectivity improvement of the alignment gas analyzer electrochemical sensors are shown. The operation alignment gas analyzer results in the ecological monitoring system of the pollution level in the air along motor roads in Kiev are presented.

Plastic deformation in nanostructure silicon formation. Smyntyna V. A., Kulinich O. A., Yatsunskiy I. R., Marchuk I. O.

The quantity and quality analysis of plastic deformation and near-surface silicon layers with nanostructure silicon formation are given in this paper. It is shown, due to high-temperature oxidation and other factors the complex defect structure is generated in near-surface silicon layers. It consists of a disordered silicon layer and a layer of dislocation networks. Silicon dioxide etching and additional chemical treatment allows to obtain nanostructured silicon with given properties.

Some features of a current limiter on the field-effect transistor. Karimov A. V., Djurayev D. R., Yodgorova D. M., Rakhmatov A. Z., Abdulkhayev O. A., Kamanov B. M., Turayev A. A.

The paper presents researches of dependence of stabilization current from the external resistance connecting the source and the gate of the field-effect transistor in the mode of the current limiter — a two-pole terminal. At the assumption of quadratic dependence of a current from blocking voltage, experimental curves agree well with the calculation data. The established interrelation between a current of stabilization and external resistance is of interest by working out of sources and current terminators.

Моделювання температурних режимів в елементах мікроелектронних пристроїв. Гавриш В. І., Косач А. І.

За допомогою методу, заснованого на використанні узагальнених функцій, побудовано рівняння теплопровідності з розривними та сингулярними коефіцієнтами для ізотропної смуги із чужорідним включенням прямокутної форми. Із застосуванням методу інтегральних перетворень отримано аналітичне розв'язання цього рівняння у випадку, коли на одній з границь смуги здійснюється конвективний теплообмін із зовнішнім середовищем, а інша границя нагрівається тепловим потоком. При цьому проведено кусково-лінійну апроксимацію шуканої температури на границях чужорідного включення з використанням узагальнених функцій.

Проектування радіаторів з оптимальними масогабаритними параметрами. Шило Г. М., Огреніч Є. В., Гапоненко М. П.

Сформовано моделі ребристих радіаторів за допомогою засобів інженерного проектування, отримано співвідношення, що зв'язують розміри елементів з параметрами кордонів області працездатності радіаторів мінімальних маси, об'єму і масогабаритного показника. При цьому використовується ітераційний алгоритм, що враховує нелінійні властивості вагових функцій і гранично-допустимих вхідних теплових опорів радіатора. Проведено оцінювання масогабаритних показників стандартного і оптимальних в різних стратегіях проектування радіаторів.

Система охолодження випаровувально-конденсаційного типу для рентгенівських трубок. Гершуні О. Н., Ніщик О. П.

Наведено результати експериментального дослідження характеристик системи охолодження рентгенівського випромінювача, заснованої на діелектричних теплових трубах. Система охолодження суміщує високу ефективність теплопередачі і електроізоляційні властивості при напрузі на рівні 100 кВ.

Режим роботи двохкаскадного термоелектричного охолоджуючого пристрою, що забезпечує мінімальну інтенсивність відмов. Сочеслав Д. П.

Розглянуто модель взаємозв'язку показників надійності та основних значущих параметрів двохкаскадного термоелектричного охолоджуючого пристрою (ТЕП) з послідовним електричним з'єднанням каскадів. Отримано співвідношення, що дозволяють оцінити показники надійності, а саме інтенсивність відмов, при побудові двохкаскадного ТЕП, що працює в струмовому режимі, який забезпечує мінімальну інтенсивність відмов у широкому діапазоні перепадів температури з урахуванням теплового навантаження. Показано можливість використання цього режиму, коли превалюючою вимогою є забезпечення мінімальної інтенсивності відмов і максимальної вірогідності безвідмовної роботи каскадного ТЕП.

Simulation of temperature conditions in the elements of microelectronic devices. Gavrysh V. I., Kosach A. I.

The heat equation with discontinuous and singular coefficients for isotropic band with foreign rectangular inclusion has been built with the use of generalized functions based method. Using the of integral transformftions the analytical solution of this equation has been obtained in case when on one of the band bounds the convective heat transfer with the environment takes place, but the other is under the heat flow. The piecewise-linear approximation of the required temperature at the boundaries of foreign inclusions using generalized functions has been conducted.

