

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 3 ◆ 2005

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве
Отделения информационных технологий и вычислительных систем
Российской Академии наук

Издается с 1999 г.
ISSN 1684-6419

Главный редактор
Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора
Лучинин В. В.

Редакционный совет:
Аристов В. В.
Асеев А. Л.
Васильев В. В.
Гапонов С. В.
Каляев И. А.
Климов Д. М.
Ковалчук М. В.
Лифшиц В. Г.
Мокеров В. Г.
Никитов С. А.
Чаплыгин Ю. А.
Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:
Антонов Б. И.
Астахов М. В.
Белоус А. И.
Быков В. А.
Васильев А. А.
Волчихин В. И.
Горнек Е. С.
Градецкий В. Г.
Гурович Б. А.
Журавлев П. В.
Захаревич В. Г.
Кальнов В. А.
Карякин А. А.
Квардаков В. В.
Кузин А. Ю.
Мокров Е. А.
Норенков И. П.
Панич А. Е.
Панфилов Ю. В.
Петросянц К. О.
Петрунин В. Ф.
Путилов А. В.
Пятышев Е. Н.
Сауров А. Н.
Сигов А. С.
Степанов Ю. И.
Сухопаров А. И.
Телец В. А.

Отв. секретарь
Лысенко А. В.

Редакция:
Безменова М. Ю.
Григорин-Рябова Е. В.
Учредитель:
Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ

Асеев А. Л. Наноматериалы и нанотехнологии 2

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Кульчицкий Н. А., Кульчицкий А. Н., Мельников А. А. Анализ пороговых характеристик GeSi/Si дефекторов на основе гетероперехода с внутренней фотоэмиссией в спектральном диапазоне 8–12 мкм 11

Шаров В. Б., Шешин Е. П., Щука А. А. Автоэлектронные катоды из графита для диодных источников света 17

Мятиев А. А., Дьяченко Н. И., Помадчик А. Л., Страумал П. Б., Прохоренков Д. В. Синтез нанокристаллического материала системы Ge_{1-x}–Bi_x–O_y 19

Купряшкін А. С., Шешин Е. П., Щука А. А. Методы изготовления автоэлектронных катодов из углеродных материалов 26

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

Бочаров Л. Ю. Анализ тенденций развития исследований и разработок в области создания подводных микроаппаратов 32

Бирюков В. И., Панков В. В. Многоточечный блок для измерения перепада давления 40

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ 42

НОВОСТИ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ 47

ИНФОРМАЦИЯ 49

Учебная литература поnano- и микросистемной технике 54

Contents 56

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России

Аннотации статей журнала на русском и английском языках и требования к оформлению статей доступны на сайте журнала: <http://www.microsystems.ru>.

ПОДПИСКА:

- по каталогу Роспечати (индекс 79493);
- по каталогу "Пресса России" (индекс 27849);
- в редакции журнала (тел./факс: 269-55-10)

НАНОТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.3.049.77

А. Л. Асеев, чл.-корр. РАН,
Институт физики полупроводников СО РАН

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ*

Кратко рассмотрено реальное положение дел в области нанотехнологий, изложены некоторые результаты по развитию наноматериалов и нанотехнологий в научных учреждениях.

Проблемы, относящиеся к созданию наноматериалов и развитию нанотехнологий, занимают в настоящее время доминирующее положение практически во всех областях современной науки и техники. Научная, научно-популярная литература и материалы интернетовских сайтов переполнены разнообразными прогнозами, зачастую фантастическими, о перспективах, открывающихся с развитием этих областей человеческой деятельности.

Нанотехнология определяется как наука и техника создания, изготовления, характеризации и реализации материалов и функциональных структур и устройств на атомном, молекулярном и нанометровом уровнях. Наиболее образно направление работ в этой области задано высказыванием Нобелевского лауреата Р. Фейнмана: *"Там, внизу, еще много места"*. Ключевыми в развитии нанотехнологий явились открытия последней половины XX века, связанные с квантовыми свойствами нанообъектов, разработкой полупроводниковых транзисторов и лазеров, созданием методов диагностики с атомным разрешением (электронная и сканирующая тунNELьная микроскопия), открытием фуллеренов, развитием геномики и биотехнологий. Многие из этих достижений отмечены Нобелевскими премиями и, что очень важно для России, среди Нобелевских лауреатов достойно представлены российские ученые — академики РАН Н. Г. Басов, А. М. Прохоров, Ж. И. Алферов, В. Л. Гинзбург, А. А. Абрикосов.

Объем финансирования работ в области нанотехнологий в мире в 2004 г. оценивается в размере 8,6 млрд долл. США (в 2003 г. — 7,5 млрд долл. США):

- в США правительенная поддержка составила 1,6 млрд долл. США, финансирование компаниями — 1,7 млрд долл. США;

- в странах Европы правительенная поддержка — 1,3 млрд долл. США, финансирование компаниями — 0,7 млрд долл. США;
- в странах Азии правительенная поддержка — 1,6 млрд долл. США, финансирование компаниями — 1,4 млрд долл. США.

Число зарегистрированных патентов в области нанотехнологий с 1976 г. составило 88 546, из них 64 % принадлежат США. Ожидается, что к 2015 г. мировой рынок наноматериалов и нанотехнологий превысит 1 триллион долл. США. Расходы России на поддержку и развитие работ в области наноматериалов и нанотехнологий по различным каналам (Минпромэнерго, Минобрнауки, РАН, РФФИ и др.) можно оценить в размере нескольких десятков миллионов долларов США, что значительно уступает расходам развитых стран и делает невозможным полноценное участие России в патентовании получаемых результатов. Тем самым значительно ограничиваются возможности России в предстоящей масштабной коммерциализации результатов научных исследований.

Принципиально новые свойства наноматериалов связаны, в первую очередь, с квантованием энергетического спектра квазичастиц вnanoобъектах и структурах пониженной размерности, что наиболее ярко проявляется в фундаментальном изменении свойств полупроводников, магнетиков, органических и углеродных материалов, молекулярных ансамблей. Многие из кардинально отличных свойств наноматериалов по отношению к объемным материалам того же химического состава обусловлены эффектами многократного увеличения доли поверхности нанозерен и нанокластеров (до сотен квадратных метров на грамм). С этим связаны новые свойства многих конструкционных и неорганических наноматериалов.

Анализ последних достижений в области наноматериалов, нанотехнологий и наноэлектроники дан в обзоре Ж. И. Алферова и др. (Микросистемная техника, 2003, № 8, с. 3—13), большое количество информации содержится в только что вышедшей в свет Энциклопедии нанонаук и нанотехнологий (Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, Ed. N. S. Nalwa, American Scientific Publ., 2004), на интернетовских сайтах <http://nanotechweb.org>, www.nanoforum.org и др.

Современные приложения нанотехнологий включают:

- элементы наноэлектроники и нанофотоники — полупроводниковые, транзисторы и лазеры, фотодетекторы, солнечные элементы, сенсоры и др. (рис. 1, 2) [1, 2];

* По материалам доклада на заседании Межфракционного депутатского объединения "Наука и высокие технологии" в Государственной Думе РФ 26.10.2004.



ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ СО РАН

ЛАЗЕРЫ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ РЕЗОНАТОРОМ НА ОСНОВЕ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ КВАНТОВЫХ ЯМ

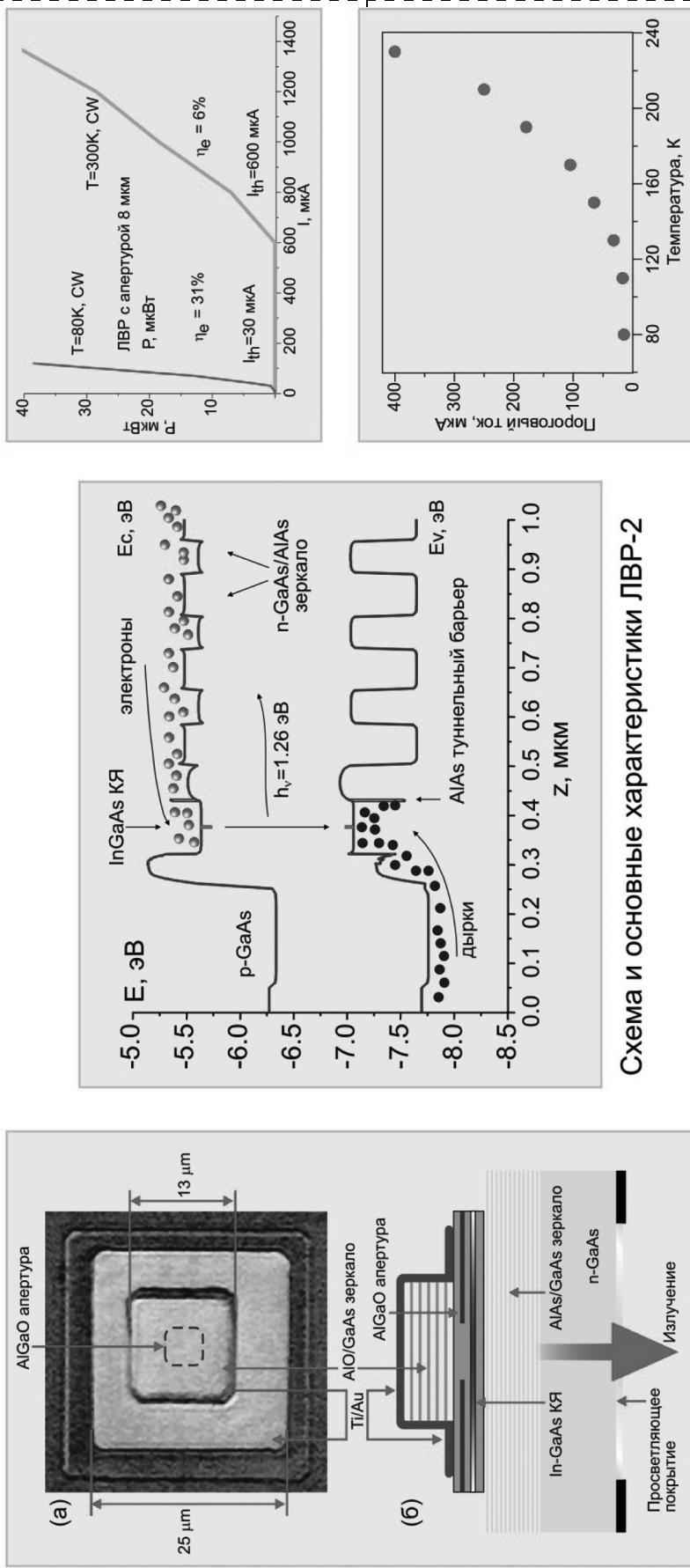


Схема и основные характеристики ЛВР-2

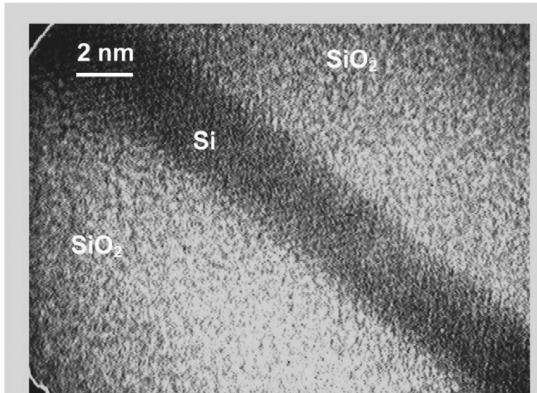
- микрорезонатор лазера образован высокoeffективными низколегированными (выходное зеркало) и нелегированными (верхнее зеркало) отражателями;
- высоколегированные слои (контактные, апертурные, туннельные, туннельный барьер) располагаются в узлах стоячей волны, положение квантовой ямы совпадает с максимумом стоячей волны.

Рис. 1

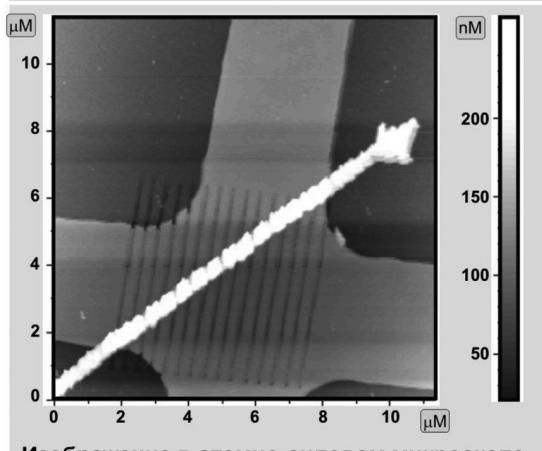


ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ СО РАН

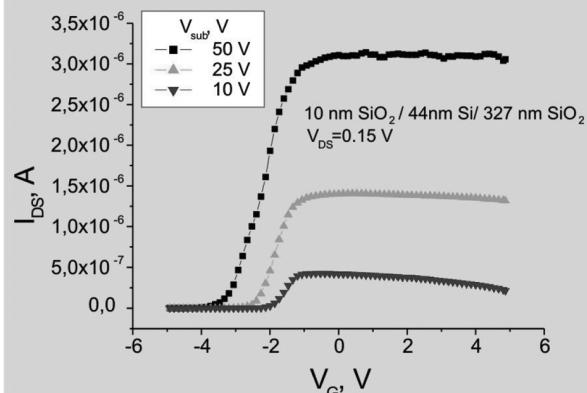
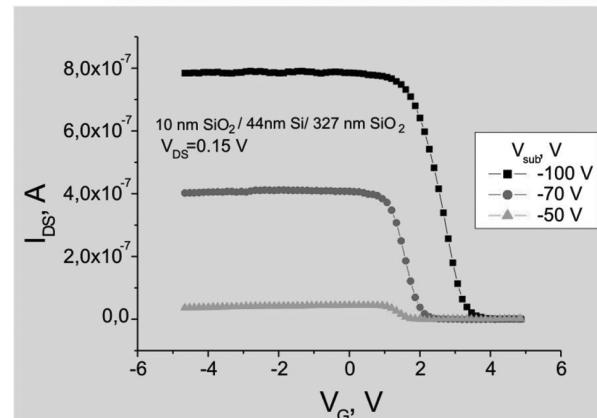
Нанотранзистор на ультратонких слоях “кремний-на-изоляторе”



Изображение в электронном микроскопе высокого разрешения



Изображение в атомно-силовом микроскопе



Затворная ВАХ

Рис. 2

- устройства сверхплотной записи информации;
- телекоммуникационные, информационные и вычислительные технологии, суперкомпьютеры;
- плоские экраны, видеопроекторы и мониторы компьютеров;
- молекулярные электронные устройства, в том числе переключатели и электронные схемы на молекулярном уровне;
- нанолитографию и наноимпринтинг;
- топливные элементы и устройства для хранения энергии;
- устройства микро- и наномеханики, в том числе актиоаторы и трансдукторы, молекулярные моторы и наномоторы, нанороботы;
- нанохимию и катализ, в том числе управление горением, нанесение покрытий, электрохимию и фармацевтику;
- средства обеспечения безопасности и борьбы с терроризмом;

- авиационные, космические и оборонные приложения;
- устройства контроля окружающей среды;
- целевую доставку лекарств и протеинов, биополимеры и заживление биологических тканей, клиническую и медицинскую диагностику, создание искусственных мускулов, костей, имплантацию живых органов;
- биомеханику, геномику, биоинформатику и биоинструментарий;
- регистрацию и идентификацию канцерогенных тканей, патогенов и биологически вредных агентов, безопасность в сельском хозяйстве и при производстве пищи.

Среди наиболее впечатляющих результатов в области наноматериалов и нанотехнологий отметим возрастание прочности и твердости наноструктурированных металлов, что используется, на-

пример, при обработке внутренней поверхности труб парогенераторов на атомных станциях.

Добавка нанопорошков алюминия в ракетное топливо увеличивает скорость горения топлива, а на основе интеркалированного графита создаются новые взрывчатые вещества с объемным горением.

Фильтры на основе микро- и наномембран резко повышают скорость фильтрации дрожжей при производстве пива, а фильтры из нановолокон и нанотрубок (рис. 3) [3] высокоэффективны при очистке воды от бактериофагов (вирусов).

Жидкости, содержащие наночастицы металлов, обладают многократно более высокой теплопроводностью, что позволяет их эффективно использовать в качестве теплоносителей в системах охлаждения.

Покрытия из наноструктурированных материалов характеризуются способностью к самоочищению под действием солнечного излучения, что открывает перспективы производства самоочищающихся строительных материалов и текстиля.

Нанокомпозиты твердых веществ обладают повышенной способностью для аккумулирования водорода и высокой проводимостью ионов, что важно для миниатюризации батарей, источников элек-

тропитания и для прогнозируемого развития водородной энергетики.

Новые возможности открываются при использовании наноматериалов и нанотехнологий в фармацевтике, косметике, медицине и биологии. Так, фармакокинетика такого массового лекарства, как аспирин, значительно улучшается в результате егоnanoструктурирования при механохимической обработке. Для разработки новых эффективных лекарственных средств с бактерицидными и противовирусными средствами успешно используются наночастицы серебра на поверхности цеолитов. Положительные результаты получены при применении магнитных наночастиц при очистке крови от токсикантов.

Из многочисленных применений нанотехнологий и наноматериалов в биологии отметим использование квантовых точек (рис. 4) [4] в качестве люминесцирующих наномаркеров биологических объектов, что позволяет исследовать процессы метаболизма и идентифицировать на ранних стадиях образование раковых клеток.

Интенсивно ведутся разработки производства наноструктурированных материалов, наночастиц и нанопорошков в промышленных масштабах. Основные методы их получения в больших количествах

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ СО РАН

Изготовление полупроводников и микро- и нанотрубок

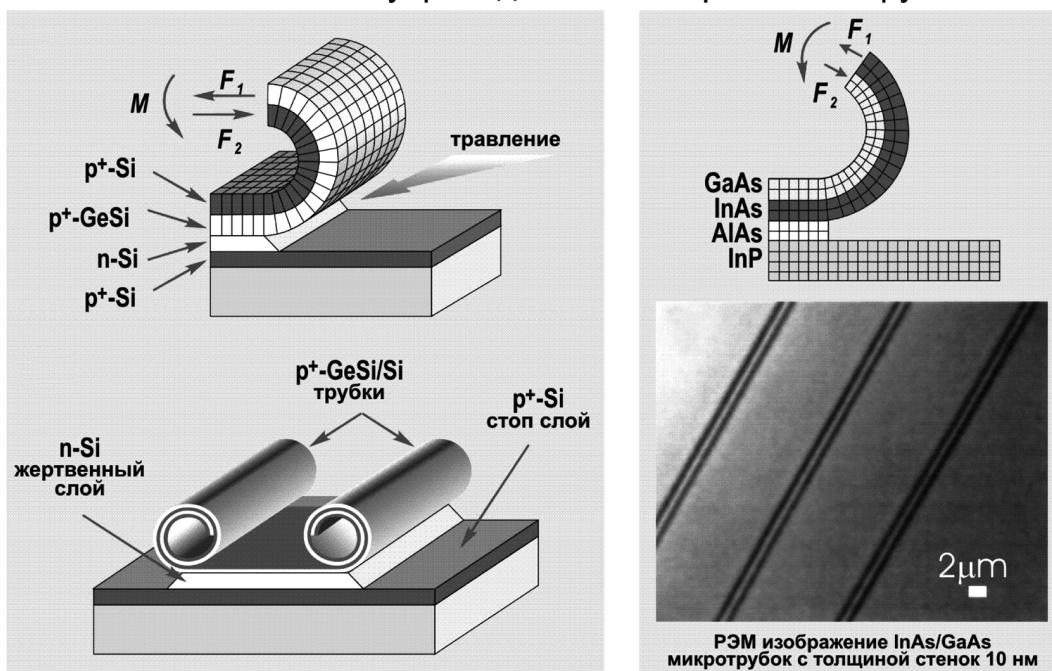
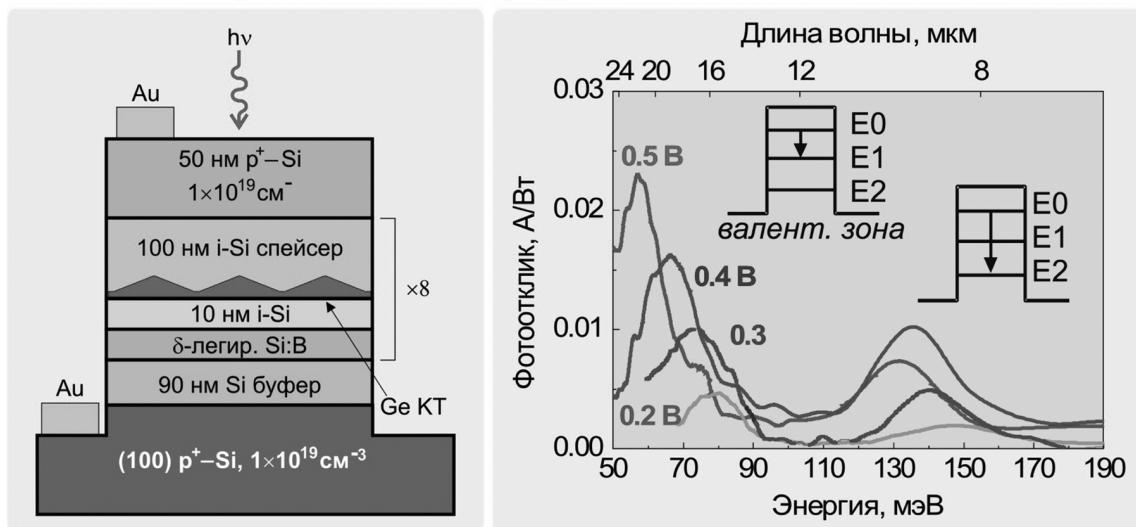


Рис. 3



ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ СО РАН

Фоточувствительные структуры с квантовыми точками Ge в Si



Обнаружительная способность при T=300 К и λ =10-20мкм D* =(0,7 - 1,7) · 10⁸ см Hz^{1/2}/W

Рис. 4

вах включают процессы газофазного синтеза с использованием химических, пламенных, плазменных и лазерных реакторов. В России работы по получению нанопорошков оксидов металлов лазерным испарением ведутся, например, в Институте электрофизики УрО РАН (г. Екатеринбург); технологии плазменного нанесенияnanoструктурированных покрытий развиваются в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск); методы механохимического синтеза наноматериалов разработаны в Институте химии твердого тела и механохимии СО РАН (г. Новосибирск). Наиболее серьезные прорывы в нанотехнологии ожидаются в связи с переходом от традиционных технологий получения нанообъектов при уменьшении размеров макроскопических объектов ("сверху—вниз") к технологиям молекулярной и поатомной сборки нанообъектов и наноматериалов ("снизу—вверх").

Впечатляющие перспективы связаны с применением наноматериалов и систем пониженной размерности в информационных, телекоммуникационных и вычислительных технологиях. Уровень работ в этой области в России и в мире задается ежегодно проводимыми в Санкт-Петербурге на базе Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН Международными симпозиумами "Наноструктуры: физика и технология". Наиболее интенсивно работы по этому направлению ведутся в институтах РАН: Физико-техническом им. А. Ф. Иоффе

(г. Санкт-Петербург), Физическом (г. Москва), Радиотехники и электроники (г. Москва), Физико-технологическом (г. Москва), Общей физики (г. Москва), СВЧ полупроводниковой электроники (г. Москва), Физики микроструктур (г. Нижний Новгород), Физики твердого тела (пос. Черноголовка). Проблем технологий микроэлектроники (пос. Черноголовка), Физики полупроводников (г. Новосибирск), в Московском государственном университете, Санкт-Петербургском государственном техническом университете и других научных организациях России.