Mass and overall optimization of radiator design. Shilo G. N., Ogrenich E. V., Gaponenko N. P.

The models of finned radiator are formed by computing aided engineering systems. The relations between sizes of construction elements and boundaries of operability domain are obtained for radiators of minimal mass, minimal volume and minimal overall parameters. Iteration algorithm is used. The non-linear characteristics of weight functions and allowable input heat resistances of radiator are applied in the algorithm. Mass and overall parameters of standard and optimal radiator are defined by different strategies.

Cooling evaporating-condensation type system for X-ray tubes. Gershuni A. N., Nishchik A. P.

The results of experimental investigations of the characteristics of the X-ray emitter cooling system, based on dielectric heat pipes are shown. The cooling system combines the high efficiency of heat transfer and electrical insulating properties at voltages of 100 kV.

The operating mode of the two-cascade thermoelectric cooling device providing the minimum failure rate. Socheslav D. P.

The model of interrelation of reliability indicators and the basic significant parameters of the two-cascade thermoelectric cooling device (TED) with consecutive electric connection of cascades is considered. The relations are received allowing to estimate reliability indicators, namely failure rate at construction two-cascade TED working in current mode, providing the minimum failure rate in a wide range of temperature drops taking into account thermal loading. Possibility of use of this mode when the prevailing requirement is maintenance of the minimum failure rate and the maximum probability of non-failure operation cascade TED is shown.

Високочастотний реактор з асиметричними електродами для однорідного плазмохімічного травлення напівпровідників. Дудін С. В., Лісовський В. О., Дахов О. М., Плетньов В. М.

Представлено результати експериментальних і теоретичних досліджень реактора для плазмово-хімічного травлення напівпровідникових матеріалів на базі ВЧ ємнісного розряду з асиметричними електродами. Отримано криві запалювання та області існування розряду для різних робочих газів (аргон, фреон, кисень). Знайдено залежності постійної напруги автозсуву від ВЧ-напруги, що подається на електрод. Виміряно радіальні профілі щільності струму іонів на оброблювану поверхню та їх поведінку при зміні параметрів розряду для різних газів. Проведено порівняння отриманих результатів з розрахунками, виконаними з використанням двовимірної математичної моделі OOPIC.

Обладнання для формування омичних контактів напівпровідникових приладів на основі сполук A_3B_5 . Александров С. Б., Крупальник К. М., Корнілов Н. О., Кондрат'єва Т. О.

Розглянуто особливості технологічного процесу формування омичних контактів напівпровідникових приладів на основі сполук A_3B_5 , загальні принципи побудови технологічних модулів. Показано результати, отримані за допомогою установок електронно-променевого напилення серії STE EB і установок швидкого термічного відпалу серії STE RTA.

3D-наноккомпозити — опалові матриці з включеннями металічного Co та слоїсті структури «опалова матриця — Co/Ir». Самойлович М. І., Ринкевич А. Б., Белянін А. Ф., Пащенко П. В.

Вивчено будову та можливості використання у НВЧ-техніці шаруватих структур Co/Ir на підкладках з регулярних пакувань наносфер SiO_2 (опалових матриць) та зразків опалових матриць, що містять у нанопорожнинах кобальт.

Ефективні сцинтиляційні матеріали на основі твердих розчинів $ZnS_{1-x}Te_x$ та перспективи їх застосування. Катрунов К. О., Лалаянц О. І., Гальчинецький Н. Г., Старжинський Н. Г., Жуков О. В., Галкін С. Н., Брильова К., Зеня І. М., Трубаєва О. Г.

Визначено оптимальний технологічний режим утворення твердого розчину $ZnS_{1-x}Te_x$ у зоні $0,0 \leq x \leq 0,1$. Показано, що використання водню при спіканні порошків призводить до більш ефективного утворення твердого розчину, завдяки протіканню хімічних реакцій, що призводять до руйнування шару ZnO. Подальший відпал в атмосфері Ar спричиняє збільшення світлового виходу, формування нової полоси випромінювання, зниження рівня післясвітіння та перебудову ґрат.

RF reactor with asymmetrical electrodes for reactive ion etching of semiconductors. Dudin S. V., Lisovskiy V. A., Dahov A. N., Pletniyov V. M.

Results of experimental and theoretical study of RF CCP reactor for reactive ion etching of semiconductors are presented. Breakdown curve and domain of the discharge existence are measured in various gases (argon, fluorocarbon, oxygen). The dependences of the DC selfbias potential on the RF voltage applied to the electrode have been found. The radial profiles of the ion current density to the processed surface and their behavior with the discharge parameters change are presented for various gases. The experimental data are compared to the numerical simulation results obtained using the OOPIC code.

The equipment for ohmic contacts formation in semi-conductor devices based on A_3B_5 connections. Aleksandrov S. B., Krupa'nik K. M., Kornilov N. O., Kondratyeva T. O.

Technological process features of ohmic contacts formation in semi-conductor devices based on A_3B_5 connections and the general principles of technological modules construction are considered. The results received by means of installations of an electron-beam evaporation of STE EB series and installations of fast thermal annealing of STE RTA series are shown.

3D-nanocomposites — the opal matrices with metal Co inclusions and the layered structures "opal matrices — Co/Ir". Samoylovich M. I., Rinkevich A. B., Belyanin A. F., Paschenko P. V.

Co/Ir films structure on substrates of perfect SiO_2 nanospheres packings (opal matrices) and samples of Co-contained opal matrices are studied. The abilities of nanocomposites application in SHF technics based on opal matrices as meta-materials are considered.

Effective scintillation materials based on solid solutions $ZnS_{1-x}Te_x$ and perspectives of their application. Katrunov K. A., Lalayantz A. I., Gal'chinetskiy L. P., Starzhinskiy N. V., Zhukov A. V., Galkin S. N., Brilyova Ye., Zenya I. M., Trubaeva O. G.

The optimal technological regime of formation $ZnS_{1-x}Te_x$ solid solution at spacing $0,0 \leq x \leq 0,1$ has been determined, and has been shown that fritting in hydrogen atmosphere results in more rapid reaction in comparison to argon due to chemical-thermal etching the ZnO layer out. Further annealing in the inert Ar atmosphere leads to the increase of the light output, to the intensive emission band formation and causes afterglow level reduction and the crystalline lattice rearrangement.

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2010 г.

Техническая политика

Обзор результатов работ по развитию конкурентоспособных направлений микроэлектроники, выполненных в 2007—2009 гг. в рамках Государственной программы. *Падалко В. Г., Николаенко Ю. Е., Высоцкий А. Н., Кончиц Н. В.*

2

Современные электронные технологии

Модуль солнечных батарей на основе соединений A_3B_5 с концентраторами солнечной энергии и системой теплоотвода. *Вакив Н. М., Круковский С. И., Николаенко Ю. Е., Круковский Р. С., Тимчишин В. Р., Сыворотка Н. Я.*

2

Выбор предпочтительных слоев для проводников при трассировке многослойных печатных плат. *Петросян Г. С., Полубасов О. Б.*

2

Новые компоненты для электронной аппаратуры

Фотодиод ультрафиолетового диапазона на основе селенида цинка. *Перевертайло В. Л., Добровольский Ю. Г., Попов В. М., Поканевич А. П., Мацкевич В. М., Рыжиков В. Д., Шабашкевич Б. Г., Юрьев В. Г.*

2

Перестраиваемая линия задержки сигнала СВЧ-диапазона на основе сегнетоэлектрических и алмазных пленок. *Афанасьев М. С., Митягин А. Ю., Чучева Г. В.*

3

Конденсаторы на основе интеркалата GaSe $\langle KNO_3 \rangle$. *Ковалюк З. Д., Коноплянко Д. Ю., Нетьяга В. В., Бахтинов А. П.*

3

Диоды Ганна из InP с катодным контактом, инжектирующим горячие электроны. Часть 1. Межфазные взаимодействия в катодных контактах. *Болтовец Н. С., Иванов В. Н., Ковтонюк В. М., Раевская Н. С., Беляев А. Е., Бобыль А. В., Конакова Р. В., Кудрик Я. Я., Миленин В. В., Новицкий С. В., Шеремет В. Н.*

5-6

Электронные средства: исследования, разработки

Эффект усиления фототока в фотодиодной структуре с прямо- и обратновключенными переходами. *Ёдгорова Д. М.*