Среди наиболее серьезных достижений российских ученых следует отметить разработку полупроводниковых инжекционных лазеров, высокоеффективных солнечных элементов, сверхъярких светодиодов, элементов наногетероструктурных интегральных схем (ФТИ им. А. Ф. Иоффе и др.). Работы опережающего характера по созданию уникального оборудования для нанолитографии с использованием экстремального ультрафиолетового излучения (длина волны 13,5 нм) ведутся в ИФМ РАН. В ИФП СО РАН создано технологическое оборудование (рис. 5) для выращивания слоев стратегически важного материала — эпитаксиальных слоев кадмий—ртуть—теллур методом молекуллярно-лучевой эпитаксии. Наноструктурирование слоев по толщине позволяет улучшить их основные электрофизическкие параметры и получить



ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ СО РАН

Установка МЛЭ “Обь-М”

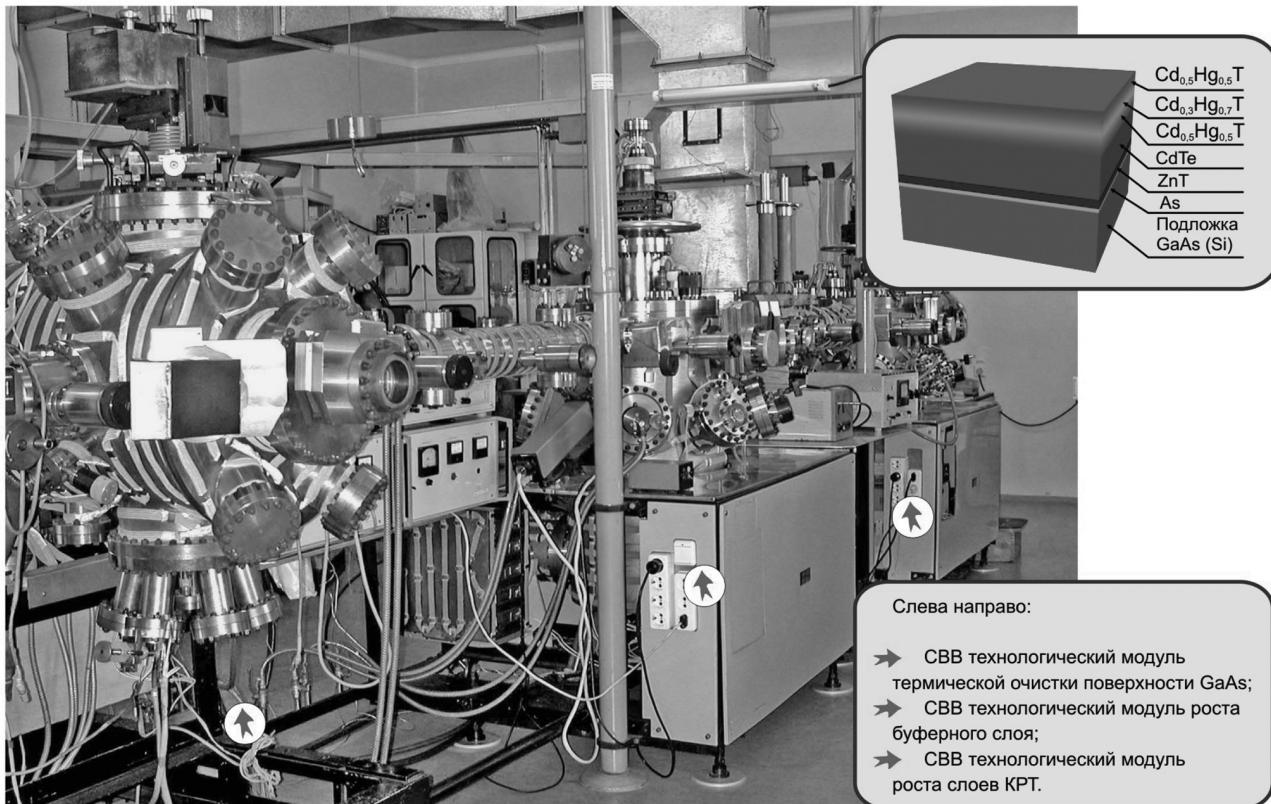


Рис. 5

большеформатные фотоприемные матрицы ИК-диапазона различного назначения. С помощью технологии молекулярно-лучевой эпитаксии в ИФП СО РАН изготовлены экспериментальные образцы матричных фотоприемных модулей форматом 320×256 элементов на основе многослойных эпитаксиальных структур AlGaAs/GaAs (рис. 6) [5, 6] с квантовыми ямами с максимумом спектральной чувствительности в диапазоне 7–9 мкм и температурным разрешением 40–70 мК. На основе эпитаксиальных гетероструктур Ge/Si (рис. 7) на подложке "кремний-на-изоляторе" созданы фотодетекторы на диапазон длин волн 1,3–1,55 мкм с активной областью, включающей 36 слоев нанокластеров германия (квантовых точек). За счет эффекта многократного внутреннего отражения достигнуты значения квантовой эффективности 21 и 16 % для длин волн 1,3 и 1,55 мкм соответственно. Фотодетекторы на квантовых точках представляют несомненный интерес для применения в качестве фотонных компонентов волоконно-оптических

линий связи с повышенной пропускной способностью.

Применение нанотехнологий для интеграции на одном кристалле функций восприятия и обработки изображения вместе с использованием квантоворазмерных фоточувствительныхnanoструктур в ближайшее время приведет к созданию систем "искусственного" (технического) зрения с расширенным по сравнению с биологическим зрением спектральным диапазоном в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра (отметим, что биологическое зрение человека формировалось в течение миллионов лет). Системы технического зрения и фотонные компоненты на nanoструктурах, способные получать и обрабатывать огромные массивы информации, станут основой принципиально новых телекоммуникационных устройств, систем экологического и космического мониторинга, тепловидения, нанодиагностики, робототехники, высокоточного оружия, средств борьбы с терроризмом и т. д. Применение полупроводнико-



ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ СО РАН

Фотоприемники для инфракрасной области спектра
на основе эпитаксиальных структур AlGaAs/GaAs

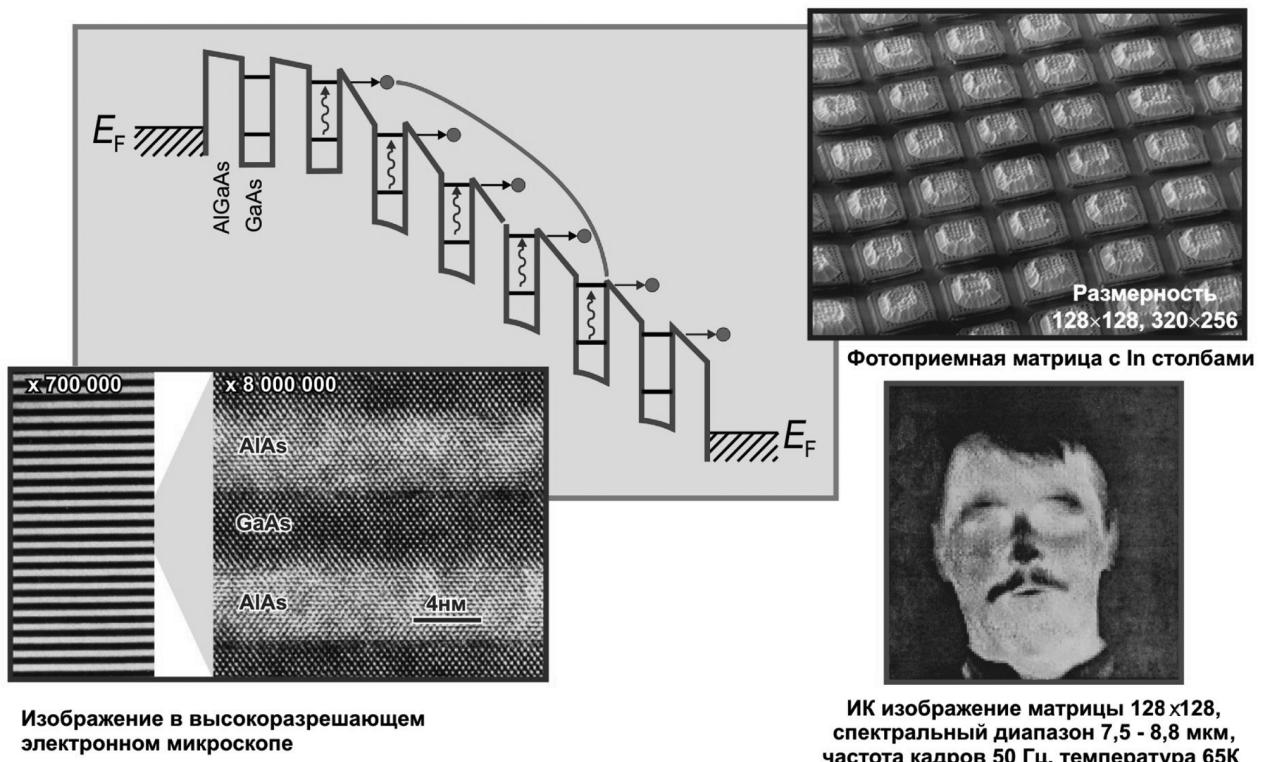


Рис. 6

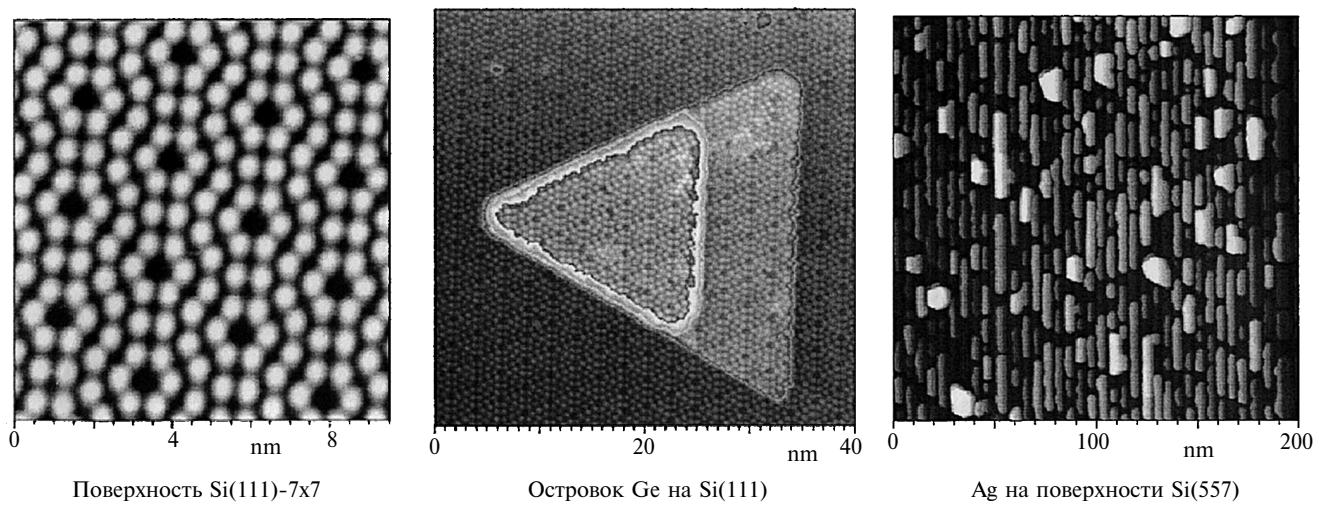


Рис. 7

вых наноструктур значительно уменьшит габаритные размеры устройств наблюдения и регистрации, уменьшит энергопотребление, улучшит стоимостные характеристики и позволит использовать преимущества массового производства в микро- и наноэлектронике ближайшего будущего.

Исключительно важным для развития нанотехнологий является создание новых и усовершенствование имеющихся методов диагностики наноструктур и наноматериалов с атомным и нанометровым разрешением. В последние годы достигнуты заметные успехи в коррекции сферической аберрации и применении энергетических фильтров для химического анализа в высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии (рис. 8); в развитии методов электронной голографии, сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии и микроскопии медленных электронов. Революционным явилось широкое применение методов сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии с проведением спектроскопического анализа, измерением молекулярных сил, проведением экспериментов *in situ* при пониженных и повышенных температурах, включая манипулирование отдельными атомами. Следует отметить успехи российских специалистов в разработке современных конкурентоспособных атомно-силовых микроскопов (фирма НТ-МДТ, г. Зеленоград) (рис. 9) и в создании сканирующего туннельного микроскопа (Институт общей физики РАН), что явилось существенным вкладом в развитие нанотехнологий в России. На базе Курчатовского научного центра (г. Москва) и Института ядерной физики (г. Новосибирск) успешно ведутся работы в области нанотехнологий и нанодиагностики с использованием синхротронного излучения. Однако в целом уровень оснащения организаций научно-технической сферы России современными диагностическими методами далек от необходимого уровня, что связано со сложностью и дороговизной современного аналитического и диагностического оборудования.

Подготовка высококвалифицированных кадров в области наноматериалов и нанотехнологий является неотъемлемой частью работ в этой области. В целом уровень подготовки специалистов данного профиля в России соответствует или превышает мировой уровень в данной области. Это выражается, в частности, в востребованности и успешной работе многих российских специалистов в зарубежных центрах нанотехнологий и наноматериалов. В то же время угрожающим является падение уровня преподавания естественно-научных дисциплин (математики, физики, химии, биологии) в средней школе, что связано с общим кризисом в Рос-

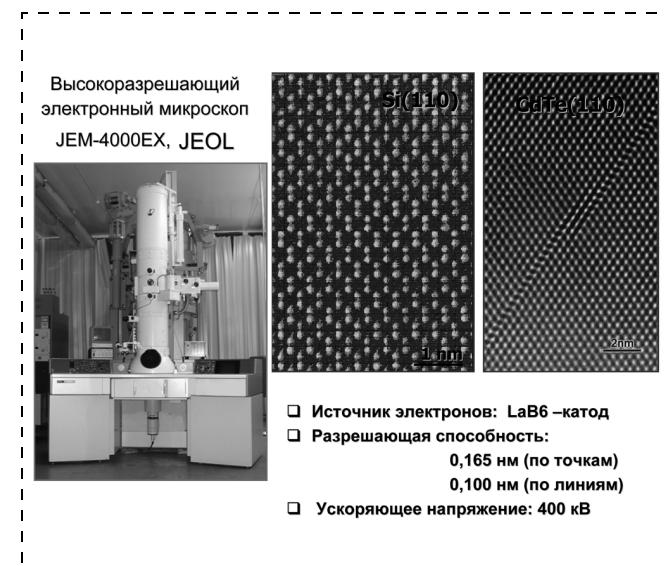


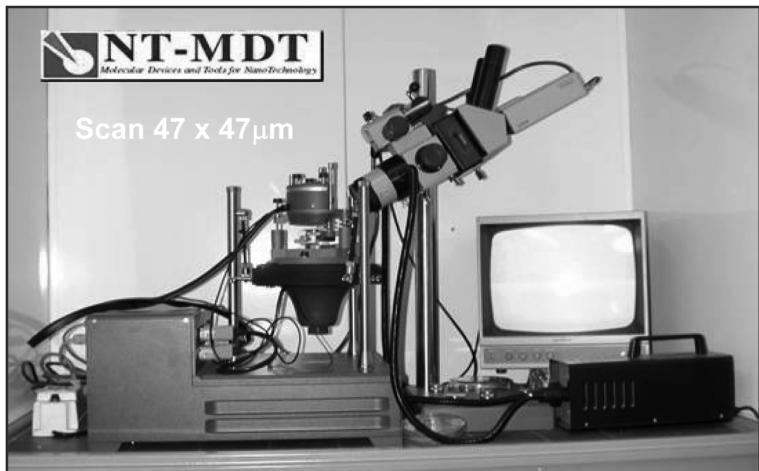
Рис. 8

сийской системе среднего образования. Необходимы незамедлительные шаги по исправлению сложившегося положения. Положительным в этой области является опыт деятельности Научно-образовательного центра при ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН и Специализированного учебно-научного центра при Новосибирском госуниверситете. Первым шагом в подготовке дипломированных специалистов по нанотехнологиям (специальности "Нанотехнология в электронике" и "Наноматериалы") явилось поручение Минобрнауки РФ (приказ № 71 от 29.01.2004) по подготовке кадров в ряде ведущих вузов России (Московский институт электронной техники, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Новосибирский государственный технический университет, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, Таганрогский государственный радиотехнический университет, Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского).

Основные выводы

- ◆ Благодаря высокому интеллектуальному потенциалу научных и образовательных учреждений России (в первую очередь, институтов Российской академии наук) уровень научно-технологических разработок в области наноматериалов и нанотехнологий в России в целом соответствует мировому уровню работ, а иногда и превышает мировой уровень. Развитие работ в этой области даст возможность для более активной работы российских компаний на внутреннем рынке России (информационные и телекоммуникационные технологии для

АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОП SOLVER P-47H



**Предельные возможности -
моноатомные ступени (высотой 0,14нм)
на поверхности кремния (001)**

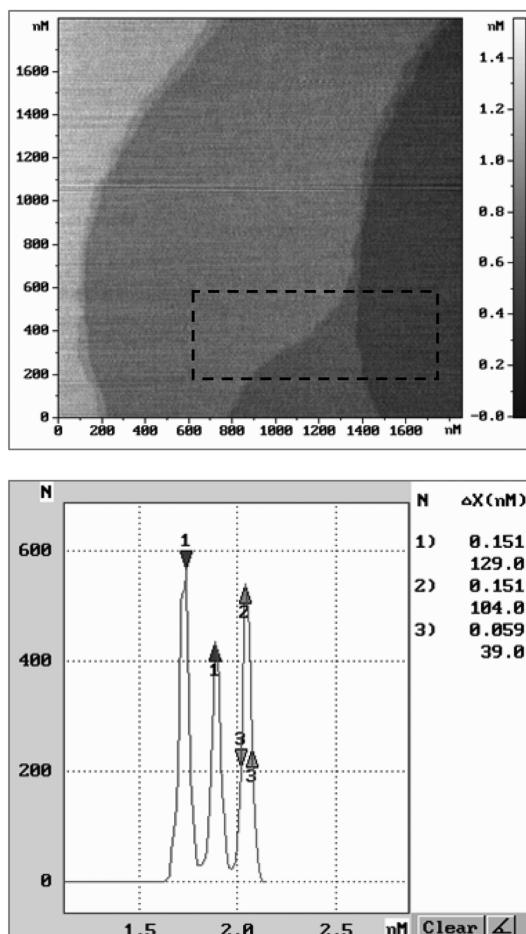


Рис. 9

финансовой и банковской сферы, образования, создание современной материальной базы медицины, решение проблем энергосбережения, обеспечение безопасности, решение стратегически важных проблем силовых ведомств и многое другое), а также восстановить научно-технический паритет с развитыми странами.

◆ Основная проблема на настоящем этапе связана со слабой материальной базой при получении и диагностике наноматериалов, что препятствует развитию нанотехнологий. Исправление этого положения требует капитальных вложений со стороны государства. Для эффективного использования необходимых средств разумным является организация мощных распределенных региональных центров коллективного пользования дорогостоящим уникальным аналитическим, диагностическим и технологическим оборудованием и их дооснащение в соответствии с профилем работы центров. Необходимы налоговые и таможенные льготы при закупке специализированного и уникального оборудования. В Минобрнауки РФ накоплен доста-

точный положительный опыт для организации таких центров коллективного пользования. На первом этапе целесообразна организация таких межведомственных центров в области наноматериалов и нанотехнологий в Центральном (г. Москва), Северо-Западном (г. Санкт-Петербург), Приволжском (г. Нижний Новгород), Уральском (г. Екатеринбург) и Сибирском (г. Новосибирск) федеральных округах.

◆ Для экономического стимулирования разработки нанотехнологий и производства наноматериалов, изделий и устройств на их основе следует обеспечить создание специализированных технопарков, как хорошо работающего в мировой практике механизма прогресса в области высоких технологий, и оказать поддержку малым высокотехнологическим компаниям в составе технопарков.

◆ Следует предусмотреть систему мер по повышению качества и доступности преподавания в средней школе естественно-научных дисциплин, лежащих в основе современного прогресса в области наноматериалов и нанотехнологий (математика,

физика, химия, биология). Ключевым моментом является повышение статуса преподавателей и оснащение школ современными средствами образования. Для подготовки кадров высшей квалификации в области нанотехнологий и наноматериалов необходима целевая материальная поддержка тех вузов, которые уже ведут эту работу.

Список литературы

1. Гайслер В. А., Торопов А. И. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2004. С. 272—298.

2. Попов В. П., Асеев А. Л., Французов А. А. и др. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2004. С. 337—362.

3. Принц В. Я. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2004. С. 85—120.

4. Двуреченский А. В., Якимов А. И. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2004. С. 308—337.

5. Овсянко В. Н., Торопов А. И., Шашкин В. В. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. Новосибирск: Наука, 2001.

6. Торопов А. И., Шашкин В. В. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2004. С. 252—272.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

УДК 621.315

А. В. Войцеховский, д-р физ.-мат. наук,
С. Н. Несмелов, канд. физ.-мат. наук,
Сибирский физико-технический институт,
г. Томск, vav@elefot.tsu.ru
Н. А. Кульчицкий, д-р техн. наук,
А. Н. Кульчинский, А. А. Мельников, канд. техн. наук,
Московский государственный институт
радиотехники, электроники и автоматики
(технический университет) г. Москва,
kna@comail.ru

АНАЛИЗ ПОРОГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК GeSi/Si ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОПЕРЕХОДА С ВНУТРЕННЕЙ ФОТОЭМИССИЕЙ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 8...12 МКМ

Рассмотрены вопросы создания инфракрасных детекторов на эпитаксиальных гетероструктурах Ge_xSi_{1-x}/Si . Проведен анализ формул для расчета пороговых характеристик детекторов на основе гетероперехода GeSi/Si с внутренней фотоэмиссией, действующих в спектральном диапазоне 8...12 мкм.

В настоящее время матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона широко применяют в развитых странах для решения ряда военно-технических и космических задач. Использование матриц детекторов, действующих в спек-

тральном диапазоне окна прозрачности атмосферы 3...5 мкм, предпочтительно для обнаружения и распознавания высокотемпературных целей, в то время как приборы, работающие в спектральном диапазоне 8...12 мкм, лучше подходят для распознавания относительно низкотемпературных целей и обеспечивают лучшие характеристики в условиях пылевидовых помех [1]. Лучшие пороговые характеристики дискретных приемников и малоформатных матриц для спектрального диапазона 8...12 мкм могут быть достигнуты при использовании детекторов на основе узкозонного твердого раствора HgCdTe [1, 2]. Но этот материал плохо подходит для создания крупноформатных матричных фотоприемников вследствие низкой однородности и плохой воспроизводимости свойств, высокой стоимости и сложности совмещения с кремниевой считающей электроникой в гибридной конфигурации. Для детектирования излучения в спектральных диапазонах окон прозрачности атмосферы 3...5 и 8...12 мкм перспективно использование кремниевых поверхностно-барьерных структур (барьеров Шоттки и гетеропереходов) с внутренней фотоэмиссией. Детектирование с помощью фотоэмиссионных детекторов можно разделить на следующие этапы: поглощение излучения свободными носителями (обычно дырками) в металле или в сильнолегированном полупроводнике, транспорт фотовозбужденных дырок в электроде и последующая внутренняя эмиссия через потенциальный барьер на границе раздела.

Самым популярным типом детекторов с внутренней фотоэмиссией в настоящее время являются

детекторы на основе барьеров Шоттки PtSi/ p – Si, которые широко применяются в спектральном диапазоне 3...5 мкм [3, 4]. Крупноформатные двумерные матрицы на основе детекторов данного типа (до 1040 × 1040 элементов) обладают превосходной стабильностью и однородностью свойств, но не могут использоваться для детектирования в спектральном диапазоне 8...12 мкм. Совершились попытки увеличить граничную длину волн PtSi/ p – Si путем создания поверхностного высоколегированного слоя [5, 6], но вследствие ряда технологических проблем удовлетворительные результаты были получены только с дискретными детекторами. Для детектирования в спектральном диапазоне 8...12 мкм предлагалось использовать барьер Шоттки IrSi/Si с граничной длиной волны около 10 мкм [1, 7], но пока не отработана технология эпитаксиального выращивания IrSi на кремниевых подложках, кроме того, квантовая эффективность таких приборов не превышает 0,05 % при длинах волн, больших 8 мкм.

Дополнительные возможности при создании кремниевых детекторов для спектральных диапазонов 3...5 и 8...12 мкм предоставляют эпитаксиальные гетероструктуры p^+ – Ge_xSi_{1-x}/ p – Si, граничной длиной которых можно управлять путем изменения соотношения компонентного состава силицида германия. За последние годы достигнуты значительные успехи в технологии эпитаксиального выращивания пленок Ge_xSi_{1-x}. Интерес к гетероструктурам GeSi/Si обусловлен перспективностью использования таких гетероструктур для создания сверхвысокочастотных биполярных транзисторов, малошумящих транзисторов с двумерным газом носителей заряда, резонансно-тунNELьных диодов, а также инфракрасных приемников [8–16]. На основе силицида германия в настоящее время разрабатывается несколько новых типов инфракрасных детекторов: детекторы на основе классического гетероперехода с внутренней фотоэмиссией [8–13], детекторы на основе множественных квантовых ям [14–16], многоспектральные детекторы на основе многослойных структур PtSi/Si/GeSi/Si и PtSi/GeSi/Si [17, 18], детекторы на основе GeSi-микроболометров [19, 20].

Первыми детекторами, созданными на основе гетероструктур GeSi/Si, были детекторы на основе классического гетероперехода с внутренней фотоэмиссией (HIP – *heterojunction internal photoemission*) [8–13]. На рис. 1 показана структура и энергетическая диаграмма HIP-детектора на основе классической гетероструктуры GeSi/Si.

Следует отметить, что в настоящее время достаточно подробно разработана концепция использования детекторов на основе гетеропереходов

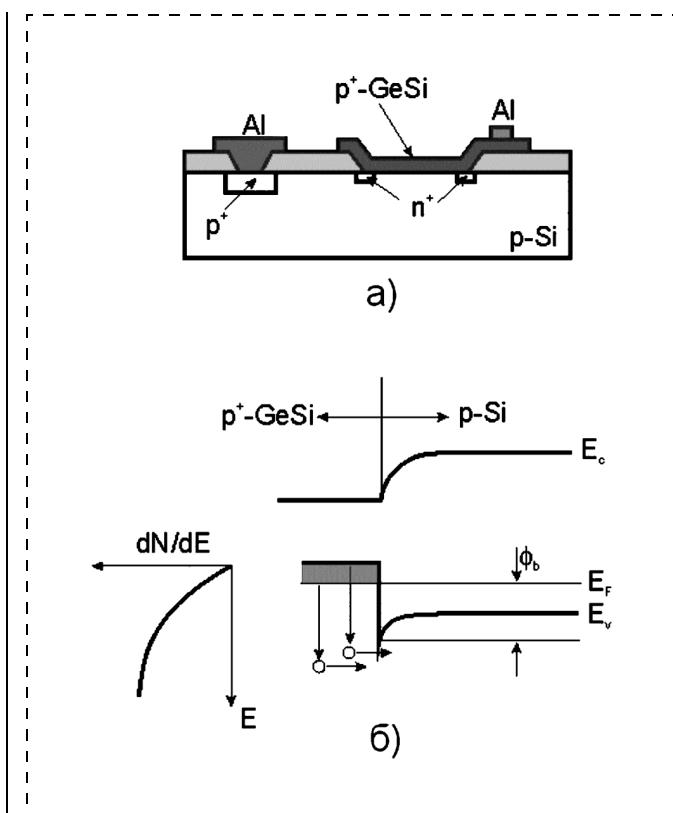


Рис. 1. Структура (а) и энергетическая диаграмма детектора с внутренней фотоэмиссией на основе гетероперехода GeSi/p – Si

p^+ -SiGe/ p – Si для детектирования в спектральном диапазоне 3...5 мкм [8, 9]. Известны работы, в которых предложено использовать GeSi/Si-детекторы для детектирования в окне прозрачности 8...12 мкм, но эти детекторы обычно действуют при очень низких рабочих температурах (менее 50 K) [10, 11]. В связи с этим важной современной задачей является повышение рабочей температуры детекторов на основе гетероструктур GeSi/Si, действующих в спектральном диапазоне 8...12 мкм [21–23]. В настоящей работе приведен анализ формул для расчета пороговых характеристик HIP-детектора.

Спектральные зависимости квантовой эффективности HIP-детекторов отличаются от аналогичных зависимостей фотодетекторов на основе барьеров Шоттки в коротковолновой области (до 5 мкм), что связано с ростом коэффициента поглощения свободными носителями в пленке GeSi при увеличении длины волны. Если квантовая эффективность барьеров Шоттки в коротковолновой области максимальна и практически постоянна, то квантовая эффективность HIP-детекторов на основе гетероструктур GeSi/Si уменьшается как вблизи длинноволновой границы, так и в коротковолновой области.

Квантовая эффективность HIP-детектора в длинноволновой области, в которой поглощение постоянно, определяется также как и для барьеров Шоттки формулой Фаулера.

Выражение для общей квантовой эффективности HIP-детектора вблизи длинноволновой границы имеет следующий вид:

$$\eta(\lambda) = 1,24 C_1 \lambda \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c} \right)^2. \quad (1)$$

В этой формуле коэффициент 1,24 имеет раз мерность (мкм · эВ); λ — длина волны, мкм; λ_c — граничная длина волны, мкм; C_1 — коэффициент эффективности эмиссии, который определяется выражением

$$C_1 = \frac{A}{8E_F^{1/2}(E_F + \phi_b)^{1/2}}, \quad (2)$$

где E_F — энергия уровня Ферми относительно потолка валентной зоны в GeSi; ϕ_b — высота потенциального барьера на гетерогранице. По литературным данным коэффициент C_1 обычно находится в диапазоне от 0,1 до 0,4 эВ⁻¹, но может достигать 1,38 эВ⁻¹ для многослойных детекторов.

Если объект излучает как абсолютно черное тело, то спектральную плотность потока излучения W_λ [Вт/(мкм · см²)], и спектральную плотность потока фотонов Q_λ [фотон/(с · мкм · см²)], можно найти по следующим формулам [24]:

$$W_\lambda = \frac{B_1 \lambda^{-5}}{\exp(B_2/\lambda T_\Phi) - 1}; \\ Q_\lambda = \frac{B_3 \lambda^{-4}}{\exp(B_2/\lambda T_\Phi) - 1}, \quad (3)$$

где $B_1 = 3,7415 \cdot 10^4$ Вт · мкм⁴/см²; $B_2 = 1,4388$ мкм · К; $B_3 = 1,8837 \cdot 10^{23}$ мкм³/(с · см²); T_Φ — температура фона. Производные выражений (3) по температуре при условии $\exp(B_2/(\lambda T_\Phi)) \gg 1$ могут быть записаны в виде:

$$\frac{\partial W_\lambda}{\partial T_\Phi} \approx W_\lambda \frac{B_2}{\lambda T_\Phi^2}, \\ \frac{\partial Q_\lambda}{\partial T_\Phi} \approx Q_\lambda \frac{B_2}{\lambda T_\Phi^2}. \quad (4)$$

Среднюю квантовую эффективность, определяемую как отношение общего числа фотоносителей к общему числу поглощенных в детекторе фотонов из спектрального диапазона 8 мкм — λ_c , можно записать с учетом (1) и (3) в следующем виде:

$$\bar{\eta} = \frac{\int_{\lambda_c}^{\lambda_c} \eta(\lambda) Q_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_c}^{\lambda_c} Q_\lambda(\lambda) d\lambda} = \\ = \frac{8 \int_{\lambda_c}^{\lambda_c} 1,24 C_1 (1/\lambda - 1/\lambda_c)^2 \lambda^{-3} (\exp(B_2/\lambda T_\Phi) - 1)^{-1} d\lambda}{8 \int_{\lambda_c}^{\lambda_c} \lambda^{-4} (\exp(B_2/\lambda T_\Phi) - 1)^{-1} d\lambda}. \quad (5)$$

Из формулы видно, что средняя квантовая эффективность зависит от температуры фона, от коэффициента квантовой эффективности и от граничной длины волны.

Для характеристики работы инфракрасного детектора в конкретных условиях используется понятие температуры ограничения фоном (*BLIP-temperature*), т. е. температуры, при которой темновой ток в детекторе равен фоновому фототоку. Оптимальным режимом работы детектора является режим ограничения пороговых характеристик дробовыми шумами фонового фототока.

Температура фотоприемника, при которой темновой ток равен фоновому фототоку, может быть найдена из условия:

$$A^{**} T_{\text{ОФ}}^2 \exp\left(-\frac{1,24q}{\lambda_c k T_{\text{ОФ}}}\right) = q \int_{\lambda_c}^{\lambda_c} \eta(\lambda) Q_\lambda(\lambda) d\lambda = \\ = C_3 C_1 \sin^2 \theta \int_{\lambda_c}^{\lambda_c} \frac{\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{\lambda^3 \left(\exp\left(\frac{B_2}{\lambda T_\Phi}\right) - 1\right)} d\lambda, \quad (6)$$

где $T_{\text{ОФ}}$ — температура фотоприемника; A^{**} — эффективная постоянная Ричардсона; q — заряд электрона; T_Φ — температура фона; k — постоянная Больцмана; θ — половинный апертурный угол; $C_3 = 1,24qB_3 = 37372,6$ А · мкм⁴ · см⁻² · эВ.

Чувствительность по току HIP-детектора может быть записана в следующем виде:

$$R_\lambda = \frac{q\eta(\lambda)W_\lambda(\lambda)/hv}{W_\lambda(\lambda)} = C_1\lambda^2\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2, \quad (7)$$

где hv — энергия фотона; C_1 имеет размерность А/Вт. Обнаружительная способность в случае действия фотодетектора в режиме накопления связана с чувствительностью соотношением:

$$D_\lambda^* = \frac{R_\lambda}{i_n} \sqrt{\frac{S}{\tau_H}}, \quad (8)$$

где τ_H — время накопления; S — площадь детектора; i_n — дробовой шум темнового тока и и фонового фототока;

$$i_n = \sqrt{\frac{2qI}{\tau_H}}. \quad (9)$$

В случае использования детектора в режиме мгновенного действия выражения (8) и (9) принимают вид:

$$D_\lambda^* = \frac{R_\lambda}{i_n} \sqrt{S\Delta f}; \quad i_n = \sqrt{2qI\Delta f}, \quad (10)$$

где Δf — электрический диапазон частот; I — сумма темнового тока и фонового фототока.

Запишем выражения для пороговых характеристик тепловизионной системы при следующих предположениях:

- пороговые характеристики ограничены шумами детектора (на практике часто необходимо учитывать шумы считающего мультиплексора);
- коэффициент пропускания атмосферы равен единице (что возможно при малом расстоянии от объекта теплового излучения до фотоприемника);
- коэффициент пропускания входной оптической системы равен единице;
- входная оптическая система имеет фильтр, отсекающий излучение с длиной волны, меньшей, чем 8 мкм.

Спектральную обнаружительную способность НИР-детектора в случае ограничения дробовыми шумами темнового тока и фонового фототока можно записать в следующем виде:

$$D_\lambda^*(\lambda) = \frac{C_1\lambda^2\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{\sqrt{2q\left(A^{**}T^2\exp\left(-\frac{1,24q}{\lambda_c k T}\right) + C_3 C_1 \sin^2\theta \int_{\lambda_0}^{\lambda_c} \frac{\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{\lambda^3 \left(\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_\Phi}\right) - 1\right)} d\lambda\right)}}, \quad (11)$$

где λ_0 — наименьшая длина волны излучения, пропускаемого фильтром входной оптической системы.

Если атмосфера или входная оптическая система пропускает с коэффициентом $t(\lambda)$ излучение более широкого спектрального диапазона, то выражение (11) принимает вид:

$$D^*(\lambda) = \frac{C_1 t(\lambda) \lambda^2 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{\sqrt{2q\left(A^{**}T^2\exp\left(-\frac{1,24q}{\lambda_c k T}\right) + C_3 C_1 \sin^2\theta \int_0^{\lambda_c} \frac{t(\lambda)\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{\lambda^3 \left(\exp\left(\frac{B_2}{\lambda T_\Phi}\right) - 1\right)} d\lambda\right)}}, \quad (12)$$

где $t(\lambda)$ — коэффициент пропускания атмосферы и/или входной оптической системы.

На рис. 2 показаны зависимости спектральной обнаружительной способности от длины волны для различных типов классических детекторов с внутренней фотоэмиссией: на основе барьеров Шоттки PtSi/Si, IrSi/Si, PtSi/Si с высоколегированным поверхностным слоем, многоспектрального детектора PtSi/GeSi при различных напряжениях на барьере, НИР-детектора на основе гетероперехода GeSi/Si. Из рис. 2 следует, что обнаружительная способность эмиссионных фотодетекторов невелика по сравнению с аналогичными характеристиками фотодиодов и фоторезисторов на основе узкозонных материалов.

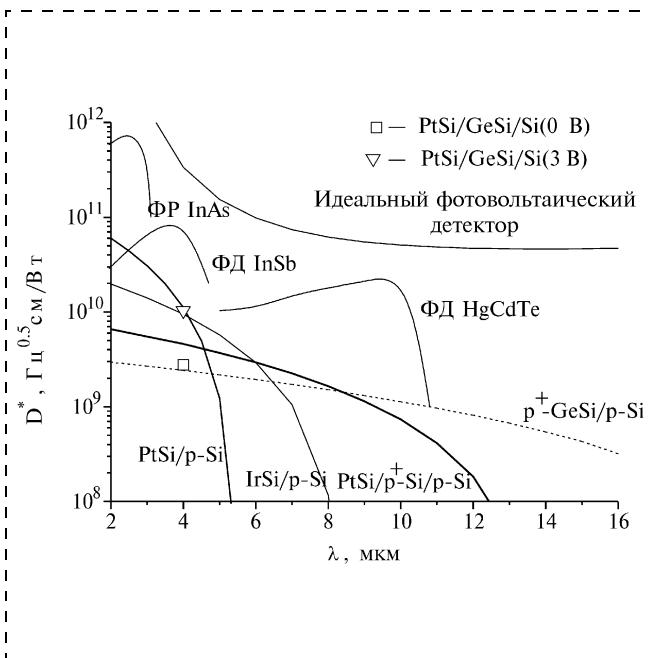


Рис. 2. Расчетные зависимости спектральной обнаружительной способности для инфракрасных фотоприемников различных типов

Для интегральной характеристики тепловизионных систем обычно используется не спектральная обнаружительная способность, а пороговая разность температур (NETD):

$$\text{NETD} = \frac{(4F^2 + 1)}{\frac{\lambda_c}{\sqrt{\tau_H S} \int_{\lambda_0}^{\lambda_c} D_\lambda^*(\lambda) \frac{\partial W_\lambda(\lambda)}{\partial T_\Phi} d\lambda}} = \\ = \frac{(4F^2 + 1)i_n}{\frac{\lambda_c}{\int_{\lambda_0}^{\lambda_c} SR_\lambda(\lambda) \frac{\partial W_\lambda(\lambda)}{\partial T_\Phi} d\lambda}}, \quad (13)$$

F — параметр, характеризующий входную оптическую систему.

Традиционно при описании тепловизионных систем используется параметр $F = f/d$, где f — фокусное расстояние входной оптической системы; d — диаметр входной апертуры, а при описании обнаружительной способности дискретных детекторов — половинный угол входной апертуры θ . Если входной телесный угол представляет собой правильный конус, то верно следующее соотношение: $F = f/d = 1/2 \operatorname{tg}\theta$. По литературным данным с НИР-детекторами обычно используют оптические системы с F от 1,5 до 3. С учетом полученного ранее выражения для обнаружительной способности можно записать зависимость NETD от параметров фотоприемника и условий регистрации излучения в явном виде:

$$\text{NETD} = \frac{(4F^2 + 1) \sqrt{\frac{2q}{S\tau_H} \left[A^{**} T^2 \exp\left(-\frac{1,24q}{\lambda_c kT}\right) + C_3 C_1 \sin^2 \theta \int_{\lambda_0}^{\lambda_c} \frac{\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{\lambda^3 \left(\exp\left(\frac{B_2}{\lambda T_\Phi}\right) - 1\right)} d\lambda \right]}}{\int_{\lambda_0}^{\lambda_c} \frac{C_1 B_2 B_1 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{\lambda^4 T_\Phi^2 \left(\exp\left(\frac{B_2}{\lambda T_\Phi}\right) - 1\right)} d\lambda}. \quad (14)$$

В случае, если коэффициент пропускания атмосферы и/или входной оптической системы отличен от единицы и зависит от длины волны, то для всего спектрального диапазона NETD фотоэмиссионных детекторов можно записать в следующем виде:

$$\text{NETD} = \frac{(4F^2 + 1) \sqrt{\frac{2q}{S\tau_H} \left[A^{**} T^2 \exp\left(-\frac{1,24q}{\lambda_c kT}\right) + C_3 C_1 \sin^2 \theta \int_0^{\lambda_c} \frac{t(\lambda) \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{\lambda^3 \left(\exp\left(\frac{B_2}{\lambda T_\Phi}\right) - 1\right)} d\lambda \right]}}{\int_0^{\lambda_c} \frac{t(\lambda) C_1 B_2 B_1 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{\lambda^4 T_\Phi^2 \left(\exp\left(\frac{B_2}{\lambda T_\Phi}\right) - 1\right)} d\lambda}. \quad (15)$$

Несмотря на малые значения спектральной обнаружительной способности пороговые характеристики НИР-детекторов в режиме накопления могут быть улучшены путем увеличения времени накопления. В этом режиме эмиссионные детекторы являются достаточно чувствительными, но инерционными фотоприемниками. Время накопления определяется, в свою очередь, емкостью потенциальной ямы N_{\max} , которая для современных кремниевых мультиплексоров составляет $(1...4) \cdot 10^7$ электронов. Предельные значения времени накопления при действии в спектральном диапазоне 8...12 мкм определяются следующей формулой:

$$\tau_h^{\max} = \frac{N_{\max}}{\sin^2 \theta S \cdot 1,24 B_3 C_1 \int_{\lambda_0}^{\lambda_c} \frac{\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{\lambda^3} d\lambda \left(\exp\left(\frac{B_2}{\lambda T_\Phi}\right) - 1 \right)}, \quad (16)$$

где N_{\max} — емкость потенциальной ямы (емкость хранения).

На основании полученных соотношений можно записать выражение для максимально возможной пороговой разности температур при заданной емкости потенциальной ямы.

$$NETD = \frac{(4F^2 + 1) \sqrt{\frac{2qS \sin^2 \theta}{N_{\max}} \left[A^{**} T^2 \exp\left(-\frac{1,24q}{\lambda_c k T}\right) + C_3 C_1 \sin^2 \theta \int_{\lambda_0}^{\lambda_c} \frac{\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{\lambda^3 \left(\exp\left(\frac{B_2}{\lambda T_\Phi}\right) - 1 \right)} d\lambda \right] \int_{\lambda_0}^{\lambda_c} \frac{1,24 C_1 B_3 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2 d\lambda}{\lambda^2 \left(\exp(B_2 / (\lambda T_\Phi)) - 1 \right)}}}{\int_{\lambda_0}^{\lambda_c} \frac{C_1 B_2 B_1 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{\lambda^4 T_\Phi^2 \left(\exp\left(\frac{B_2}{\lambda T_\Phi}\right) - 1 \right)} d\lambda}. \quad (17)$$

Полученные в данной работе формулы могут быть использованы для оценки пороговых характеристик фотоэмиссионных детекторов различных типов в спектральном диапазоне 8...12 мкм. Значения эффективной постоянной Ричардсона, высоты потенциальных барьеров и коэффициент эффективности эмиссии могут быть определены экспериментально по методикам Фаулера и Ричардсона [25]. Для оптимизации параметров эпитаксиальных слоев силицида германия необходим расчет значений C_1 и A^{**} , который должен учитывать поглощение свободными носителями в GeSi [26, 27], процессы рассеяния горячих носителей в объеме и на поверхностях GeSi [28]. Для расчета параметров C_1 и A^{**} многоспектральных детекторов необходим расчет энергетических диаграмм многослойной системы PtSi/GeSi/Si при различных напряжениях смещения [17, 18]. Предварительные расчеты показали, что зависимости пороговой разности температур от граничной длины волны НИР-детекторов при действии в спектральном диапазоне 8...12 мкм имеют минимум. Полученные соотношения могут быть использованы для оптимизации граничной длины волны и рабочей температуры детектора для конкретной тепловизионной задачи.

Список литературы

1. Рогальский А. Инфракрасные детекторы: Пер. с англ. под ред. А. В. Войцеховского, Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.
2. Овсяк В. Н., Курышев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона / Под ред. В. Н. Синицы. Новосибирск: Наука, 2001. 376 с.
3. Kimata M., Ueno M., Yagi H., Shiraishi T., Kawai M., Endo K., Kosasayama Y., Sone T., Ozeki T., Tsubouchi N. PtSi Schottky-barrier infrared focal plane arrays // Opto-electronics review. 1998. V. 6. N 1. P. 1–10.
4. Yutani N., Yagi H., Kimata M., Nakanishi J., Nagayoshi S., Tsubouchi N. 1040 × 1040 element PtSi Schottky-barrier IR image sensor // IEDM Tech. Diges. 1991. P. 175–178.
5. Lin T. L., Park J. S., George T., Jones E. W., Fathauer R. W., Maserjian J. Long-wavelength PtSi infrared detectors fabricated by incorporating a p⁺ doping spike grown by molecular beam epitaxy // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. P. 3318–3320.
6. Nesmelov S. N., Voitsekhovskii A. V., Kokhanenko A. P. Threshold characteristics of p-Si—PtSi barriers with highly-doped surface nanolayer // Proceeding of SPIE. V. 5056. USA. 2003. P. 127–134.
7. Tsaur B-Y., McNutt M. J., Bredthauer R. A., Mattson B. R. 128 × 128-element IrSi Schottky-barrier focal plane arrays for long wavelength infrared imaging // IEEE Electron Devices Lett. 1989. V. 10. P. 361–363.
8. Corbin E., Shaw M. J., Kitchin M. R., Jaros M., Konle J., Presting H. Structure and doping optimization of SiGe heterojunction internal photoemission detectors for mid-infrared application // Optical Engineering. 2001. V. 40. N 12. P. 2753–2762.
9. Машанов В. И., Чистохин И. Б., Зайцев Б. А., Пчеляков О. П., Соколов Л. В., Тишковский Е. Г., Фомин Б. И., Чепрев Е. И. Получение фоточувствительных ячеек матричного модуля ИК-диапазона 3–5 мкм на основе гетеропереходов Ge_xSi_{1-x}/Si и исследование их характеристик // Микроэлектроника. 1998. Т. 27. № 6. С 412–418.
10. Park J. S., Lin T. L., Jones E. W., Del Castillo H. M., George T., Gunapala S. D. Long-wavelength stacked Si_{1-x}Ge_x/Si

heterojunction internal photoemission infrared detectors // SPIE. 1993. 2020. P. 12–21.