1

Специализированное устройство электропитания. *Гунченко Ю. А., Банзак О. В., Селюков А. В., Куташев В. И.*

1

Радиоволновое охранное устройство на излучающем кабеле. *Прудис И. Н., Проць Р. В., Сторож В. Г.*

1

Особенности стирания информации с многодисковых винчестеров импульсным магнитным полем. *Герус С. В., Митягин А. Ю., Соколовский А. А., Темирязева М. П., Хлопов Б. В.*

1

Оценка структурной избыточности БИС с помощью помехоустойчивой кластеризации. *Щербакова Г. Ю.*

1

Оптимальный выбор стандартных несущих конструкций для электронных средств. *Ефименко А. А., Вильчинский А. И.*

2

Устройство формирования элементов оптоэлектронной акустооптической вычислительной среды. *Липинский А. Ю., Рудякова А. Н., Рудяков И. Ю., Данилов В. В.*

3

Лазерные устройства для измерения геометрических параметров трехмерных объектов. *Ильин В. Н., Дубешко А. В., Михеевич Д. А.*

3

Цифровой метод измерения коэффициента направленного отражения поверхности. *Иванченко И. А., Сантоний В. И., Смынтына В. А.*

3

Экспериментальное доказательство экситонно-плазменного фазового перехода Мотта. *Гаркавенко А. С.*

3

Моделирование электрических схем защиты с использованием силовых лавинных диодов. *Кравчина В. В., Нагорная Н. Н.*

4

Малогабаритный цифровой частотомер с высокой разрешающей способностью. *Криваль И. И., Скрипнюк А. И., Проценко В. А., Марьенко А. В.*

4

Контактные соединения в электронных печатных узлах, выполненные методом прокола фольги. *Ефименко А. А.*

4

Тепловизор на основе матричного фотоприемного устройства из 128×128 CdHgTe-фотодиодов. *Рева В. П., Голенков А. Г., Забудский В. В., Коринец С. В., Цибрий З. Ф., Гуменюк-Сычевская Ж. В., Бунчук С. Г., Апатская М. В., Лысюк И. А., Смолий М. И.*

4

Метод преобразования обычной разводки печатных плат в полигональную. *Муров С. Ю.*

4

Логические методы расчета надежности. *Левин В. И.*

4

Методика диагностики электронных пучков среднего уровня мощности по переходному излучению. *Воробьев Г. С., Дрозденко А. А., Шульга Ю. В., Барсук И. В.*

5-6

Повышение надежности контакта тонкопленочных резисторов. *Лугин А. Н., Оземша М. М.*

5-6

Оценка частотной границы допустимого использования приближенных моделей линий передачи при анализе цепей печатных плат. *Сиротко В. К.*

5-6

Автодинный спектрометр ядерного квадрупольного резонанса с равномерной частотной шкалой. *Самила А. П., Хандожко А. Г., Хандожко В. А.*

5-6

Системы передачи и обработки сигналов

Способ искажения информации о радиолокационных характеристиках объектов. *Василевский В. В., Головань В. Г., Головань А. В., Дроздов М. А., Хижняк Т. А.*

Многоканальные устройства цифровой обработки сигналов с ранжированной архитектурой. *Баранов П. Е., Шейк-Сейкин А. Н.*

Микропроцессорные устройства и системы

Микропроцессоры звездообразной структуры с расширенными функциональными возможностями. *Синегуб Н. И., Ситников В. С.*

Вопросы приборостроения

Алгоритм оценки состояния эргатических систем управления. *Скубилин М. Д., Стефаненко В. К., Финаев В. И.*

Сенсоэлектроника

Исследование влияния электронного облучения на кремниевые тензорезисторы. *Дружинин А. А., Марьямова И. И., Кутраков А. П., Лях-Кагуй Н. С., Маслюк В. Т., Мегела И. Г.*

Вихретоковый анизотропный термоэлектрический первичный преобразователь лучистого потока. *Ащеулов А. А., Бучковский И. А., Величук Д. Д., Романюк И. С.*

Системы контроля-мониторинга температуры и влажности среды на основе толстых пленок оксипинелей. *Вакив Н. М.*