11. Wada H., Nagahima M., Hayashi K. 512 × 512 element Ge-Si/Si heterojunction infrared FPA // Proc. SPIE. 1999. V. 3698. P. 584–595.

12. Strong R., Greve D. W., Misra R., Weeks M., Pellegrini P. GeSi infrared detectors // Thin Solid Films. 1997. V. 294. P. 343–346.

13. Tsaur B. Y., Chen C. K., Marino S. A. Heterojunction $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ infrared deyectors and focal plane arrays // Optical Engineering. 1994. V. 33. N 1. P. 72–78.

14. Karunasiri R. P. G., Park J. S., Wang K. L., and Chun S. K. Infrared photodetectors with SiGe/Si multiple quantum wells // Optical Engineering. 1994. V. 33. P. 1468–1476.

15. Shadrin V. D. Background limited infrared performance of n-type Si—SiGe (111) quantum well infrared photodetectors // Applied Physics Letters. 1994. V. 65. P. 70–72.

16. Kruck P., Helm M., Fromherz T., Bauer G. Medium wavelength, normal-incidence, p-type Si/SiGe quantum well infrared photodetector with background limited performance up to 85 K // Applied Physics Letters. 1996. V. 69. P. 3372–3374.

17. Jimenez J. R. Silicide/SiGe Schottky diode infrared detectors // Proc. SPIE. 1994. V. 2225. P. 393–403.

18. Xiao X., Sturm J. S., Parihar S. R., Lyon S. A., Meyerhofer D., Paifrey S., Shallcross F. V. Silicide/Strained Si_{1-x}Ge Schottky-barrier infrared detectors // IEEE Electron Devices Letters. 1993. V. 14. N 4. P. 199–201.

19. Dong L. An uncooled microbolometer infrared detector based on poly-SiGe thermistor // Sensors and Actuators A. 2003. V. 105. P. 286–292.

20. Chistokhin I. E. et al. Polycrystalline layers of silicon-germanium alloy for uncooled IR bolometers // Proc. SPIE. 2003. V. 5126. P. 407–414.

21. Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Несмолов С. Н. Инфракрасные детекторы на основе поверхностно-барьерных структур с внутренней фотоэмиссией // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16. № 9. С. 856–861.

22. Voitsekhovskii A. V., Kokhanenko A. P., Nesmолов S. N. Spectral detectivity and NETD of doping spike PtSi/p—Si and Ge-Si/Si HIP detectors // Opto-electronics review. 2003. V. 11. N 2. P. 161–168.

23. Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Несмолов С. Н. Пороговые характеристики инфракрасных детекторов на основе гетеропереходов GeSi/Si // Известия вузов. Физика. 2003. № 4. С. 26–28.

24. Ллойд Дж. Системы тепловидения: Пер. с англ. под ред. А. И. Горячева. М.: Мир, 1978. 415 с.

25. Lin T. L., Park J. S., Gunapala S. D., Jones E. W., del Castillo H. M. Photoresponse Model for $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ heterojunction Internal Photoemission Infrared Detectors // IEEE Electron Device Letters. 1994. V. 15. N 3. P. 103–105.

26. Lin T. L., Park J. S., Gunapala S. D., Jones E. W., Del Castillo H. M. $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ heterojunction internal photoemission long wavelength infrared detectors // Proc. SPIE. 1994. V. 2274. P. 17–23.

27. Uschmann J., Presting H., Kibbell H., Thonke K., Sauer R., Cabanskii W., Jaros M. IR-absorption and quantum efficiency of highly p-doped SiGe layers // Thin Solid Films. 1997. V. 294. P. 340–342.

28. Серебренников П. С. Расчет фоточувствительности многослойной гетероструктуры $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ с поглощением ИК излучения на свободных носителях // Тезисы совещания "Актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники". Новосибирск, 2003. С. 82.

УДК 537.533.2

В. Б. Шаров, Е. П. Шепин, д-р физ.-мат. наук,
А. А. Щука, д-р техн. наук,
Московский физико-технический институт

АВТОЭЛЕКТРОННЫЕ КАТОДЫ ИЗ ГРАФИТА ДЛЯ ДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Представлен новый технологический метод создания эффективных источников света. В качестве автоэмиссионного катода предлагается использовать конструкционные материалы из графита. Полученные результаты подтверждают перспективность рассматриваемого подхода. Данная технология может быть использована для создания различных катодолюминесцентных источников света в том числе плоских дисплейных экранов.

Введение

Первым прототипом источника света на основе автоэлектронного катода можно считать проектор Мюллера [1]. С тех пор принцип его действия, т. е. свечение люминофора под действием электронной бомбардировки, не изменился. Одним из важнейших требований к источнику света является равномерность и яркость свечения на максимальной площади светоизлучающего экрана.

Эти требования могут быть достигнуты только применением многоэмиттерных автоэмиссионных катодов. За последнее десятилетие было разработано множество конструкций источников света, в основном триодной конструкции, с различными типами автокатодов, например, с молибденовыми остриями [2], с пучками ПАН-волокон [3], с углеродными нанотрубками [4]. Они характеризуются достаточно большой яркостью и относительно малым напряжением управления.

Однако во многих случаях наиболее удобны диодные конструкции, так как они значительно проще в изготовлении и управлении, хотя и могут обладать меньшей яркостью. Наибольшая трудность в создании диодных плоских источников света — это обеспечение малого (на уровне десятков микрометров) расстояния анод—катод. И, самое главное, это расстояние должно быть строго одинаково по всей поверхности автокатода для обеспечения равномерной автоэмиссии по поверхности автокатода.

В данной работе предлагается диодная конструкция источника света на основе конструкционного графита [5].

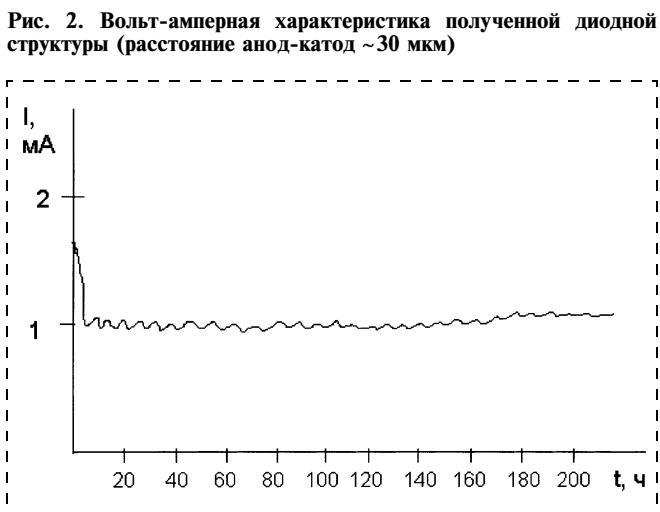
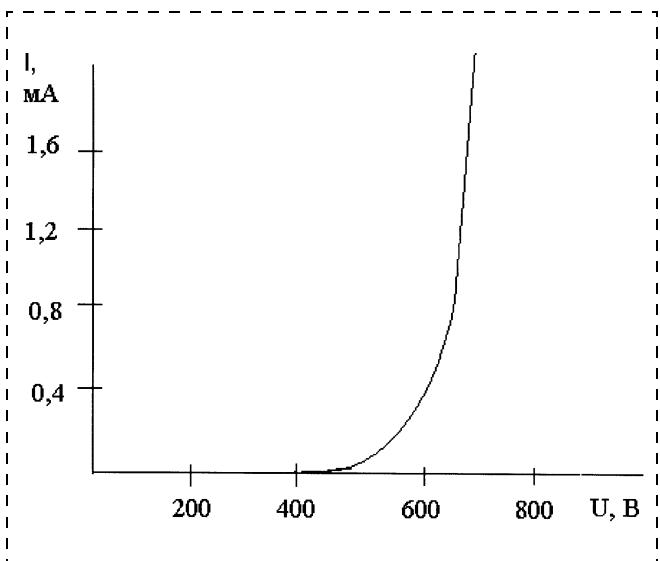
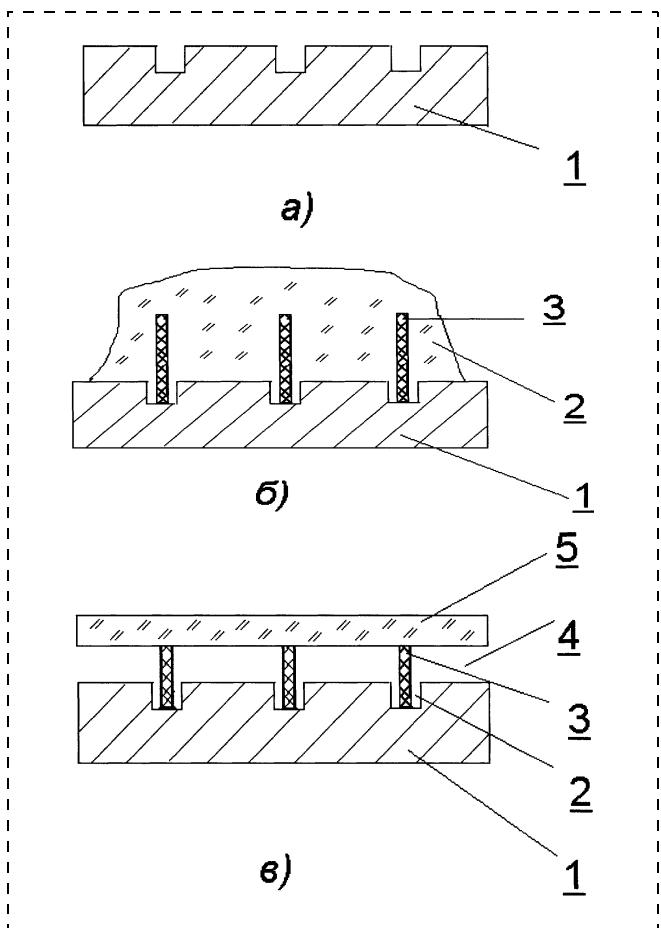
Конструкция и технология изготовления

Конструкция, а также основные этапы изготовления диодного источника света с автокатодом из конструкционного графита, представлены на рис. 1. На первом этапе из куска конструкционного графита (в данном случае МПГ-6) вырезалась заготовка размером $1 \times 1,5$ см. В полученной заготовке электроэррозионной резкой были сделаны пазы шириной 0,5 мм с шагом 1,5 мм (рис. 1, а). В полученные пазы устанавливались пластины из керамики типа "поликор" толщиной 0,5 мм. Полученная конструкция сверху заливалась шликером стеклоцемента (рис. 1, б). После кристаллизации стеклоцемента в муфельной печи при температуре 400 °C его сошлифовывают вместе с керамикой до появления поверхности графита. Затем проводилась шлифование абразивным порошком с калиброван-

ным размером зерна (в данном случае ~28 мкм). Поскольку твердость поликора близка к твердости абразива, а графит значительно мягче, то уровень поверхности графита сошлифовывается ниже плоскости торцов поликоровых пластин на значение, близкое к размеру частиц абразива. Тем самым создается простыми технологическими средствами постоянный малый зазор (30 мкм) по всей плоскости катода (рис. 1, в). На спейсера накладывается экран с люминофором и проводящим покрытием.

Шлифование поверхности графитового автокатаода абразивным порошком создает, кроме того, необходимый для эффективной автоэмиссии рельеф поверхности.

Спейсера, кроме обеспечения точного расстояния анод—катод, обеспечивают равномерную нагрузку на анодную и катодную пластины для ком-



пенсации атмосферного давления и кондерометрических нагрузок во время работы прибора.

Испытания макета прибора проводились в режиме постоянного напряжения в вакуумной камере с давлением остаточных газов на уровне $10^{-6}\text{--}10^{-7}$ мм рт. ст.

Результаты экспериментов

Результаты автоэмиссионных измерений полученной диодной структуры представлены на рис. 2 и 3. Заметный автоэмиссионный ток начинается при напряжении 500 В. После первого включения ток уменьшался до 1 мА и в течение 200 ч незначительно возрастал. Так как долговременные испытания происходили в циклическом режиме (т. е. отключение напряжения и откачки в ночное время), то при каждом включении возникало увеличение тока, которое через 0,5–1 ч исчезало.

Автоэмиссионное изображение состояло из мелких ярких точек, расположенных почти вплотную друг к другу. Этот факт равномерной засветки экрана поверхностью графитового катода характеризует высокую равномерность микровыступов на поверхности графита.

Предварительные эксперименты по созданию источника света диодной конструкции на основе автокатода из конструкционного графита показали перспективность такого подхода. Оценки показывают, что при использовании тонкопленочного люминофора и более мелкого абразивного порошка для шлифования автокатодных структур, можно ожидать получения диодных структур с рабочим напряжением 200–300 В.

Список литературы

1. Müller E. W. Electronenmicroskopische Beobachtungen von Feldkathoden // Zs. f. Phys. 1937. Bd. 106. P. 541–550.
2. Kondo Y., Matsuura J., Kimura H. Characteristics of field emitter arrays for light source // Techn. digest of J VMC 91, Nagahama, Japan. 1991. P. 56–57.
3. Батурина А. С., Кафтанов В. С., Кузьменко С. Г., Шешина Е. П. Патент России № 2180145 от 15.02.2000, кл. Но Ij 1/28.
4. Saito Y., Hamaguchi K., Mirushima R. et al. Field emission from carbon nanotubes and its application to cathode ray tube lighting elements // Appl. Surf. Sci. 1999. N 146. P. 305–311.
5. Шаров В. Б., Шешин Е. П. Автоэлектронные катоды из графита для систем отображения информации // Тезисы докладов XLIV Научной конференции МФТИ "Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук". Москва—Долгопрудный. Часть V. 2001. С. 4.

УДК 621.3.049.77

А. А. Мятиев, канд. техн. наук, Н. И. Дьяченко,
А. Л. Помадчик, П. Б. Страумал,
Д. В. Прохоренков,
Московский Институт стали и сплавов

СИНТЕЗ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ $\text{Ce}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_y$

Приведены результаты рентгенофазового анализа порошков системы $\text{Ce}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_y$, где $x = 0,3\text{--}0,55$, полученных пиролизом карбоксилатов церия и висмута при 500°C с последующим отжигом при 700 , 800 и 1000°C . Порошки состоят преимущественно из кубической фазы двух видов, различающихся параметром решетки, образующихся при низкой и высокой температуре. Размер кристаллитов кубической фазы равен 10 нм при 700°C и 40 нм при 1000°C .

Введение

В последние годы в мире наблюдается резкая активизация научной деятельности в области получения и исследования свойств наноразмерных

оксидных керамических материалов. Этот интерес вызван двумя обстоятельствами. Во-первых, свойства наноразмерных материалов радикально отличаются от свойств микроразмерных материалов. Как правило, характерные высокотемпературные свойства микроразмерных материалов начинают проявляться в наноматериалах при существенно более низкой температуре. Кроме того, некоторые оксидные наноматериалы проявляют уникальные физические свойства, которые открывают принципиально новые возможности применения таких материалов в электрохимии, электронике, катализе и многих других областях. Во-вторых, использование нанопорошков открывает перспективу для разработки эффективных и экономичных технологий изготовления керамических и композиционных изделий.

В области специальной керамики особое место занимают материалы, обладающие ионной (кислородной) проводимостью — так называемые кислородные электролиты. Они применяются в топливных элементах (solid oxide fuel cells), сенсорах, кислородных сепараторах, электрохимических установках производства сингаза. Основное требование к

таким материалам — это высокая и стабильная ионная проводимость, которая определяется главным образом структурой. Оксиды циркония, церия и висмута, обладающие кубической флюоритной структурой с пространственной группой Fm3m, представляют собой традиционные электролитные материалы, причем ионная проводимость для этих оксидных материалов повышается в ряду $ZrO_2 < CeO_2 \ll Bi_2O_3$.

Чистая двуокись церия имеет флюоритную структуру, однако из-за склонности к потере кислорода и восстановлению церия в результате фазовых превращений в ней преобладает электронная проводимость [1]. Для стабилизации флюоритной структуры и получения чисто ионной проводимости в двуокись церия вводят оксиды лантаноидов [2] или иттрия [3].

Чистая окись висмута при высокой температуре также обладает кубической структурой с очень высокой ионной проводимостью. Однако при температуре ниже 723 °С кубическая структура переходит в моноклинную. При этом ионная проводимость понижается на три порядка [4]. В целях стабилизации кубической фазы в оксид висмута вводят оксиды трехвалентных металлов M_2O_3 ($M = Yb, Er, Y, Ho, Dy$) [4, 5]. Однако в условиях понижения температуры и парциального давления кислорода проблема сохранения фазовой стабильности, а следовательно, высокой ионной проводимости, остается.

Кроме того, для стабилизированных оксидов церия и висмута характерно повышение электронной проводимости в результате фазовой дестабилизации на границе зерна, которая проявляется тем сильней, чем меньше размер кристаллитов. Таким образом, получение стабильной кубической фазы в нанокристаллическом состоянии является своего рода показателем структурной стабильности и необходимым условием высокой ионной проводимости [6].

Данная статья посвящена исследованию возможности получения нанокристаллической кубической флюоритной фазы в системе $Ce_{1-x}Bi_xO_y$. Несмотря на огромное число исследований керамики на базе оксида церия и оксида висмута двойная система $Ce_{1-x}Bi_xO_y$ исследована очень мало. Оксид висмута выбран в качестве стабилизатора флюоритной фазы исходя из прогноза зависимости ионной проводимости оксида церия от ионного радиуса катиона легирующего металла [7]. В частности, максимальная ионная проводимость наблюдается при легировании оксида церия окисью самария. Ионный радиус Sm^{3+} 0,109 нм, а радиус Bi^{3+} 0,111 нм.

Методика получения образцов и исследования

В качестве стартовых материалов для получения нанопорошков взяты растворы карбоксилатов (соли изо-масляной кислоты) церия и висмута при концентрациях соответственно 82 и 60,2 г/кг. Карбоксилаты церия и висмута смешивались в заданных молярных соотношениях. Приготовлено пять серий образцов, различающихся соотношением концентраций Ce/Bi: 45 : 55, 50 : 50, 55 : 45, 60 : 40 и 70 : 30.

Нанопорошки для каждой серии получали путем пиролиза карбоксилатов на воздухе при температуре 500 °С с последующим отжигом при температурах 700, 800 и 1000 °С. После отжига от каждой серии отбиралась проба для рентгенофазового анализа.

Рентгенофазовый анализ полученных образцов проводили на дифрактометрах ДРОН-3 и ДРОН-4 с использованием CuKa-излучения. Диапазон съемки по углу 2θ варьировался от 10 до 150°. Для съемки спектра образец смешивался с вазелином. Полученные дифрактограммы анализировались на ЭВМ с использованием стандартного комплекса программ (автор программ Е. В. Шелехов, МИСиС). Для проведения количественного фазового анализа, т. е. определения объемных или массовых долей фаз, входящих в поликристаллический образец по дифракционному спектру, использовалась программа PHAN %. Для определения физического уширения применяли германевый эталон.

Результаты и обсуждение

Было приготовлено пять серий образцов смеси карбоксилатов церия и висмута. Расчетное и экспериментально определенное методом плазменной спектроскопии содержание церия и висмута представлено в табл. 1.

Таблица 1

Содержание церия и висмута в исследованных сериях образцов

Серия	Расчетное		Экспериментальное	
	Ce, мол. %	Bi, мол. %	Ce, мол. % (ошибка, %)	Bi, мол. % (ошибка, %)
1	45	55	—	—
2	50	50	55,01 (+10,02)	44,99 (-10,02)
3	55	45	—	—
4	60	40	61,98 (+3,3)	38,02 (-3,3)
5	70	30	70,94 (+1,34)	29,06 (-1,34)

Синтез при температуре 700 °C. По данным рентгено-фазового анализа (РФА) после трехчасового отжига порошков при температуре 700 °C в состав осадков кроме кубической фазы оксида церия (cF12/1) входит оксикарбонат висмута (тетрагональная фаза tI54/3) и оксид висмута (моноклинная фаза mP20/4). Причем оксид висмута наблюдался при большом содержании висмута в исходных составах (серии 1–3). При содержании висмута меньше 45 мол.% порошки состояли из кубического оксида церия и оксикарбоната висмута (серии 4 и 5). Объемная доля кубической фазы в порошках повышалась от 77,3 % (серия 1) до 92,6 % (серия 5).

Наличие оксикарбоната висмута в порошках говорит о соосаждении углерода при разложении металлоорганических растворов и об ограничении окислительных условий экспериментов.

После девятичасового отжига при 700 °C (по данным РФА) порошки серии 1–3 содержат кубическую фазу CeO_y и моноклинную Bi_2O_3 , а порош-

ки серий 4 и 5 состоят только из кубической фазы CeO_y . Характерно, что при увеличении времени отжига при 700 °C с 3 до 9 ч содержание кубической фазы повышается.

На рис. 1 показаны рентгенограммы серии порошков после девятичасового отжига при температуре 700 °C, а в табл. 2 приведены результаты РФА порошков, отожженных при 700 °C в течение 9 ч.

Синтез при температуре 800 °C. По данным РФА после трехчасового отжига порошков при 800 °C в серии порошков 1 и 2 кроме кубической фазы CeO_y наблюдался тетрагональный оксид висмута; в порошке серий 3 — CeO_y , Bi_2O_3 — тетрагональный оксид и $\text{B}i_2\text{O}_2\text{CO}_3$; в порошках серий 4 и 5 — CeO_y и $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{CO}_3$. Появление метастабильного тетрагонального оксида висмута при 800 °C вместо моноклинного оксида висмута при 700 °C закономерно и соответствует фазовой диаграмме $\text{Bi}-\text{O}$ [8]. Содержание кубической фазы и размер кри-

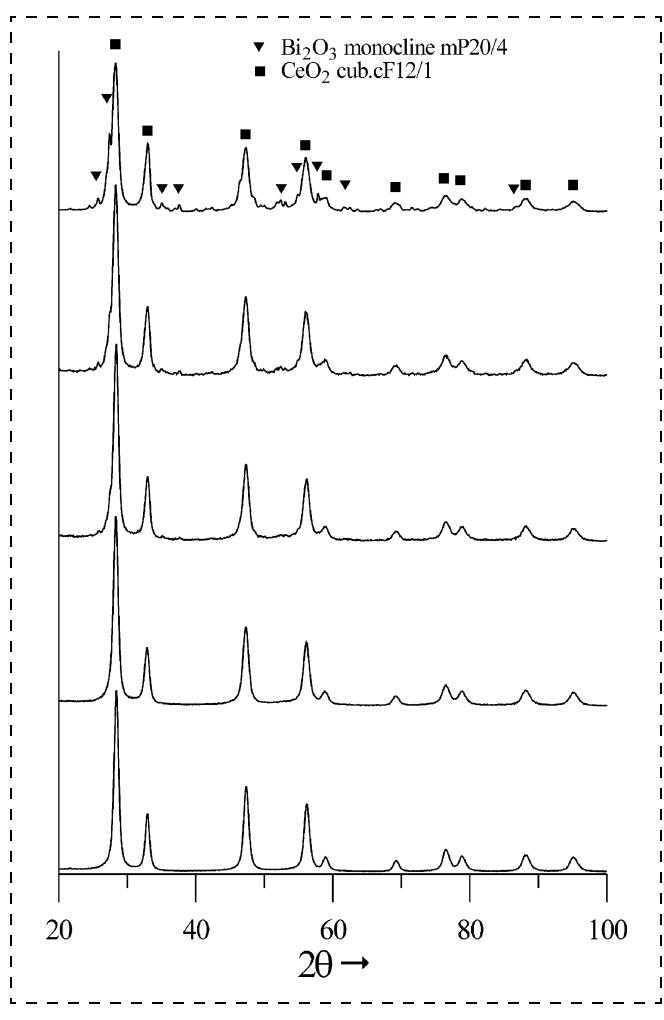


Рис. 1 Рентгенограммы порошков $\text{Ce}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}$ после отжига при температуре 700 °C в течение 9 ч. Рентгенограммы образцов серий 1–5 расположены сверху вниз

Таблица 2
Результаты РФА порошков после девятичасового отжига
при 700 °C

Серия	Фаза	Тип	Объем- ная до- ля, %	Парамет- ры ре- шетки, нм	Размер блока, нм
1	CeO_y	cF12/1 куб.	81,7	0,5424	11,0
	Bi_2O_3	mP20/4 мнкл	14,6	$A = 0,5838$ $B = 0,8140$ $C = 0,7490$ $\beta = 112,97^\circ$	29,8
2	CeO_y	cF12/1 куб.	89,1	0,5422	11,7
	Bi_2O_3	mP20/4 мнкл	10,9	$A = 0,5838$ $B = 0,8132$ $C = 0,7484$ $\beta = 112,94^\circ$	26,7
3	CeO_y	cF12/1 куб.	92,7	0,5420	13,2
	Bi_2O_3	mP20/4 мнкл	7,3	$A = 0,5842$ $B = 0,8124$ $C = 0,7486$ $\beta = 113,07^\circ$	21,8
4	CeO_y	cF12/1 куб.	100	0,5420	12,3
5	CeO_y	cF12/1 куб.	100	0,5422	14,2

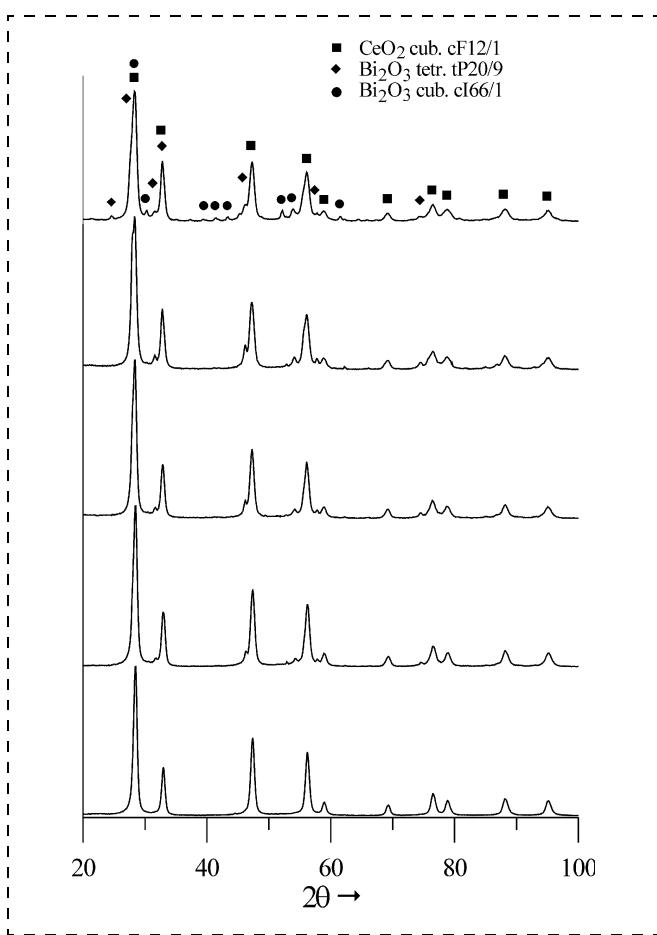


Рис. 2. Рентгенограммы порошков $\text{Ce}_{1-x}\text{Bi}_x\text{-O}$ после отжига при температуре $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 10 ч. Рентгенограммы образцов серий 1–5 расположены сверху вниз

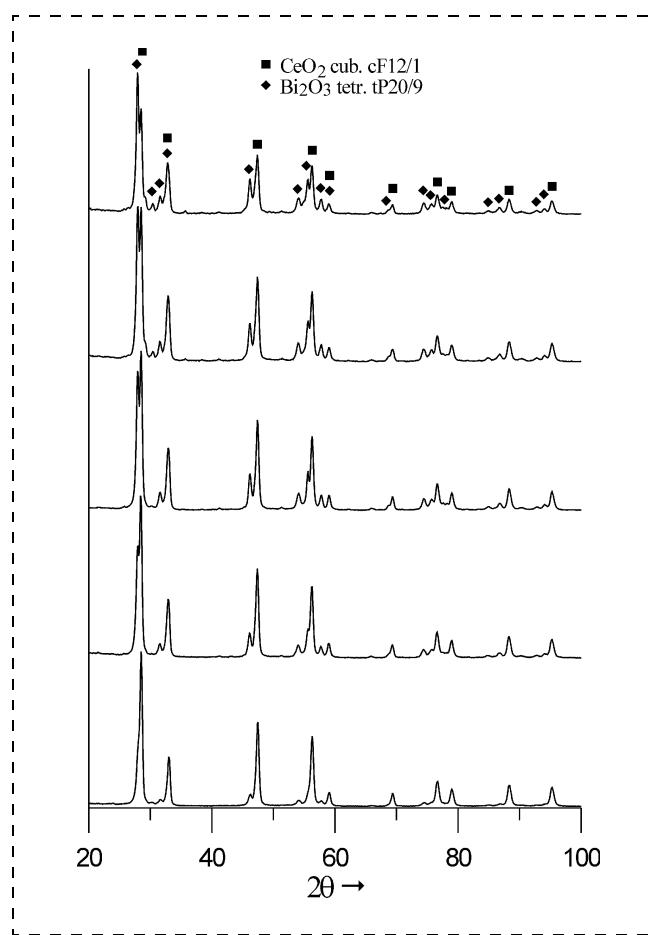


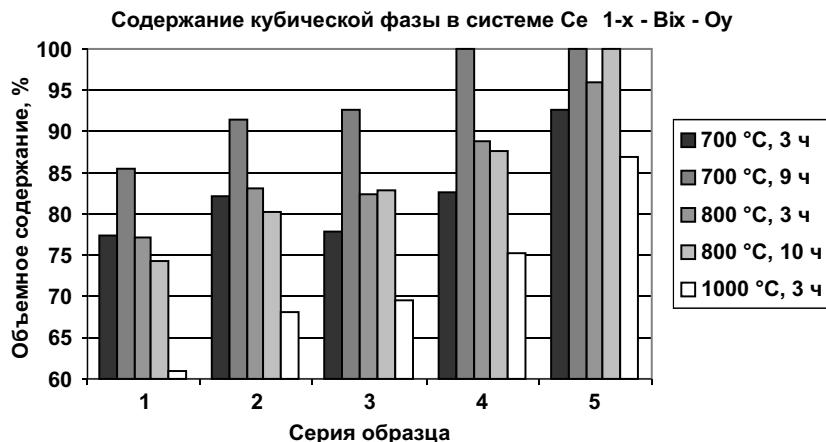
Рис. 3. Рентгенограммы порошков $\text{Ce}_{1-x}\text{Bi}_x\text{-O}$ после отжига при температуре $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 3 ч. Рентгенограммы образцов серий 1–5 расположены сверху вниз

Таблица 3
Результаты РФА порошков после десятичасового отжига
при $800\text{ }^{\circ}\text{C}$

Серия	Фаза	Тип	Объем-ная до-ля, %	Парамет-ры решет-ки, нм	Размер блока, нм
1	CeO_y	cF12/1 куб.	74,4	0,5423	18,0
	Bi_2O_3	cI66/1 куб.	9,2	1,0204	26,2
	Bi_2O_3	tP20/9 тетр.	16,3	$A = 0,7712$ $C = 0,5656$	26,1
2	CeO_y	cF12/1 куб.	80,3	0,5422	18,5
	Bi_2O_3	tP20/9 тетр.	19,7	$A = 0,7712$ $C = 0,5648$	21,8
3	CeO_y	cF12/1 куб.	82,8	0,5422	21,3
	Bi_2O_3	tP20/9 тетр.	17,2	$A = 0,7708$ $C = 0,5645$	21,8
4	CeO_y	cF12/1 куб.	87,7	0,5422	20,1
	Bi_2O_3	tP20/9 тетр.	12,3	$A = 0,77086$ $C = 0,5645$	16,7
5	CeO_y	cF12/1 куб.	100	0,5422	18,0

Таблица 4
Результаты РФА порошков после трехчасового отжига
при $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$

Серия	Фаза	Тип	Объем-ная до-ля, %	Парамет-ры решет-ки, нм	Размер блока, нм
1	CeO_y	cF12/1 куб.	61,0	0,5418	30,2
	Bi_2O_3	tP20/9 тетр.	39,0	$A = 0,7732$ $C = 0,5656$	24,3
2	CeO_y	cF12/1 куб.	68,2	0,5418	29,1
	Bi_2O_3	tP20/9 тетр.	31,8	$A = 0,7727$ $C = 0,5659$	28,2
3	CeO_y	cF12/1 куб.	69,5	0,5418	41,9
	Bi_2O_3	tP20/9 тетр.	30,5	$A = 0,7726$ $C = 0,5657$	27,5
4	CeO_y	cF12/1 куб.	75,3	0,5418	40,2
	Bi_2O_3	tP20/9 тетр.	24,7	$A = 0,7723$ $C = 0,5661$	26,9
5	CeO_y	cF12/1 куб.	86,8	0,5418	36,7
	Bi_2O_3	tP20/9 тетр.	13,2	$A = 0,7722$ $C = 0,5657$	26,8

Рис. 4. Содержание кубической фазы CeO_y в системе $\text{Ce}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_y$

сталлитов для порошков всех серий чуть больше, чем содержание кубической фазы и размер кристаллитов порошков после трехчасового отжига при 700 °C. Существенное отличие наблюдалось только для параметра решетки кубической фазы CeO_y . Для всех порошков серий 1–5 параметр решетки заметно больше, чем параметр решетки кубической фазы порошков после трехчасового отжига при 700 °C.

После десятичасового отжига при 800 °C порошки серий 1–4 содержат кубическую фазу CeO_y и Bi_2O_3 . Для порошка серии 5 наблюдалась только кубическая фаза CeO_y .

Рентгенограммы порошков после десятичасового отжига при 800 °C приведены на рис. 2, а данные РФА — в табл. 3.

Синтез при температуре 1000 °C. По данным РФА после трехчасового отжига при 1000 °C порошки всех серий содержат две фазы: кубическую CeO_y и тетрагональную Bi_2O_3 , причем по сравнению с порошками, полученными при более низких температурах, содержание кубической фазы значительно меньше. Размер кристаллитов при 1000 °C возрос, однако, не так сильно, как ожидалось.

На рис. 3 приведены рентгенограммы порошков после трехчасового отжига при 1000 °C, а в табл. 4 — данные РФА.

На рис. 4 показаны итоговые данные содержания кубической фазы в системе $\text{Ce}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_y$ для образцов всех пяти серий. Анализируя результаты, можно предположить следующее. При 700 °C содержание кубической фазы повышается в ряду $\text{Ce}_{0,45}\text{Bi}_{0,55}\text{O}_y \rightarrow \text{Ce}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{O}_y \rightarrow \text{Ce}_{0,55}\text{Bi}_{0,45}\text{O}_y \rightarrow \text{Ce}_{0,6}\text{Bi}_{0,4}\text{O}_y \rightarrow \text{Ce}_{0,7}\text{Bi}_{0,3}\text{O}_y$, причем для серий 1–3 при увеличении времени синтеза с 3 до 9 ч образование кубической фазы происходит как за счет

оксикарбоната висмута, так и за счет моноклинного оксида висмута. После девятичасового отжига для образцов $\text{Ce}_{0,6}\text{Bi}_{0,4}\text{O}_y$ и $\text{Ce}_{0,7}\text{Bi}_{0,3}\text{O}_y$ наблюдается 100 %-ное содержание кубической фазы.

При 800 °C 100 %-ное содержание кубической фазы получено только для состава $\text{Ce}_{0,7}\text{Bi}_{0,3}\text{O}_y$ при десятичасовом синтезе. Для образцов остальных серий содержание кубической фазы повышается в ряду $\text{Ce}_{0,45}\text{Bi}_{0,55}\text{O}_y \rightarrow \text{Ce}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{O}_y \rightarrow \text{Ce}_{0,55}\text{Bi}_{0,45}\text{O}_y \rightarrow \text{Ce}_{0,6}\text{Bi}_{0,4}\text{O}_y \rightarrow \text{Ce}_{0,7}\text{Bi}_{0,3}\text{O}_y$, однако содержание кубической фазы ниже, чем для тех же образцов после синтеза при 700 °C. Можно заключить, что кубическая фаза при 800 °C менее стабильна, чем при 700 °C при прочих равных условиях. Причем, возможно, это происходит в результате образования высокотемпературной, хотя и метастабильной тетрагональной (а для образца $\text{Ce}_{0,45}\text{Bi}_{0,55}\text{O}_y$ — кубической) фазы оксида висмута.

При 1000 °C содержание кубической фазы также повышается в ряду $\text{Ce}_{0,45}\text{Bi}_{0,55}\text{O}_y \rightarrow \text{Ce}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{O}_y \rightarrow \text{Ce}_{0,55}\text{Bi}_{0,45}\text{O}_y \rightarrow \text{Ce}_{0,6}\text{Bi}_{0,4}\text{O}_y \rightarrow \text{Ce}_{0,7}\text{Bi}_{0,3}\text{O}_y$, однако по сравнению с образцами, полученными при 800 °C (и тем более при 700 °C) содержание кубической фазы существенно меньше, т. е. полученная кубическая фаза является более стабильной при пониженных температурах и метастабильной при высоких температурах. Это противоречит факту высокотемпературной стабильности кубической фазы CeO_3 и ее дестабилизации с понижением температуры, т. е. полученная кубическая фаза имеет структуру, не идентичную кубической структуре CeO_2 .

Необходимо отметить, что использованный метод синтеза позволяет получать кристаллиты от 10 нм (при 700 °C) до 40 нм (при 1000 °C), причем размер кристаллитов для составов $\text{Ce}_{0,45}\text{Bi}_{0,55}\text{O}_y$,

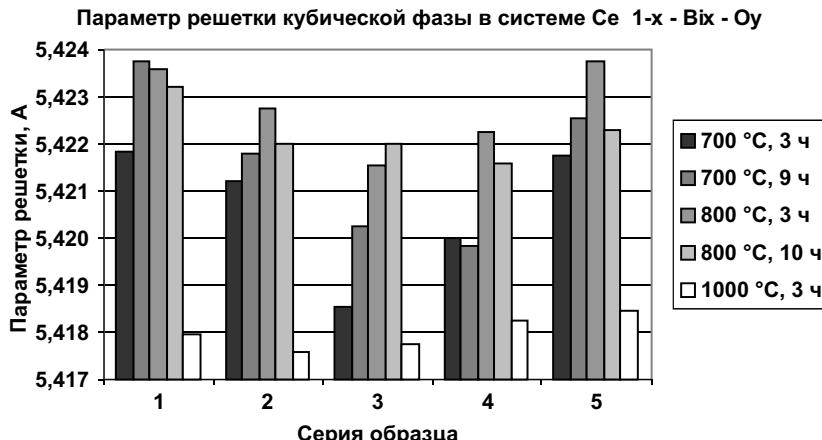


Рис. 5. Параметр решетки кубической фазы CeO_y в системе $\text{Ce}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_y$

$\text{Ce}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{O}_y$, $\text{Ce}_{0.55}\text{Bi}_{0.45}\text{O}_y$, $\text{Ce}_{0.6}\text{Bi}_{0.4}\text{O}_y$, $\text{Ce}_{0.7}\text{Bi}_{0.3}\text{O}_y$ изменяется очень незначительно.

Анализ этих данных показывает, что параметр решетки в ряду $\text{Ce}_{0.45}\text{Bi}_{0.55}\text{O}_y \rightarrow \text{Ce}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{O}_y \rightarrow \text{Ce}_{0.55}\text{Bi}_{0.45}\text{O}_y$ уменьшается для образцов с температурой синтеза 700 и 800 °C. Это легко объяснить с позиции понижения содержания Bi^{3+} , ионный радиус которого больше, чем у Ce^{4+} (0,111 и 0,097 нм соответственно). Однако при дальнейшем уменьшении содержания висмута параметр решетки начинает увеличиваться, причем для 100 %-ной кубической фазы, полученной при 700 °C (9 ч) и 800 °C (10 ч) составов $\text{Ce}_{0.6}\text{Bi}_{0.4}\text{O}_y$ и $\text{Ce}_{0.7}\text{Bi}_{0.3}\text{O}_y$, параметры кубической решетки практически не различаются — 0,5420 и 0,5422 нм.

Для образцов, синтезированных при 1000 °C, параметр решетки кубической фазы меньше, чем параметр решетки образцов, синтезированных при 700 и 800 °C при прочих равных условиях. Причем при изменении состава (содержания церия и висмута) параметр решетки практически не изменяется ($0,5418 \pm 0,00005$ нм).

Как известно из литературы, параметр решетки чистой кубической двуокиси церия, которая по сути представляет собой твердый раствор $\text{CeO}_{1.5}$ и CeO_2 , равен 0,5411 нм [9], а $\text{Ce}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{O}_{1.79}$ — 0,5423 нм [2]. Очевидно, что для составов $\text{Ce}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_y$, где $x = 0,3 \div 0,55$, параметр решетки должен быть существенно больше, чем для $\text{Ce}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{O}_{1.79}$, если бы структура кубической фазы формировалась с участием катионов Ce^{4+} и Bi^{3+} . Однако параметр решетки синтезированной кубической фазы лежит между значениями, характерными для твердого раствора $\text{CeO}_{1.5}$ и CeO_2 и твердого раствора 0.8CeO_2 и $0.2\text{Sm}_2\text{O}_3$.

Вместе с тем, известно, что параметр решетки $\text{CeO}_{1.5}$ составляет 0,5575—0,5600 нм [11], а па-

метр решетки кубической $\text{BiO}_{1.35}$ — 0,545 нм [4]. Эти решетки формируются главным образом с участием катиона Bi^{3+} и высокой концентрации кислородных вакансий.

На основании приведенных данных можно выдвинуть предположение, что синтезированная кубическая фаза в системе $\text{Ce}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_y$, где $x = 0,3 \div 0,55$, представляет собой субрешетку, состоящую из комбинации катионов Ce^{4+} , Ce^{3+} , Bi^{3+} и упорядоченных кислородных вакансий при их высокой концентрации. Простым вариантом такой решетки может быть твердый раствор Bi^{3+} в CeO_2 и Ce^{3+} в Bi_2O_3 . Такое предположение объясняет факт стабильной кубической фазы, синтезированной при 700 °C, и ее дестабилизации при 1000 °C, когда концентрация Ce^{3+} понижается. Кроме того, для такой субрешетки возможен вариант уменьшения, а затем увеличения параметра решетки при уменьшении концентрации висмута в пределах от 55 до 30 мол. %.

Кубическая фаза, синтезированная при 1000 °C, вероятно, представляет собой трансформацию субрешетки в простую кубическую решетку, в которой катион Ce^{4+} замещается катионом Bi^{3+} , как это характерно электролитам на базе оксида церия, стабилизированного иттрием, гадолинием или самарием. Как следствие высказанного выше предположения, следует ожидать аномально высокую мобильность ионов кислорода в субрешетке, соизмеримой с проводимостью чистого кубического оксида висмута, в то время как мобильность ионов кислорода в материале, синтезированном при 1000 °C, будет соизмерима с ионной проводимостью известных электролитов на базе двуокиси церия, стабилизированной иттрием, гадолинием или самарием. Запланированное прямое измерение проводимости синтезированных материалов системы $\text{Ce}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_y$

позволит подтвердить или опровергнуть выдвинутые предположения.

Заключение

Проведено исследование синтеза нанокристаллического материала системы $\text{Ce}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_y$, где $x = 0,3 \div 0,55$, путем пиролиза раствора карбоксилатов висмута и церия при температуре 500 °C с последующим отжигом при 700, 800 и 1000 °C. Полученные порошки преимущественно состоят из кубической флюоритной фазы с размером кристаллитов от 10 до 40 нм. Обнаружена аномалия изменения параметра решетки в зависимости от состава и температуры. Выдвинуто предположение о возможности формирования субрешетки в системе $\text{Ce}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_y$, которая стабильна при средних температурах и дестабилизируется при 1000 °C.

Список литературы

1. Mogensen M., Sammes N. M., Tompsett G. A. Physical, chemical and electrochemical properties of pure and doped ceria // Solid State Ionics. 2000. N 129. P. 63—94.

2. Yoshida H., Deguchi H., Miura K., Horiuchi M., Inagaki T. Investigation of the relationship between the ionic conductivity and the local structures of singly and doubly doped ceria compounds using EX-AFS measurement // Solid State Ionics. 2001. N 140. P. 191—199.
3. Tian C., Chan Siu-Wai. Ionic conductivities, sintering temperatures and microstructures of bulk ceramic CeO_2 doped with Y_2O_3 // Solid State Ionics. 2000. N 134. P. 89—102.
4. Kharton V. V., Naumovich E. N., Yaremchenko A. A., Marques F. M. B. Research on the electrochemistry of oxygen ion conductors in the former Soviet Union. Bismuth oxide-based ceramics // Solid State Electrochem. 2001. N 5. P. 160—187.
5. Boyapati S., Wachsman E. D., Jiang N. Effect of oxygen sub-lattice ordering on interstitial transport mechanism and conductivity activation energies in phase-stabilized cubic bismuth oxides // Solid State Ionics. 2001. N 140. P. 149—160.
6. Mori T., Drennan J., Lee J.-H., Li Ji-G., Ikegami T. Oxide ionic conductivity and microstructures of Sm- or La-doped CeO_2 -based systems // Solid State Ionics. 2002. N 154—155. P. 461—466.
7. Yoshida H., Deguchi H., Miura K., Horiuchi M., Inagaki T. Investigation of the relationship between the ionic conductivity and the local structures of singly and doubly doped ceria compounds using EX-AFS measurement // Solid State Ionics. 2001. N 140. P. 191—199.
8. Фомченков Л. П., Майер А. А., Грачева Н. А. Неорганические материалы. 1974. Т. 10. 2020 с.
9. Chavan S. V., Tyagi A. K. Combustion Synthesis of nanocrystalline yttria-doped ceria // Mater. Res. 2004. V. 19. N 2. P. 474—480.
10. Wu L., Wiesmann H. J., Moodenbaugh A. R., Klie R. F., Zhu Y., Welch D. O. and Suenaga M. Oxidation state and lattice expansion of $\text{CeO}_2 - x$ nanoparticles as a function of particle size // Physical Review. 2004. В 69. 125415.

12-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция

студентов и аспирантов

"Микроэлектроника и информатика — 2005"

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет) проводит 19—21 апреля 2005 г.

12-ю Всероссийскую межвузовскую научно-техническую конференцию
"Микроэлектроника и информатика — 2005".

Оргкомитет приглашает молодых исследователей принять участие в работе конференции.

Научные направления работы конференции (по секциям).