Оптоэлектронные сенсоры газов на основе многоэлементных источников ИК-излучения. *Кабаций В. Н.*

Применение ионоселективных полевых транзисторов для ферментного анализа токсичных примесей в водных растворах. *Павлюченко А. С., Кукла А. Л., Голтвянский Ю. В.*

Датчики интегральной поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе МОП-транзисторов. *Перевертайло В. Л.*

Функциональная микро- и наноэлектроника

Ртутный микрозонд для исследования локальных электрофизических свойств полупроводниковых структур. *Попов В. М., Клименко А. С., Поканевич А. П., Шустов Ю. М.*

Получение арсенид-галлиевых структур силовых биполярных и полевых транзисторов методом газофазной эпитаксии. *Воронин В. А., Губа С. К., Курило И. В.*

Локальные свойства электрически активных дефектов в солнечных батареях на основе кремния. *Попов В. М., Клименко А. С., Поканевич А. П., Шустов Ю. М., Гаврилюк И. И., Панин А. И.*

Физико-технологические аспекты создания низковольтных ограничителей напряжения на основе кремния. *Рахматов А. З., Скорняков С. Л., Каримов А. В., Ёдгорова Д. М., Абдулхаев О. А., Бузруков У. М.*

Обеспечение тепловых режимов

Исследование режимов теплообмена в пульсационной тепловой трубе. *Кравец В. Ю., Наумова А. Н., Вовкогон А. Н.*

Исследование характеристик щелевого теплообменника с развитой поверхностью теплообмена. *Малкин Э. С., Николаенко Ю. Е., Дьячков М. И., Николаенко Т. Ю.*

Контурная тепловая труба для систем обеспечения тепловых режимов элементов радиоэлектронной техники. *Хайрнатов С. М.*

Влияние на теплопередачу в пульсационной тепловой трубе ее ориентации в пространстве. *Наумова А. Н., Кравец В. Ю.*

Технологические процессы и оборудование

Метод защиты поверхности расплавленного припоя от окисления. *Курмашев Ш. Д., Лавренова Т. И., Бугаёва Т. Н.*

Микроволновая обработка диэлектрических материалов в нерезонансных системах. *Демьянчук Б. А.*

Волоконно-оптические демультиплексоры для систем передачи информации. *Дементьев С. Г., Ключник Н. Т., Кузнецов В. А., Яковлев М. Я.*

Тенденции развития средств создания и анализа безмасляного вакуума. *Васильев Ю. К., Нестеров С. Б., Васильева Т. С.*

Широкоапертурный высокочастотный источник ионов низкой энергии с электронной компенсацией. *Дудин С. В., Рафальский Д. В., Зыков А. В.*

Фотоэлектростимулированная пассивация спектрометрических $Cd_{1-x}Zn_xTe$ -детекторов. *Загоруйко Ю. А., Христьян В. А., Федоренко О. А.*

Получение активных слоев InP в составе гетероструктур для диодов Ганна. *Вакив Н. М., Круковский С. И., Заячук Д. М., Михашук Ю. С., Круковский Р. С.*

Выбор микропривода механизма зажима и подачи проволоки в установках термозвуковой микросварки. *Ланин В. Л., Петухов И. Б., Шевцов В. В.*

Оптимизация струйной технологии изготовления токопроводящих элементов печатных плат. *Лесюк Р. И., Бобицкий Я. В., Котлярчук Б. К., Иллук В.*

Радиационная технология улучшения омических контактов к элементам электронной техни-

ки. Конакова Р. В., Колядина Е. Ю., Матвеева Л. А., Нелюба П. Л., Шинкаренко В. В. Технология сборки микросхем на гибком полиимидном носителе. Плис Н. И., Вербицкий В. Г., Жора В. Д., Волнистов В. Н., Грунянская В. П., Сергеева Н. Н.

Материалы электроники

Термостабильные интерференционные оксидные покрытия для активных элементов лазеров ИК-диапазона. Загоруйко Ю. А., Федоренко О. А., Коваленко Н. О., Кузьминов Е. А., Матейченко П. В.

Оптико-акустические эффекты в решетчатых упаковках (опаловые матрицы как метаматериал). Чернега Н. В., Кудрявцева А. Д., Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Клещева С. М. Стабильность свойств пьезокерамических материалов при внешних воздействиях. Кузенко Д. В., Бажин А. И., Дорофеева В. В., Гусакова Л. Г., Ищук В. М., Спиридонов Н. А.