1. Физика и технология изделий микро- и наноэлектроники.
2. Материалы и компоненты электронной техники.
3. Проектирование электронных компонентов и систем.
4. Микросистемы и микромеханика.
5. Биомедицинская электроника.
6. Опто- и акустоэлектроника.
7. Математические модели и алгоритмы в информатике.
8. Управляющие и вычислительные системы и приборы.
9. Автоматизированные информационные системы.
10. Телекоммуникационные системы и связь.
11. Технологическое оборудование микроэлектроники.
12. Экологические аспекты микро- и наноэлектроники.
13. Менеджмент и маркетинг наукоемких производств.
14. Интегрированные системы менеджмента качества.

По итогам работы секций будет проводиться конкурс работ, авторами которых являются только студенты и аспиранты. Лучшие работы будут отмечены дипломами.

Ответственный секретарь Оргкомитета Харач Валентина Павловна.
Тел. (095) 532-98-30, факс (095) 530-54-29, электронная почта: id@rnd.miee.ru
(тезисы по электронной почте не принимаются).

Адрес Оргкомитета

124498, Москва, К-498, ГОУ ВПО Московский государственный институт электронной техники (ТУ),
ОНТИ, на конференцию "МЭИнфо—2005".

УДК 537.533.2

А. С. Куприяшкин,
Е. П. Шешин, д-р физ.-мат. наук, проф.,
А. А. Щука, д-р техн. наук, проф.,
 Московский физико-технический институт, sheshin@lafeet.mipt.ru

МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АВТОЭЛЕКТРОННЫХ КАТОДОВ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Представлена классификация основных современных методов изготовления автокатодов из двух больших классов углеродных материалов. Первый — это материал промышленного производства, а второй — это непосредственно сформированные автокатодные структуры. Также кратко изложены особенности конкретных методов изготовления автокатодов.

Введение

В настоящее время значительное число исследовательских групп и лабораторий во всем мире интенсивно занимаются разработкой автоэлектронных катодов на основе углеродных материалов в качестве источников свободных электронов, которые требуются для широкого спектра электронных приборов: плоских дисплейных экранов, источников света, СВЧ-приборов, рентгеновских трубок и т. д.

С момента опубликования первых работ по автоэлектронной эмиссии углеродных волокон [1, 2] работы по созданию автокатодов из углеродных материалов выделились в мощное самостоятельное направление вакуумной электроники. За прошедшие годы в качестве материалов автокатодов было исследовано, в том числе и в МФТИ, множество типов и разновидностей углеродных материалов различной природы, а также разработаны соответствующие методики изготовления автокатодов.

Классификация основных методик изготовления автокатодов из углеродных материалов, сложившихся на сегодняшний день, представлена на рис. 1.

Все современные автокатоды из углеродных материалов можно разделить на два больших класса. К первому относятся ав-

токатоды, изготовленные из материалов промышленного производства. Второй класс объединяет непосредственно сформированные автокатодные структуры.

Автокатоды из углеродных материалов промышленного производства

Углеродные материалы, выпускаемые промышленностью в основном для конструкционных целей, имеют широчайший диапазон марок, предназначенных для конкретных технических применений. Однако ни одна фирма в

мире никогда не разрабатывала углеродные материалы специально для автокатодов. Поэтому в силу широко известных требований, предъявляемых к материалам автокатодов [3], только некоторые из них могут представлять интерес для изготовления последних.

На сегодняшний день к наиболее перспективным материалам промышленного производства для изготовления автокатодов можно отнести:

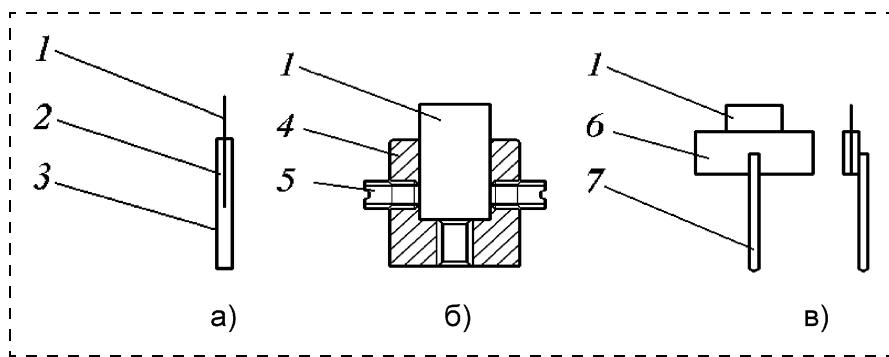
- поликарбонитрильные углеродные волокна (ПАН-волокна);
- некоторые марки конструкционных графитов;
- пирографиты;
- стеклоуглерод, в том числе и вспененный.

Особенности структуры этих материалов и их основные автоэмиссионные свойства приведены в работе [3].

Наиболее простой и дающий наилучшие автоэмиссионные свойства способ изготовления автокатодов из углеродных материалов — механическая обработка. Для ПАН-волокон — это скол в направлении, перпендикулярном оси волокна. Для остальных



Рис. 1. Классификация основных направлений методов изготовления автокатодов из углеродных материалов



материалов — это механическая обработка: фрезерная, токарная и т. д. Наилучший результат (с точки зрения сохранения чистоты материала) дает применение алмазного инструмента. Как правило, форма и размер автокатода соответствуют конфигурации начального электронного пучка. Поэтому конструкции и размеры держателей автокатодов можно условно разбить на три группы (рис. 2).

Наиболее простые конструкции используются для единичных автокатодов. На рис. 2 приведены некоторые примеры схем конструкций держателей с механическим креплением углеродных заготовок автокатодов.

Образцы небольшого сечения и особенно ПАН-волокна лучше

всего закрепляются внутри трубы со ответствующего диаметра с помощью аквадага, который кроме механической фиксации дает хороший тепловой и электрический контакт. Образцы большого поперечного сечения ($> 5 \times 5$ мм) из конструкционных марок графита (например, МПГ-6) наиболее просто и эффективно закрепляются в держателях с винтовыми креплениями (рис. 2, б).

Тонкие пластины (например, пирографита) удобнее всего закреплять между металлическими пластинами с помощью контактной или лазерной сварки.

В тех случаях, когда необходимо обеспечить расположение автокатодов в определенном порядке (например, для матричных автокатодов), используются различ-

ные варианты фиксации углеродных автокатодов в диэлектрике.

Один из способов состоит в использовании специальных полимеров, совместимых с вакуумным производством. Такой способ целесообразно использовать при изготовлении конкретных автокатодных структур (рис. 3) [4]. Пучки углеродных волокон (чистые или в покрытии металлом, например, никелевых трубках) 1 вручную монтируют во фторопластовую оправку. В этом случае шаг волокна трудно получить менее 1 мм.

Далее всю структуру заливают полимеризующимся диэлектриком, в качестве которого может быть применен кремнийорганический полимер, дифенилолпропан, модифицированный полиграносилоксаном или алюмохромоfosфатный цемент [4]. Фторопластовая оправка не имеет адгезии к этим полимерам.

Температура затвердевания диэлектрика 200–400 °C. После затвердевания оправку удаляют (рис. 3, в), а концы волокон выравнивают, например, электроэррозионной резкой по уровню (рис. 3, г).

Концы трубок соединяются в единую цепь, а край бортика служит направляющей для режущей проволоки. Данный способ обеспечивает просадку торцов волокон относительно верхнего края

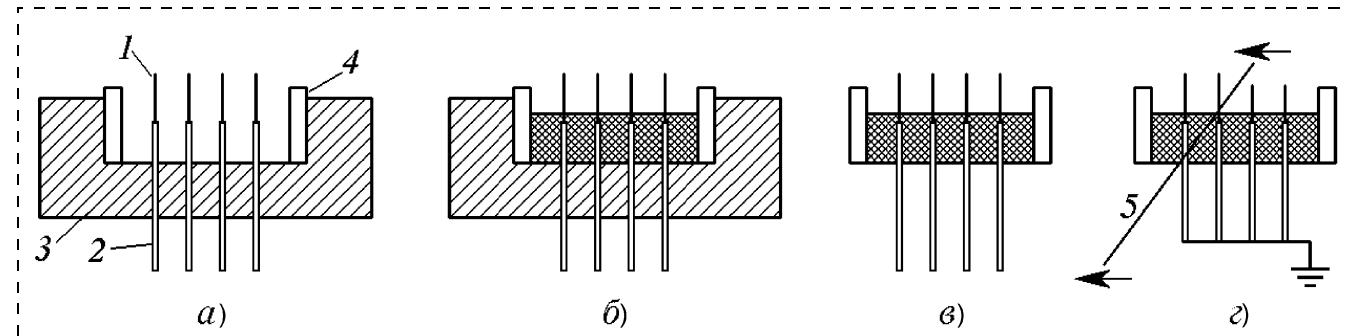


Рис. 3. Автокатод на основе углеродных волокон и полимеров:

а — автокатоды 1 в никелевых трубках 2 вставлены во фторопластовую оправку 3. Металлический спейсер 4 служит для крепления модуляторного электрода и конструкции в целом; б — заливка формы кремнийорганическим диэлектриком; в — после затвердевания диэлектрика и удаления оправки; г — выравнивание волокон по длине электроэррозионной резкой. Потенциал прикладывается между проволокой 5 и углеродными волокнами

бортика на несколько десятых долей миллиметра. Значение просадки можно регулировать, меняя скорость подачи и обеспечивая тем самым желаемое расстояние от торцов катода до экрана или модулятора, опирающиеся на край бортика.

Недостаток этого способа состоит в том, что на сегодняшний день не существуют полимеры, полностью совместимые с отпаянными приборами. Поэтому для таких приборов более целесообразно применение керамики. Пример автокатода для источника света, состоящего из десяти пучков ПАН-волокон, представлен на рис. 4. Основу катодного узла составляют керамический изолятор 1 и пучки 2, помещенные в никелевые трубы, которые фиксируются в керамическом изоляторе супензией из стеклоцемента и силиката 3. Катодные выводы из проволоки Ø 0,2 мм из коррозионно-стойкой стали 5.

Для массового производства в качестве диэлектрика наиболее удобно использовать стекло. Для этих целей была разработана специальная технология остеекловки ПАН-волокон. Кратко ее суть сводится к следующему [5].

Сначала пучок углеродных волокон остеекловывается (рис. 5). Для этого процесса наиболее удобны слабо скрученные пучки углеродных волокон круглого сечения с числом филаментов 50–600. Волокно с подающего барабана 1 через направляющую 2 проходит через расплав стекла 3, температура которого задается режимом работы печи 4. Волокно со стеклом проходит через устройство, задающее и контролирующее диаметр полученного остееклованного волокна 5. Подача готового волокна осуществляется механизмом протяжки 6, на входе которого предусмотрена разрезка на заготовки необходимой длины.

Далее их укладывают в блок, прокладывая стеклянными спайсерами. При этом создается тре-

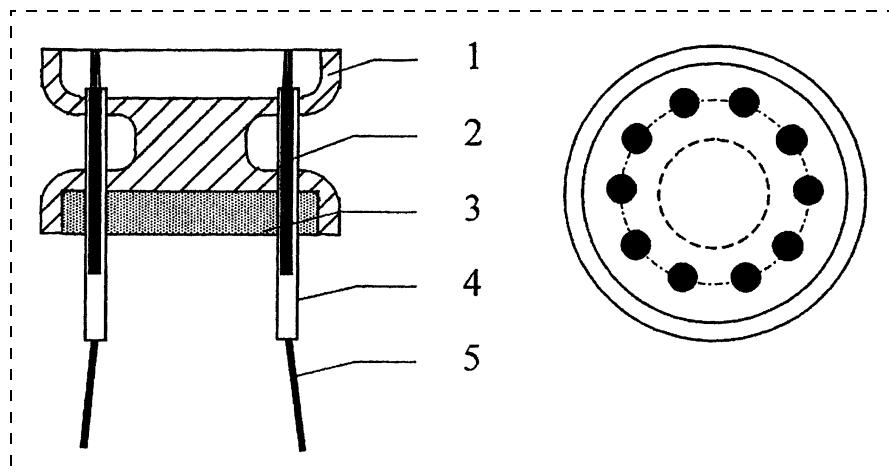


Рис. 4. Автокатод со структурой углерод—керамика:

1 — керамический изолятор; 2 — автокатод в никелевой трубочке; 3 — суспензия из стеклоцемента и силиката; 4 — вспомогательная никелевая трубочка; 5 — катодные выводы из проволоки Ø 0,2 мм из коррозионно-стойкой стали

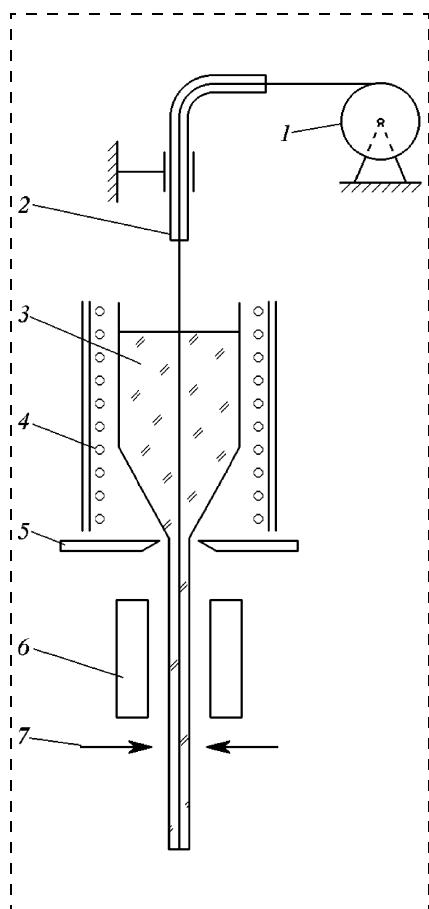


Рис. 5. Схема установки непрерывной остеекловки углеродных волокон:

1 — барабан с углеродными волокнами; 2 — направляющая; 3 — расплав стекла; 4 — плавильная печь; 5 — устройство для регулировки и изменения диаметра стеклянной оболочки; 6 — устройство для протягивания остееклованного волокна; 7 — устройство для отрезки волокна

ируемый рисунок расположения пучков волокон в стеклянной матрице. Уложенный блок помещают в форму и спекают гидростатическим давлением. Далее полученный блок режут на пластины требуемой толщины, а затем шлифуют и полируют. Фотографии изготовленных катодных матриц для диодной и триодной конструкций приведены на рис. 6.

Один из вариантов монохромного диодного дисплея [6] состоит из катодной матрицы и анодной пластины. Расстояние между анодом и катодом задается с помощью стеклянных спайсеров и составляет 200 мкм. Собранный конструкция помещается в стеклянный корпус и затем вакуумируется. При этом давление остаточных газов в приборе составляет менее 10^{-6} Торр. Схема и фотография монохромного автозадисплея приведены на рис. 7.

Матричный автокатод на основе графитового порошка можно изготовить и другим путем [7]. Для этого в стеклянной пластине толщиной ~1,5 мм методом ультрафиолетовой фотолитографии изготавливаются отверстия диаметром 200...250 мкм и шагом 0,6...1,5 мм. Затем в эти отверстия ме-

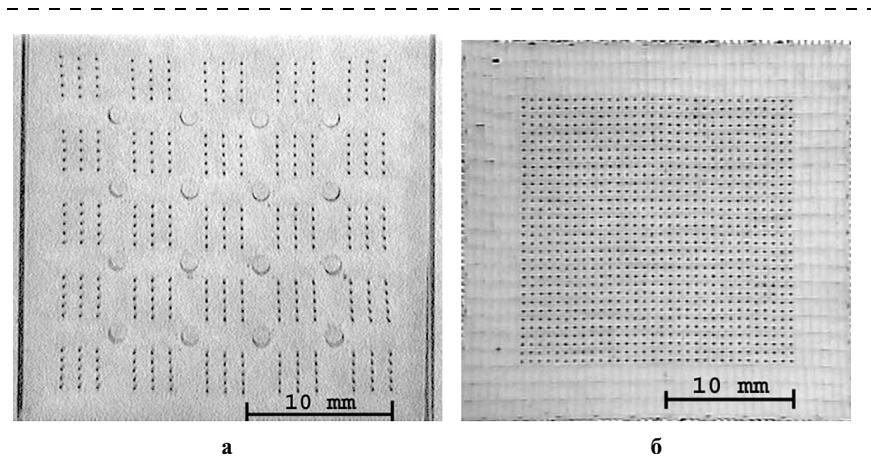


Рис. 6. Фотографии стеклянно-волоконных катодных матриц:
а — для монохромного дисплея; б — для полноцветного дисплея

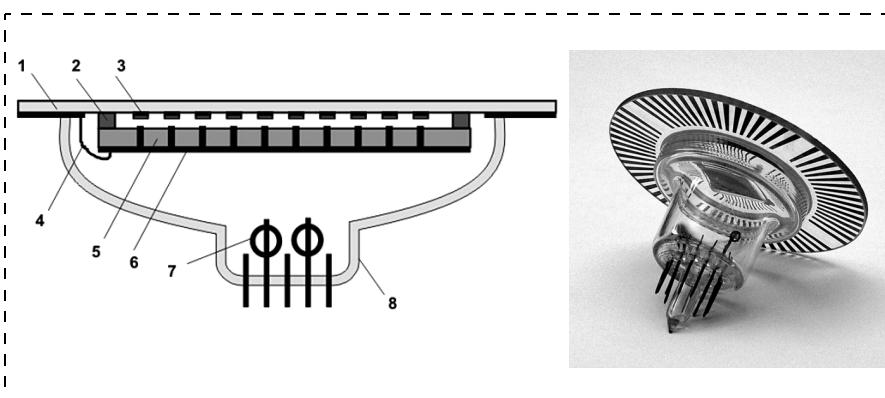


Рис. 7. Схема и фотография монохромного автоэмиссионного дисплея:
1 — стеклянная пластина с контактами из ИТО; 2 — спейсера; 3 — линейки анодов;
4 — Al контакты катодов; 5 — стеклянно-волоконная катодная матрица; 6 — линейки катодов;
7 — геттеры; 8 — стеклянный корпус

ханически запрессовывается паста, состоящая из графитового порошка с размерами частиц около 10 мкм и органического биндера. После высыхания пасты структура отжигается при температуре, близкой к температуре размягчения стекла для удаления органического биндера. Излишки графитового материала удаляются механическим шлифованием и полированием.

На основе остееклованного ПАН-волокна был разработан многоцелевой электронный прожектор, который используется в источниках света и рентгеновских трубках [8]. При этом пучки волокон остееклованы в капилляры диаметром 2 мм. Пучок воло-

кон содержит ~300 волокон и составляет 150 мкм в диаметре.

Катодолюминесцентный источник света (рис. 8) представляет собой электровакуумную лампу триодной конструкции с автоэмиссионным катодом из пучка углеродных волокон.

Основные параметры источника света приведены ниже. Экспериментальная наработка ламп превышает 2000 ч. Прогнозируемый срок службы источника света оценивается более 10 000 ч.

Параметры источника света:

размер источника
света, мм $\varnothing 14 \times 60$
ускоряющее напряже-
ние, кВ 10

управляющее напря- жение, не более, кВ	.1
рабочий ток, мА	.50
время вкл./выкл. све- та, мс 0,1
яркость по белому свету, кд/м ² более 10 000
световая эффектив- ность, лм/Вт более 20
цвет красный, си- ний, зеле- ный, белый
потребляемая мощ- ность, Вт 0,5

Использование автоэмиссион-
ного катода позволяет управлять
источником света с частотой до



Рис. 8. Источник света с автоэмиссион-
ным катодом

10 кГц и выше. Время переключения ограничивается временем послесвечения люминофора и может составлять несколько микросекунд. Катодолюминесцентный источник света с автоэмиссионным катодом может применяться в качестве цветного элемента информационных табло и видеоэкранов коллективного пользования. Проведенные климатические испытания ламп показали стабильность работы источников света в широком температурном диапазоне (от -150 до +150 °C).

Нечувствительность к температурным перепадам делает систему всепогодной, а высокая яркость обеспечивает качественное отображение информации даже под прямыми солнечными лучами. Источник света может также использоваться в качестве элемента подсветки проекционных и просвечивающих систем.

Конструкция рентгеновской трубы с автокатодом из остееклованного ПАН-волокна представлена на рис. 9. Трубка имеет триодную конструкцию с прострельным анодом.

Ниже представлены основные параметры миниатюрной рентгеновской трубы.

Параметры рентгеновской трубы:

размер трубы, мм	70
напряжение трубы, кВ . . .	50
размер фокусного пятна, мм \varnothing 2,0	
ток трубы, мкА	20
полная потребляемая мощность трубы, Вт	не более 1,1

Непосредственное формирование автокатодных структур

Это направление в изготовлении автокатодов начало широко развиваться в последнее десятилетие. Прежде всего оно привлекает своей кажущейся простотой

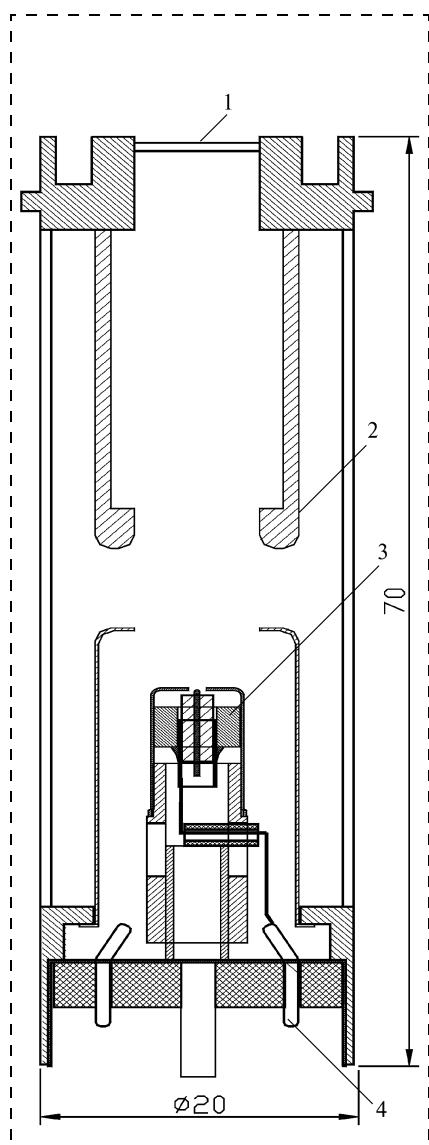


Рис. 9. Конструкция трубы BX-10 с автоэмиссионным катодом на основе углеродных волокон:

1 — выходное окно; 2 — электроды, формирующие пучок; 3 — катодно-модуляторный узел; 4 — металлокерамическая ножка

и возможностью сравнительно дешевого производства автокатодов большой площади.

Формирование автокатодных структур может осуществляться двумя путями: осаждением углеродных структур из газовой фазы или их формированием из приготовленных различными методами порошков углеродных материалов.

В настоящее время для получения тонкопленочных углеродных структур из газовой фазы наиболее широко используется химическое газофазное осаждение CVD (*chemical vapour deposition*). Под этим общим названием понимаются различные методы получения низкотемпературной плазмы углеродсодержащего газа, например, разряд постоянного тока [9], высокочастотный [10] и радиочастотный разряд [11]. Наибольшее распространение получило химическое газофазное осаждение в плазме тлеющего разряда [12].

Структура получаемого покрытия в зависимости от конкретных параметров разряда и состава смеси может лежать в широких пределах: от поликристаллического алмаза до графитоподобных структур, включая фуллерены и нанотрубки.

На сегодняшний день уже создано несколько образцов плоских дисплейных экранов на основе углеродных нанотрубок [13, 14].

На стеклянных подложках для формирования автокатодных структур используются порошковые углеродные материалы, которые можно наносить двумя основными методами: электрофорезом и трафаретной печатью. Принцип метода трафаретной печати или шелкографии давно известен в полиграфии и практически ничем не отличается в случае автокатодов [15]. Он состоит в продавливании пасты через специально изготовленную плоскую маску, которая и создает геометрию автокатода. Мaska изготавливается из фольги толщиной 0,2...0,5 мм с помощью электроэррозионной резки. Паста состоит из порошка соответствующего углеродного материала (до 60 %), стеклоцемента и биндера. Продавливание пасты осуществляется, как правило, специальным шпателем, представляющим собой упругую металлическую или резиновую пластину.

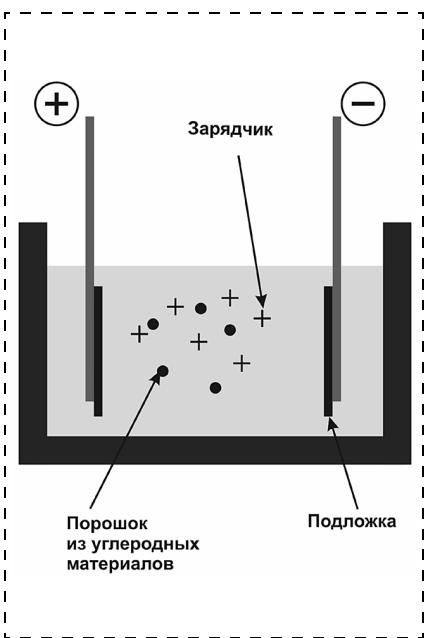


Рис. 10. Схема нанесения углеродных материалов методом электрофореза

После нанесения рисунка автокатод подложки подвергается отжигу в термической печи для удаления органического биндера.

Метод электрофореза [16] (рис. 10) состоит в перенесении порошка углеродного материала из суспензии на поверхность проводящей подложки в электрическом поле. Обычно напряженность подложки в электрическом поле составляет 0,5...2 В/см. Напряженность между электродами составляет ~50...100 В. Продолжительность процесса — несколько минут.

В качестве дисперсионной среды используется, как правило, изопропиловый спирт. Концентрация углеродного порошка составляет ~0,1 г/мл.

Основным видом углеродного порошка, используемого для электрофоретического нанесения, являются молотые углеродные волокна. Этот материал является наиболее перспективным для использования при производстве автоэмиссионных катодов большой площади методом электрофоретического осаждения углеродного порошка на различные

типы подложки. Он обеспечивает требуемую адгезию и равномерность, а также обладает хорошо изученными автоэмиссионными свойствами, которые могут обеспечить необходимые токовые характеристики получаемых катодов. Проведенные исследования показывают, что оптимальная длина волокна равна его удвоенному диаметру. При большой длине волокна существенно ухудшается возможность ориентирования волокон на подложке в процессе нанесения. Также могут применяться порошки из конструкционных графитов, нанотрубок, фуллеренов и т. д.

Для улучшения процесса переноса частиц углеродного порошка используются специальные вещества, называемые зарядчиками.

Основными видами зарядчиков, применяемыми в процессе электрофореза, являются BaBr_2 и NiCl_2 . Преимущество BaBr_2 заключается в возможности получения цементирующей "корки" (оксид бария). Наилучшие скрепляющие свойства такая "корка" приобретает после отжига в вакуме. Предположительно в процессе отжига барий восстанавливается до металла и образует химические связи с углеродными структурами порошка.

Электрофорез обладает передшелковой некоторыми преимуществами:

- получаемое покрытие имеет строго определенную толщину и путем варьирования условий нанесения возможен простой контроль качества и толщины покрытия;
- создаваемые покрытия отличаются высокой химической чистотой;
- использованная методика обеспечивает хороший электрический контакт подложки с эмитирующими волокнами.

Методы трафаретной печати и электрофореза кроме использо-

вания в упомянутых выше приборах предлагается применять и для создания систем управления устройствами микросистемной техники. В этом случае автокатод из углеродных нанотрубок монтируется в управляющую часть микроэлектромеханического устройства [17].

* * *

Разработка автоэлектронных катодов на основе углеродных материалов уже вышла из экспериментальной стадии.

Разнообразие технологий производства автокатодов и конструкций электронных приборов позволяет надеяться на широкое коммерческое распространение таких приборов уже в самом ближайшем будущем.

Список литературы

1. Baher F. S., Osborn A. R., Williams J. The carbon fibre field emitter // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1974. V. 7. N 15. P 2105—2115.
2. Braun E., Smith J. E., Syhest D. E. Carbon fibres as field emitters // *Vacuum*. 1975. V. 25. N 9/10. P. 425—426.
3. Шешин Е. П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. М.: МФТИ, Физматкнига, 2001. 287 с.
4. Chakhovskoy A. G., Sheshin E. P., Kupriashkin A. S. Method of fabrication of matrix carbon fiber field emission cathode structures for flat-panel indicators // *J. Vac. Sci. and Technol.* 1993. V. 11. N 2. P. 511—513.
5. Патент России № 2183362 кл. H01J 1/14 от 04.04.01 "Способ изготовления матрицы автоэмиссионного катода".
6. Батурина А. С., Ескин И. Н., Никольский К. Н. и др. Автоэмиссионные дисплеи на основе композита углеродное волокно—диэлектрик // Материалы конф. "Вакуумная наука и техника", Крым, 2003. Т. 2. С. 420—424.
7. Cherepanov A. Y., Chakhovskoy A. G., Sharov V. B. Flat panel display prototype using low-voltage carbon field emitters // *J. Vac. Sci. and Technol.* 1995. V. B13. N 2. P. 482—486.
8. Батурина А. С., Лешуков М. Ю., Князев А. И. и др. Катодолюминесцентный источник света и рентгеновская трубка с автоэмиссионным катодом из углеродных волокон // Материалы конф. "Вакуумная наука и техника", Крым, 2003. Т. 2. С. 415—419.

9. Landstrass M. J., Ravi K. V. Hydrogen passivation of electrically active defects in diamond // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 55. N 14. P. 1391–1393.
10. Mistuda Y., Yoshida T., Akashi K. Development of a new microwave plasma torch and its application to diamond synthesis // Rev. Sci. Instrum. 1989. V. 60. N 2. P. 249–252.
11. Meyer D. E., Dillon R. O., Woolhan J. A. Radio-frequency plasma chemical vapor-deposition growth of diamond // J. Vac. Sci. and Technol. 1989. V. A7. N 3. P. 2325–2327.
12. Павловский И. Ю., Образцов А. Н. Автоматизированная установка для газо-фазного осаждения алмазных пленок в разряде постоянного тока // Приборы и техника эксперимента. 1998. № 1. С. 152–156.
13. Choi W. B., Lee N. S., Yi W. K. at all. The First 9-inch carbon-nanotube based field-emission display for large area and color applications // Digest SiD 00 2000. P. 324–327.
14. Uemura S., Yotani J., Nagasako T. at all. Carbon nanotube FED High – Luminescence triode panel // Techn. Digest Euro Display 99, late — news papers. 1999. P. 93–96.
15. Choi K. S., Lee S. J., Kim J. M. at all. Field emission display devices containing a novel graphite cathode prepared by a screen printing process // Digest SiD 00, 2000. P. 671–673.
16. Kurnosov D. A., Baturin A. S. at al. Influence of the interelectrode distance in electrophoretic cold cathode fabrication on the emission uniformity // Appl. Surface Science. 2003. V. 215. P. 232–236.
17. Батурина А. С., Шешин Е. П., Зайцев Н. А. и др. Методы изготовления автотемиссионных катодов для использования в системах управления устройствами МСТ // Микросистемная техника. 2003. № 12. С. 21–23.

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

УДК 629.127.4-52:62.501.55-351.501

Л. Ю. Бочаров, канд. техн. наук,
Институт системных исследований, РАН,
г. Москва

АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ ПОДВОДНЫХ МИКРОАППАРАТОВ

Представлена классификация современных необитаемых подводных аппаратов. Рассмотрены наиболее важные тенденции в исследованиях и разработках по созданию подводных микроаппаратов. Выделены некоторые характерные области применения подводных микроаппаратов.

Подводные микроаппараты и микrorоботы — это новый класс изделий микросистемной техники, сформировавшийся в результате глобальной миниатюризации всех систем необитаемых подводных аппаратов (НПА). Надо отметить, что в ходе проведения анализа отечественных и зарубежных публикаций, посвященных вопросам разработки НПА, четкой (обоснованной) классификации подводной техники по массогабаритным характеристикам выявлено не было. В связи с этим возникла необходимость уточнения самого понятия (класса) — подводный микроаппарат.

Для выявления тенденций развития миниатюрных подводных аппаратов решались следующие задачи:

- систематизация и обобщение научно-технической информации по вопросам создания НПА в целях формирования базы данных технических характеристик современных и разрабатываемых моделей (проектов) автономного НПА (АНПА) и дистанционно-управляемого (ДНПА);
- проведение типизации и классификации моделей и проектов в рамках сформированной базы данных;
- выявление технического уровня и тенденций развития подводных микроаппаратов на основе анализа источников научно-технической информации.

По результатам систематизации и обобщения научно-технической информации (более 3000 публикаций) была сформирована база данных технических характеристик современных и разрабатываемых АНПА и ДНПА, содержащая сведения о 349 моделях (проектах).

Анализ результатов систематизации и обобщения информации позволил классифицировать современные и разрабатываемые необитаемые подводные аппараты.

1. По массогабаритным характеристикам (преимущественно по сухой массе аппаратов) подводные аппараты (ПА) можно классифицировать следующим образом:

- **МикроПА (ПМА)**, масса (сухая) < 20 кг, дальность плавания менее 1–2 м. миль, оперативная (рабочая) глубина до 150 м. Данная категория

составляет 20–25 % от общего числа современных и разрабатываемых НПА. Однако среди них большинство (> 70 %) проектов имеет экспериментальное назначение. Надо также отметить, что ~50–60 % микроНПА создается с использованием бионических принципов.

- **Мини-НПА**, масса 20–100 кг, дальность плавания от 0,5 до 4000 (!!!) м. миль, оперативная глубина до 2000 м. В настоящее время ПА этого класса составляют 15–20 % и находят широкое применение при решении различных задач на глубинах до 1500 м. Существенную часть мини-ПА плавающего типа составляют аппараты планерной (самолетной) формы, например, Sea Glider, Slocum Glider I/II и Spray Glider. Аппараты данного класса состоят на вооружении ВМС США и Великобритании.
- **Малые НПА**, масса 100–500 кг. В настоящее время ПА этого класса составляют 15–20 % и находят широкое применение при решении различных задач на глубинах до 1500 м.
- **Средние НПА**, масса более 500 кг, но менее 2000 кг.
- **Большие НПА**, масса > 2000 кг.

Представленная классификация (рис. 1, см. третью сторону обложки) является искусственной и предназначена для формирования единой (формально определенной) терминологии в научной и технологической сферах, связанных с вопросами разработки НПА (чтобы ученые и специалисты в области подводной техники "понимали" друг друга, а не использовали непонятные в научных кругах

термины типа микро-,nano- и пикоаппараты). Как правило, для достижения этой цели зарубежными специалистами используются наименования множеств, условно отражающие базовые технологические уклады в создании различных видов техники и характеризующие (условно !!!) эволюционные процессы ее миниатюризации.

2. По особенностям формы несущей конструкции все ПА можно классифицировать следующим образом (рис. 2):

- цилиндрической формы (торpedoобразные, поплавковые и плоские формы);
- бионические (плавающего и ползающего типов);
- планерной (самолетной) формы;
- с солнечной панелью на верхней части корпуса;
- самоходные (ползающие) НПА на гусеничной базе.

Распределение современных и разрабатываемых АНПА по оперативным (рабочим) глубинам представлено на рис. 3 (см. третью сторону обложки).

Наибольшая активность исследований и разработок (по числу патентов и публикаций в научно-технической литературе), посвященных проблемам создания ПМА, наблюдается в США, Японии, Сингапуре, Канаде и Исландии. Все изученные в рамках проведенных исследований конструкции микроНПА защищены патентами. Преимущественно это действующие патенты США. Мировыми лидерами в разработках микроНПА являются следующие научно-исследовательские организации и университеты:

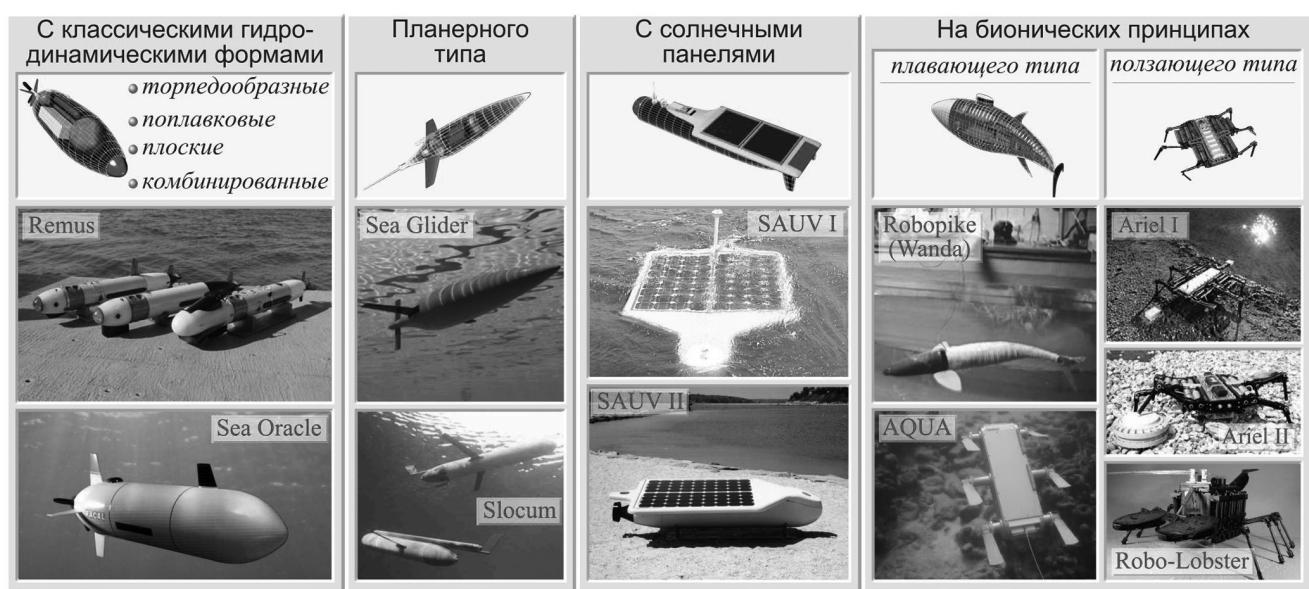


Рис. 2. Классификация НПА по особенностям несущей конструкции

- Nekton Research, LLC, США;
- Marine Science Center of Northeastern University, США;
- Massachusetts Institute of Technology (MIT Dept. of Ocean Engineering), США;
- DUKE & NC State University Team, США;
- iRobot Corp, США;
- Office Naval Research (ONR), BMC США;
- Modular robotic & Robot locomotion Group, School of MPE, NTU, Сингапур;
- Mobile Robotics Lab at McGill University, Канада;
- Inuktun, Канада;
- Hyland Underwater Vehicles, Канада;
- Osaka University и Shinshu University, Япония.

В настоящее время в эксплуатации находится незначительное число типов ПМА. Преимущественно это разработки Nekton Research LLC (США), iRobot Corp (США) и Inuktun (Канада). Фактов боевого применения микроПА до настоящего времени выявлено не было. Однако известно, что в ходе военных действий США в Ираке в 2003—2004 гг. для решения задач противоминной обороны в Персидском заливе неоднократно использовались малогабаритные автономные ПА типа "REMUS" (масса 30—35 кг, класс мини). По оценкам американских специалистов, ПА данной модели хорошо зарекомендовали себя при решении задач обнаружения минных заграждений в мелком море и проведении обзорно-осмотровых работ. Надо отметить, что автономный НПА "REMUS" имеет свыше 100 возможных конфигураций.

Как показал анализ обширного числа научно-технических публикаций, основными объектами исследований и разработок в области создания ПМА являются:

- системы энергообеспечения (поиск путей создания емких и возобновляемых энергоисточников в миниатюрном исполнении, в том числе на основе топливных элементов);
- движительно-рулевые комплексы (разработка нетрадиционных систем движения аппарата, как правило, на базе одного двигателя);
- конструкции ПМА на бионических принципах (поиск бионических решений — потенциально эффективных биологических аналогов (с точки зрения целевых задач и тактико-технических требований к подводному микроаппарату) и конструкторских решений для их технической имитации). В рамках этих исследований осуществляются попытки технической имитации органов перемещения и гидродинамических форм биологических объектов;
- миниатюрные системы управления движением (создание эффективной реконфигурируемой распределенной архитектуры системы управле-

- ния и интеллектуального программного планировщика), сочетающие в себе автономный и супервизорный режимы;
- бортовые автономные системы навигации (БАНС) в миниатюрном исполнении (создание БАНС в микромодульном исполнении, включающую ИНС, приемник сигналов спутниковой радионавигационной системы и устройство обработки информации);
- комплексированные системы технического зрения (комплексирование миниатюрных видеокамер, магнитных и акустических датчиков для их интеграции в систему управления движением);
- миниатюрные датчики и различные преобразователи сигналов (миниатюризация измерительных средств на основе использования технологий микросистемной техники).

Рассмотрим далее наиболее важные направления исследований в области создания подводных микроаппаратов. Надо отметить, что появление первых образцов подводных микроаппаратов относится к середине девяностых годов прошлого столетия. В зарубежных публикациях такие аппараты получили название *micro-UUV* (*Unmanned Under Sea Vechicle*) — дословно *необитаемый подводный микроаппарат*. Позднее появились сообщения о создании *micro-AUV* (*автономный подводный микроаппарат — автономный ПМА*). Как показали результаты проведенного обзора патентов, к настоящему времени класс ПМА насчитывает ~30 моделей (проектов), как правило, не являющихся коммерчески доступными. Основные характеристики зарубежных ПА класса микро представлены в таблице.

Среди коммерчески доступных ПМА можно выделить:

- ◆ Дистанционно-управляемый ПМА (*Micro ROV*) разработки VideoRay Inc., США. Масса аппарата составляет 3,6 кг (рис. 4). Продажа ДНПА VideoRay осуществляется в четырех различных комплектациях стоимостью от 6 000 до 46 000 тыс. долл. США.
- ◆ ПМА серии LB 150/300, разработанный компанией Sea Botix (США). Масса аппаратов составляет ~11—13 кг (в зависимости от комплектации и рабочей глубины). Их стоимость колеблется от 13 до 40 тыс. долл. США.
- ◆ ПМА *Observer 02*, разработанный компанией ADHOC-VISION (Франция). Масса аппарата составляет 5 кг, рабочая глубина — до 90 м (рис. 5)
- ◆ ДНПА-ПМА "ГНОМ" (масса 2 кг), разработанный Институтом океанологии им. П. П. Ширшова РАН совместно с ООО ИНДЭЛ (осмотровой подводный микроаппарат) (рис. 6). Стои-

Основные сведения о подводных микроаппаратах

№ п/п	Название модели НПА	Назначение	Тип несущей конструкции корпуса	Оперативная глубина, м	Габаритные размеры (Д × Ш (д – диаметр) × В), м	Масса, кг	Разработчик/судостроитель, страна
1	AMOEBOV	Э	Б (плав)				Modular robotic & Robot locomotion Group, School of MPE, NTU, Сингапур
2	AQUA	Э	Б (плав)	10–15		20	Mobile Robotics Lab at McGill University, Канада
3	Ariel I и II	В	Б (полз)	8–10 (45)	0,55(1,15) × 0,09(0,15) × ?	11	iRobot Corp, США
4	DART	Э	Б (плав)	10–20		< 15	iRobot Corp, США
5	Dongle	Э	Б (плав)	< 3	0,6 × 0,4 (с рулеми) × 0,25	2,3	Cal-Tech, США
6	EMATT (Mk 39 Expendable Mobile ASW Training Target)	В	Т	50	0,915 × 0,124 (д)	10	Sippican Inc., США
7	Camera	Э	Б (плав)	< 10		5–6	DUKE & NC State University Team, США
8	Micro Mag Crawler	ДвН	С (полз)	< 2	0,203 × 0,165 × 0,06	4,5	Inuktun, Канада
9	MicroHunter	В	Т	< 100	18–35 × ? (д)	0,07	Nekton Research, LLC, США
10	MicroSeeker	ДвН	Т			< 5	Hyland Underwater Vehicles, Канада
11	Pipe Inspection Camera (PiC-1)	Г	Типа дНПА		0,71 × 0,2 (д)		JW Fishers
12	Ranger	ДвН	Т	< 100	0,91 × 0,09 (д)	4,5	Nekton Research LLC, США
13	Robo Lobster	Э	Б (полз)	600		13	Marine Science Center of Northeastern University и Massa Products Corporation, США
14	ROBO-EEL	Э	Б (плав)				Modular robotic & Robot locomotion Group, School of MPE, NTU, Сингапур
15	RoboFish	Э	Б (плав)	< 10	0,5 × ? × ?	2,5	MHI, Япония
16	ROBOGLIDER	Э	Б (плав)				Modular robotic & Robot locomotion Group, School of MPE, NTU, Сингапур
17	Robopike (Wanda)	Э	Б (плав)	10–20	0,81 × 0,1 × 0,15	3	MIT's Dept. of Ocean Engineering, США
18	Robotune	Э	Б (плав)				MIT's Dept. of Ocean Engineering, США
19	Serafina	ДвН	Т	5000	0,21 × 0,10 × 0,14		Canberra's Australian National University, Австралия
20	Surf Zone Crawler (Tactically Adaptable Crawler)	В	С (полз)	0,5–1	0,6 × 0,51 × 0,17	< 20	ONR, NAVSEA, DARPA и Foster-Miller, США
21	Underwater robot (США—Япония)	В	Т	100–200	1,36 × 0,12	14,5	ONR (США) и Osaka University, Shinshu University (Япония)
22	Underwater walking robot	Э	Б (полз)				Modular robotic & Robot locomotion Group, School of MPE, NTU, Сингапур
23	Undulatory Robot	Э	Б (плав)			< 20	Marine Science Center of Northeastern University, США
24	USNA-1	В	Т	100	0,61 × 0,089	2,5–2,7	Systems Engineering Department USNA, США

Условные обозначения: В – военного назначения; Г – гражданского/комерческого назначения; ДвН – двойного назначения; Э – экспериментальный проект; Т – торпедообразная форма (в том числе с улучшенной гидродинамикой); П – плоская форма несущей конструкции; С (полз) – самоходный (гусеничный) аппарат; Б (плав) – бионическая форма аппарата плавающего типа; Б (полз) – бионическая форма аппарата поглащающего типа.



Рис. 4. Внешний вид ПМА VideoRay в комплектации Scout



Рис. 5. Внешний вид ПМА Observer 02



Рис. 6. Внешний вид и основные характеристики ПМА "ГНОМ"

мость ПМА составляет 4–8 тыс. долл. США (в зависимости от комплектации).

Из отечественных достижений в области создания ПМА следует также отметить создание ФГУП "ЦНИИ "Гидроприбор" макетного образца миниатюрного подводного аппарата — уничтожителя мин (масса 10–12 кг). Приведение аппарата в движение осуществляется с помощью простейшей пусковой установки.

Как показал проведенный анализ, большинство существующих проектов создания микроПА (особенно с системами автономного управления) относится к экспериментальным и ориентировано на долгосрочную перспективу.