Газочувствительные элементы на основе пленок SiPcCl_2 . Алиева Х. С., Сулейманов С. С., Муршудли М. Н.

Диагностика глубоких центров на границе пленка–подложка в тонкопленочных эпитаксиальных структурах GaAs. Горев Н. Б., Коджеспирова И. Ф., Привалов Е. Н.

Молекулярная модель и химическая связь теллура. Ащеулов А. А., Маник О. Н., Маник Т. О., Билинский-Слотыло В. Р.

Электрические и топологические свойства пленок оксидов, термически выращенных на подложках InSe. Катеринчук В. Н., Ковалюк З. Д., Хомяк В. В.

Свойства и практическое применение нанокристаллических пленок оксида церия. Максимчук Н. В., Шмырева А. Н., Борисов А. В. Свойства металлических контактов на пленках TiO_2 , изготовленных методом реактивного магнетронного распыления. Брус В. В., Ковалюк З. Д., Марьянчук П. Д., Орлецкий И. Г., Майструк Э. В.

Исследование стойкости слоев поликремния в КНИ-структурах при воздействии электронного облучения и сильного магнитного поля. Ховерко Ю. Н.

Зависимость диэлектрической проницаемости кристаллизующейся фазы стеклокерамики от времени спекания. Дмитриев М. В., Еримичой И. Н., Панов Л. И.

Метрология. Стандартизация

Уменьшение влияния пиротехнических зарядов на работу измерительных усилителей. Старцев В. И., Ямпольский Ю. С., Куценко А. П.

К истории науки и техники

80 лет со дня основания Московского энергетического института. Богатырев Е. А., Смольский С. М.

Становление и развитие Института физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАН Украины (к пятидесятилетию создания). Мачулин В. Ф.

Библиография

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2009 г.

ЧЕТВЕРТЫЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЙ ФОРУМ
«МРФ-2011»
«ПРИКЛАДНАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ»
КОНФЕРЕНЦИИ

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Харьков, ХНУРЭ, 18—21 октября

Секция 1. Радиолокационные системы

Секция 2. Глобальные, локальные и интегрированные системы спутниковой навигации и точного позиционирования

Секция 3. Радиомониторинг электромагнитно-объектовой обстановки и электромагнитная совместимость РЭС

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Харьков, ХНУРЭ, 18—21 октября

Секция 1. Основы теории телекоммуникационных систем. Технологии, модели и методы.

Секция 2. Управление в мультисервисных телекоммуникационных сетях

Секция 3. Сенсорные сети, самоорганизация и управление интеллектуальными объектами

Секция 4. Обработка сигналов в беспроводных системах

Секция 5. Информационные сети связи

Секция 6. Управление информационной безопасностью в телекоммуникационных сетях

КОМПЬЮТЕРНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

Харьков, ХНУРЭ, 18—21 октября

Секция 1. Проектирование и диагностика цифровых систем на кристаллах

Секция 2. Вычислительный интеллект

Секция 3. «Облачные» вычисления и социальные сети

Секция 4. Информационная безопасность

МЕТРОЛОГИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Харьков, ХНУРЭ, 18—21 октября

Секция 1. Общая и законодательная метрология

Секция 2. Электрические, магнитные и радиоэлектронные измерения

Секция 3. Неэлектрические измерения и расходомерия

Секция 4. Информационно-измерительные системы

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ БИОМЕДИНЖЕНЕРИИ

Харьков, ХНУРЭ, 18—21 октября

Секция 1. Получение и анализ изображений и сигналов в биомединженерии

Секция 2. Биомедицинские приборы, аппараты, системы и комплексы

Секция 3. Моделирование и методы исследования в биомединженерии

Секция 4. Информационные и коммуникационные технологии и системы в медицине, фармакологии, психологии, валеологии и экологии

Секция 5. Нанотехнологии в биомединженерии

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БАЗА НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Крым, Кацивели, 30 сентября — 3 октября

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИКЕ И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОЙ СФЕРЕ

Крым, Ялта, 25—30 сентября

ОБРАЗОВАНИЕ И ВИРТУАЛЬНОСТЬ: ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ

Крым, Ялта, 19—23 сентября

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРОВ И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Харьков, ХНУ им. В. Н. Каразина, 6—8 сентября

КРУГЛЫЙ СТОЛ

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ УКРАИНСКО-РОССИЙСКОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СОТРУДНИЧЕСТВА

Харьков, ХНУРЭ, 21 октября.

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕМИНАР

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ЦЕЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЫ СОЗДАНИЯ И РАЗВИТИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ (СВЯЗЬ, НАВИГАЦИЯ, НАБЛЮДЕНИЕ)

Харьков, ХНУРЭ, 19 октября

**XXII МЕЖДУНАРОДНЫЙ СЕМИНАР
УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

Крым, Алушта, 22—28 сентября



9th IEEE EAST-WEST DESIGN & TEST SYMPOSIUM (EWDTS 2011)

Севастополь, Украина, 09-12 сентября 2011

hahanov@kture.kharkov.ua, www.ewdtest.com/conf/



Цель симпозиума IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS) — расширение международного сотрудничества и обмен опытом между ведущими учеными Западной и Восточной Европы, Северной Америки и других стран в области автоматизации проектирования, тестирования и верификации электронных компонентов и систем. Симпозиум проводится, как правило, в странах бассейнов Черного и Балтийского морей, Центральной Азии. Оргкомитет приглашает ученых, аспирантов и студентов принять участие в работе международного симпозиума EWDTS'11, в рамках которого будут рассматриваться научные работы по следующим тематическим направлениям:

- Тестирование аналоговых, аналого-цифровых и радиочастотных устройств
- Анализ и оптимизация проектов
- Автоматическая генерация тестов и высокоуровневое тестирование
- Встроенное самотестирование
- Отладка и диагностика проектов
- Отказоустойчивость и надежность
- Тестопригодное проектирование
- Верификация и валидация проектов
- Автоматизация проектирования и тестирования
- Обеспечение высокого качества встроенного ПО
- Анализ неисправностей, дефектов и отказов
- Тестирование ПЛИС
- Тестирование с использованием языков HDL
- Высокоуровневый синтез
- Высокопроизводительные системы и сети на кристаллах, проектирование и тестирование
- Проектирование устройств с пониженным энергопотреблением
- Тестирование памяти и процессоров
- Моделирование неисправностей
- Моделирование и синтез встроенных систем
- Проектирование объектно-ориентированных систем
- Тестирование в реальном времени
- Потребление энергии при проектировании и тестировании
- Встроенные системы реального времени
- Надежность цифровых систем
- Методы на основе сканирования данных
- Самовосстановление и реконфигурируемые архитектуры
- Обработка сигналов и информации в радиотехнике и технике связи
- Моделирование и генерация тестов на системном уровне
- Системы в пакетах кристаллов, трехмерное проектирование и тестирование
- Использование UML для описания встроенных систем
- САПР, методы и алгоритмы автоматизации
- Инженерное проектирование и технологическая подготовка производства
- Логический, схемотехнический и системный синтез
- Проектирование топологии кристалла
- Температурный, временной, электростатический анализ систем на кристалле и на плате
- Синтез беспроводных и RFID систем
- Цифровое спутниковое телевидение

Четвертый Международный радиоэлектронный форум

«МРФ-2011»

сентябрь — октябрь 2011 г.

«ПРИКЛАДНАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ»

В рамках Форума запланировано проведение ряда конференций, семинаров и «круглого стола» (см. стр. 76)

Харьков, ХНУРЕ,

Харьков, ХНУ им. В. Н. Каразина

Крым, Кацивели,

Крым, Алушта,

Крым, Ялта

Оргкомитет:

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Просп. Ленина 14, 61166, Харьков, Украина

Тел. (+38 057) 702-13-97, 702-17-35, 702-18-09

Факс: (+ 38 057) 702-10-13; 702-15-15, 702-17-35

E-mail: innov@kture.kharkov.ua;

akad@kture.kharkov.ua



*Номер готовили
Днепропетровск, Донецк, Дрогобыч,
Екатеринбург, Запорожье, Киев, Львов,
Москва, Одесса, С.-Петербург, Ташкент,
Харьков, Черновцы.*



Пишите
Подписывайтесь
Читайте