Так, в 1999–2002 гг. по заказу DARPA (совместно с *Duke University*) научное подразделение *Nekton Research LLC* (входит в состав компании *Nekton Technologies, Inc.*, США) разработало серию конструктивно масштабируемых дистанционно управляемых подводных микроаппаратов под названием *MicroHunter* (рис. 7). Микроаппараты имеют длину 5–20 см и предназначены для отработки концепций применения группировок из миниатюрных подводных роботов для обнаружения целей, целеуказания и наведения торпедного оружия, а также мониторинга свойств водной среды (измерение температуры, солености и т. д.).

Один из действующих макетов, предназначенных для обзорно-поисковых работ, имеет длину 20 см, диаметр корпуса ~5 см, глубину погружения до 100 м и развивает скорость до 2 узлов. В состав системы энергообеспечения входит аккумуляторная батарея типа АА, обеспечивающая автономность плавания в пределах 3 ч (соответствует дальности действия до 10 км). Самый миниатюрный аппарат серии *MicroHunter*, с дальностью действия ~30 км, имеет длину всего 5 см и массу ~5 грамм.

В своих разработках *Nekton Research LLC* применила ряд оригинальных конструкторских решений, которые позволили обеспечить высокую маневренность *MicroHunter* (в качестве рулей используется только одна подвижная часть). Кроме того, встроенные в них системы управления обеспечивают эффективное применение достаточно большой группировки *MicroHunter* (более 50 микроаппаратов) для решения задач сбора трехмерной информации о подводных объектах.

Внешний вид основных перспективных проектов ПМА представлен на рис. 8 (см. четвертую страницу обложки).

Надо отметить, что большая часть перспективных ПМА разрабатывается на бионических принципах (с использованием результатов исследований в области бионики). Бионика (от греч. *bion* —



Обобщенная
структурная схема подводного аппарата
MicroHunter

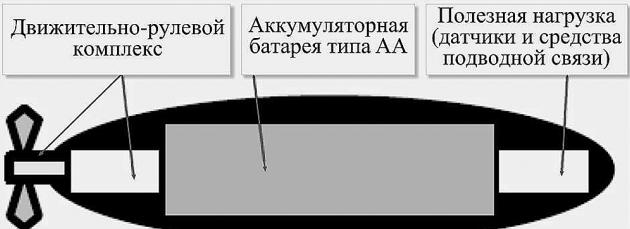


Рис. 7. Внешний вид макетных образцов подводных микроаппаратов серии *MicroHunter*

элемент жизни, буквально — живущий) — одно из направлений биологии и кибернетики, изучающее особенности строения и жизнедеятельности организмов в целях создания более совершенных технических систем или устройств. Конечной целью бионики является перенос в технику лучших достижений (бионика, как наука, зародилась в начале 60-х гг. прошлого столетия, а первая конференция по бионике в нашей стране прошла в 1962 г.).

В зарубежных публикациях это направление получило название *биомимикрия* — biomimetic (мимикрия (от англ. *mimicry*, от греч. *mimicos* — подражательный) — подражательное сходство незащищенных организма с защищенным или несъедобным; один из типов покровительственной окраски и формы. Биомимикрия — подражание Живой природе).

Данное комплексное (междисциплинарное) направление работ сформировалось на базе результатов синергетических исследований (системного обобщения достижений биологии, математики, информатики, электроники, механики, материаловедения и технологий микроминиатюризации и робототизации). К числу основных задач этого направления относится разработка новых материалов, процессов, технических устройств на основе принципов биологической имитации.

Изучение биологических систем на различных уровнях (от организмов млекопитающих до насекомых) представляет особый интерес с точки зрения технической имитации их способностей видеть (в том числе и ночью), чутко слышать, различать запахи, ощущать вкус и ориентироваться в сложных условиях.

Надо отметить, что высокая практическая значимость для США ожидаемых результатов этих ис-

следований позволили определить в 1995—1996 гг. это направление как приоритетное. В американских публикациях достаточно часто встречается еще понятие и "reverse engineering — обратная инженерия", являющееся синонимом.

В рамках общего направления "Биомимикрия" выделяются следующие группы исследовательских работ:

1. Общесистемные исследования.
2. Исследования по созданию датчиков (чувствительных элементов), актуаторов (исполнительных механизмов), материалов и веществ на биомимикрических принципах.
3. Исследования по применению биологических объектов, созданию гибридных (на базе живых организмов) и биомимикрических систем.

Общесистемные исследования ориентированы на изучение:

- способов переработки информации в нервной системе;
- особенностей строения и функционирования органов чувств и двигательных систем;
- принципов навигации, ориентации и локации;
- внутренних процессов в строении организмов, обладающих уникальными способностями (например, высоким коэффициентом полезного действия).

Данные исследования позволяют выявить:

- части тела, органы, нервные системы биологических объектов (млекопитающих, птиц, рыб, насекомых), которые позволяют выполнять функции, аналогичные создаваемой системе. Другими словами, исследования дают возможность выявить конкретные виды организмов, способных по своим свойствам (условиям обитания, жизненным функциям и др.) служить

- прототипом для технической имитации (подражания) или для непосредственного использования;
- основные компоненты и взаимосвязи между ними, которые необходимы для построения функциональной биомимикрической (бионической) модели;
 - математические и физические модели, необходимые для получения статических и динамических характеристик объектов.

К числу последних достижений, полученных в рамках подобных исследований, можно отнести создание в США робота, действиями которого управляет мозг угря. Пока механическая конструкция робота достаточно простая. Он реагирует (осуществляет поворот) на направление светового излучения с помощью сигналов, поступающих от мозга угря. Мозг был извлечен из рыбы и сохраняется живым в специальном химическом растворе. Создание этой системы связи уже называли революцией в кибернетике, сравнимой, например, с клонированием.

Большой объем научных исследований по созданию миниатюрных подводных роботов проводится в рамках американской комплексной программы "Подводные роботы на биомимикрических принципах — *Biomimetic Underwater Robot*". Руководство этой программой осуществляется Департаментом электроники и вычислительной техники США с привлечением Центра морских наук (Marine Science Center) и Бостонского северо-восточного университета. Основной целью программы является создание полностью автономных подводных роботов, имитирующих принципы движения морских биологических объектов. Ожидается, что полученные результаты найдут широкое применение при решении различного рода задач, например:

- обнаружение подводных мин в мелком море;
- освещение подводной обстановки;
- решение задач по боевому охранению надводных кораблей и ПЛ;
- поддержка аварийно-спасательных и обзорно-поисковых работ;
- организаций связи с подводными лодками и др. (рис. 9, см. четвертую сторону обложки).

В ходе реализации программы "*Biomimetic Underwater Robot*" были разработаны макетные образцы миниатюрных подводных роботов "Робот-лобстер — *Lobster Robot*" и "Робот-минога — *Undulatory Robot*" (рис. 10). Данные разработки осуществляются при финансовой поддержке Управления перспективных исследований и разработок МО США — DARPA (Отдел оборонных наук — DSO) и Отдела

научных исследований ВМС США — Office Naval Research — ONR (грант № 00014—98-1-0381).

В другой научно-исследовательской организации США — лаборатории Дрейпера (*Draper Laboratory*) интенсивно ведутся исследования по созданию необитаемых подводных аппаратов (*Unmanned Undersea Vehicle — UUV*) повышенной маневренности. Предполагается, что на основе технической имитации технологий движения рыб будут созданы подводные аппараты, обладающие малым радиусом разворота, существенно сокращенным временем разгона и торможения. Внешний вид одного из действующих макетных образцов такого подводного робота-рыбы показан на рис. 10. Робот-рыба имеет массу ~130—150 кг, длину ~2,4 м и может развивать скорость до 5 км/ч. В ходе многочисленных испытаний в закрытом бассейне Нью-Гемпширского университета и в открытых акваториях была отработана гибкая конструкция корпуса подводного робота, а также уточнены алгоритмы управления его движением.

В Массачусетском технологическом институте (*Massachusetts Institute of Technology — MIT*) создан подводный робот "Щука-Pike" длиной ~0,7...0,8 м, способный развивать скорость до 5...6 м/с. Данный робот является следующим этапом развития экспериментального подводного робота "Tuna", разработанного в этом же институте еще в 1994 г.

Таким образом, проведенный анализ современного состояния исследований и разработок по созданию ПМА показали следующее.

- ◆ Практически все обзорно-поисковые, обследовательские и научно-исследовательские задачи, решаемые с помощью НПА, могут быть так или иначе использованы в военных целях (т. е. имеют двойное назначение).
- ◆ В создании малогабаритных НПА можно выделить следующие тенденции:
 - разработка многоцелевых ПА по адаптивно-модульному (реконфигурируемому) принципу (например, ПА GAVIA класса мини, масса ~44 кг);
 - создание подводных комплексов (группировок) из НПА различных классов (микро, макро и др.) и типов (плавающих и ползающих) по принципу "система в системе";
 - разработка комплексированных систем навигации НПА (ИНС, доплеровский лаг, приемник сигналов СРНС и приемопередатчик ГАНС) с использованием современных методов и средств обработки сигналов (новые методы фильтрации на основе подходов Калмана);



Рис. 10. Внешний вид автономных подводных роботов, разработанных в рамках научно-исследовательских программ США

- формирование быстроразвертываемых систем подводной связи и подводного электроснабжения;
- ◆ Наибольшая активность исследований и разработок (по числу патентов и публикаций в научно-технической литературе), посвященных проблемам создания ПМА, наблюдается в США, Японии, Сингапуре, Канаде и Исландии. Мировым лидером в разработке ПМА является США (особенно в классе автономных ПМА).
- ◆ В настоящее время в эксплуатации находится незначительное число типов ПМА. Преимущественно это разработки Nekton Research LLC (США), iRobot Corp (США) и Inuktun (Канада).
- ◆ Большинство существующих проектов создания микроПА (особенно с автономными системами управления) относится к экспериментальным и ориентировано на долгосрочную перспективу. Этот факт связан с тем, что, с одной стороны, при уменьшении массы и размеров аппарата использование в нем существующей (серийно разработанной) аппаратуры часто затруднено неприемлемостью ее массогабаритных характеристик, с другой — при существенном сокращении массогабаритных характеристик ПА необходимо создание новых подходов к их проектированию. Устранение первой причины в

наибольшей степени связано с использованием и дальнейшим развитием технологий микросистемной техники. Вторая причина требует концентрации научных исследований на решение задач миниатюризации и удешевления конструкций ПА.

- ◆ Приоритетной областью исследований и разработок по созданию ПМА является бионика. В рамках этой области сконцентрировано большое число работ, финансируемых МО США.
- ◆ Результаты анализа позволяют предположить, что массовое производство ПА класса микро начнется не ранее 2008—2010 гг. При этом первоначально будут создаваться микроПА одноразового применения (невозвратаемые) стоимостью менее 500—1000 долл. США.
- ◆ Основными объектами исследований и разработок при создании ПМА являются: системы энергообеспечения; движительно-рулевые комплексы; конструкции ПМА на бионических принципах; миниатюрные системы управления движением; бортовые автономные системы навигации в миниатюрном исполнении; комплексированные системы технического зрения; миниатюрные датчики и различные преобразователи сигналов.

УДК 621.384

В. И. Бирюков,
ФГУП ЦАГИ им. проф. Н. Е. Жуковского,
г. Жуковский
В. В. Панков,
НПК "Технологический центр", МИЭТ,
г. Зеленоград

МНОГОТОЧЕЧНЫЙ БЛОК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

Рассматривается конструкция многоточечного блока чувствительных элементов давления, показаны результаты исследования температурных характеристик блока, дано сравнение измерительных характеристик с его аналогами.

Для измерения распределения давления по поверхности модели летательного аппарата в аэродинамическом эксперименте широко применяются отечественные и зарубежные модули давлений типа ММД-24 (ЦАГИ) и ESP 32, 48, 64 фирмы Pressure System.

Ядром модуля давления, как правило, является частичный блок чувствительных элементов на 12–16 точек с внутренним электронным коммутатором. Стабильность измерительных характеристик отдельных чувствительных элементов поддерживается за счет термостабилизации всего модуля в заданном рабочем температуре (диапазон рабочих температур $-20 - +60^{\circ}\text{C}$, температура термостаби-

лизации $\sim 65^{\circ}\text{C}$) [1]) или за счет использования известного контрольного давления, подключаемого к рабочей стороне мембранны через определенный период времени отдельным пневмопреключателем [2]. Следует отметить, что температурный коэффициент чувствительности датчиков равен приблизительно $0,1 - 0,2\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$, уход нуля от температуры составляет $0,1 - 0,2\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$ к шкале измерений без применения мер по стабилизации характеристик [3].

Новый интегральный преобразователь давления ИПД-9 имеет размеры мембранны $4 \times 4 \times 3$ мм, температурный коэффициент чувствительности $\leq 0,02\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$, уход нуля от температуры $\leq 0,02\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$, датчик температуры расположен на мемbrane чувствительного элемента. Этот преобразователь позволяет провести компоновку нового частичного блока чувствительных элементов на 16 точек измерения давления (ЧЭД-16).

Внешний вид ЧЭД-16 показан на рис. 1, конструкция блока приведена на рис. 2. К блоку ЧЭД-16 через 16 штуцеров диаметром 1 мм к каждой точке подводится рабочее давление. Имеется один штуцер опорного давления для подвода давления в корпус блока. Чувствительные элементы ИПД-9 приклеиваются к корпусу основания, развариваются к контактам печатной платы, на которой установлены коммутаторы сигналов, пропорциональных температуре и давлению. Управление измерительным коммутатором и питание осуществляется через контакты разъема на печатной плате, которая выходит за герметичный корпус блока.

Структурная схема блока чувствительных элементов давления на 16 точек, габаритный чертеж и

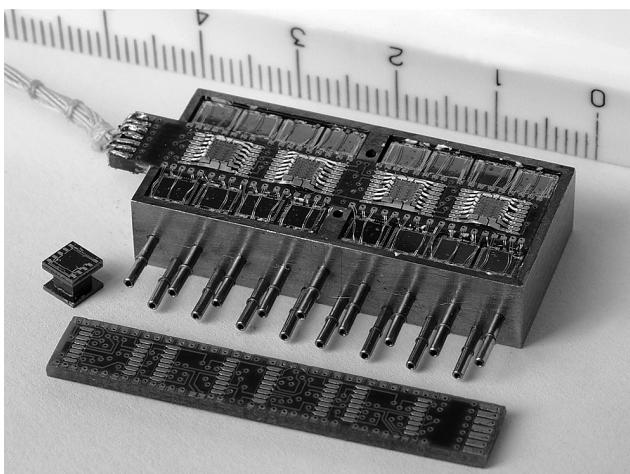


Рис. 1. Блок чувствительных элементов давления ЧЭД-16

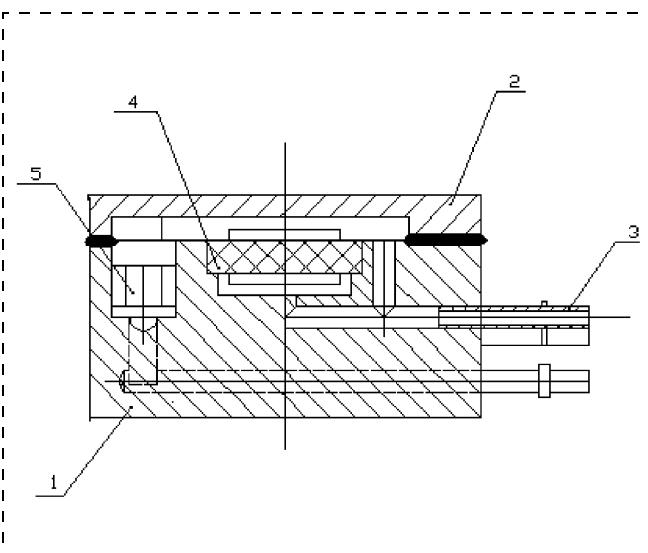


Рис.2. Конструкция блока ЧЭД-16:

1 — основание; 2 — крышка; 3 — штуцер; 4 — плата; 5 — ИПД-9

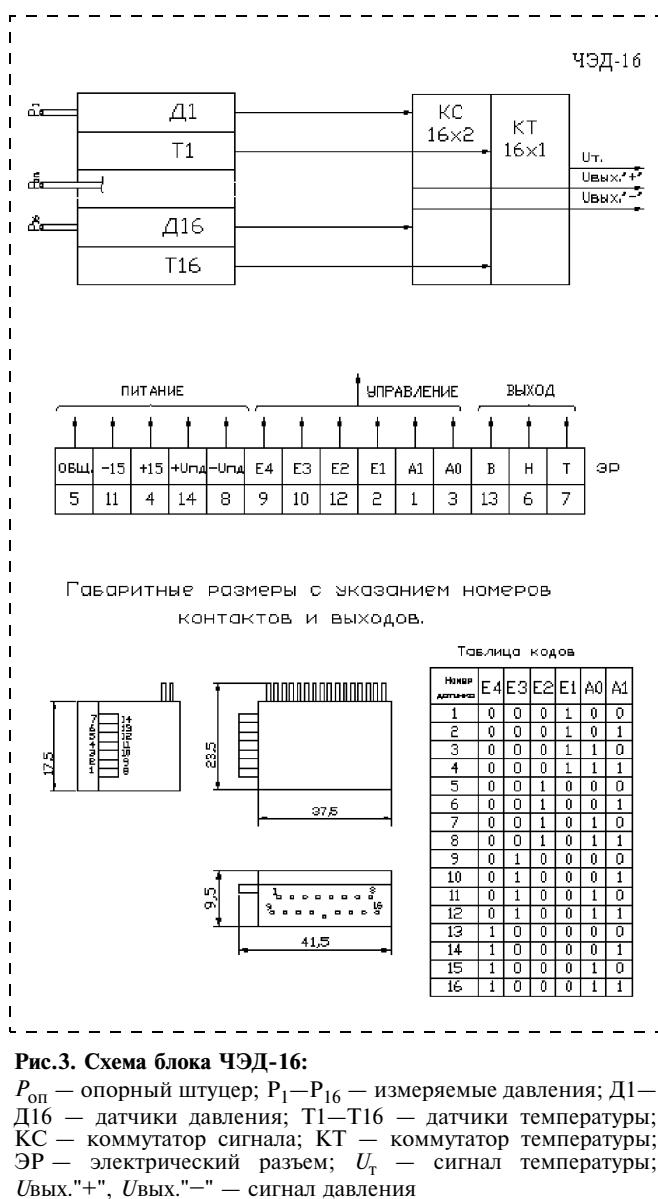


Рис.3. Схема блока ЧЭД-16:

$P_{оп}$ — опорный штуцер; P_1-P_{16} — измеряемые давления; D_1-D_{16} — датчики давления; T_1-T_{16} — датчики температуры; $KС$ — коммутатор сигнала; $KТ$ — коммутатор температуры; $\mathcal{ЭР}$ — электрический разъем; U_t — сигнал температуры; $U_{вых.}^+$, $U_{вых.}^-$ — сигнал давления

таблица кодов управления внутренним электронным коммутатором показана на рис. 3.

Проведены исследования блока в диапазоне температур от -10 до $+65$ °C. На рис. 4 показаны измеренные значения коэффициента чувствительности (ТКЧ) и дрейфа нуля (ТКН) в зависимости от температуры. В таблице приведены сравнительные измерительные характеристики для различных групповых измерителей.

Тип	ТКЧ, %/°C	ТКН, %/°C	$\Delta U_{0\max}$, %/ПШ	ΔK , %	Диапазон давления, Па
ESP64	0,02	0,02	1	7	$\pm 10^5$
ММД-24	0,2	0,2	12	30	$\pm 10^5$
ММД-48	0,2	0,2	10	25	$\pm 10^5$
ЧЭД-16	0,015	0,015	3	13	$\pm 4 \cdot 10^4$

Сравнение проводилось по следующим параметрам:

$$TKЧ = \frac{K(T_{\max}) - K(T_{\min})}{\Delta T \bar{K}(I)} 100;$$

$$TKН = \frac{U_0(T_{\max}) - U_0(T_{\min})}{ПШ \Delta T} 100;$$

$$\Delta K = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{\bar{K}} 100,$$

где $ПШ$ — полная шкала (значение сигнала при максимальном давлении);

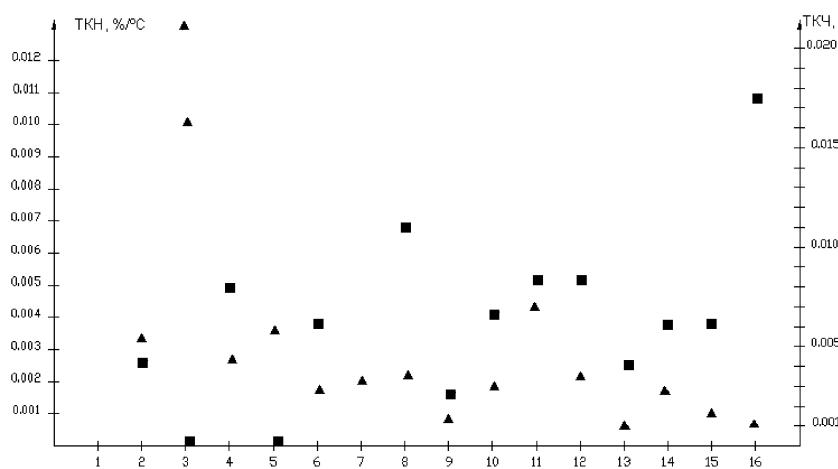


Рис. 4. Температурные коэффициенты блока ЧЭД-16

$K(T_{\max})$, $K(T_{\min})$, $U_0(T_{\max})$, $U_0(T_{\min})$ — коэффициенты преобразования и нулевое значение сигнала для $\Delta P = 0$ при максимальной и минимальной температуре;

$U_{0\max}$ — максимальный выходной сигнал (из 16 датчиков) при $\Delta P = 0$;

K_{\max} , K_{\min} — максимальные и минимальные коэффициенты преобразования (из 16 датчиков в блоке);

\bar{K} — средний коэффициент преобразования для 16 датчиков в блоке при постоянной температуре;

$\bar{K}(I)$ — средний коэффициент преобразования для I -й точки измерения давления при различных температурах;

ΔT — диапазон рабочих температур. Видно, что новый блок ЧЭД-16 имеет измерительные характеристики, близкие к лучшим зарубежным образцам.

Список литературы

- Беклемищев А. И., Блокин-Мечталин Ю. К., Бирюков В. И. и др. Измерительно-информационная система с многоточечными модулями для измерения распределения давления в аэродинамических трубах // Измерительная техника. 1994. № 8.

- System 8400. Parallel processing pressure acquisition system. Проспект фирмы Pressure Systems.

- Караджи В. Г., Радзевич С. А., Тапышев В. В., Чикин И. И. Результаты разработки малогабаритного тензорезисторного датчика пульсаций давления // Тр. ЦИАМ. 1988. № 1232.

Новости нанотехнологий

Механическая память на основе НЭМС-систем

Основа механоэлектрической молекулярной электроники — молекулы, которые при воздействии извне могут изменять свое электрическое состояние или конфигурацию. Исследователи из Калифорнийского института давно занимаются механоэлектрическими системами, на основе которых можно создать ряд НЭМС-актуаторов и механическую память. О последних достижениях в этой области ученые доложили в декабрьском выпуске журнала *Science*. В этой статье мы расскажем о НЭМС-системах, с помощью которых исследователи надеются создать механоэлектрическую память.

"Современная молекулярная электроника находится в зародышевом состоянии", — говорит Амар Флуд, исследователь из UCLA и автор публикации в *Science*. — "Необходимо пояснить, что молекулярная электроника — это комбинация активных молекул и электронных схем. Пока еще рано говорить о том, как быстро результаты этой свадьбы появятся на рынке, но ее вклад в развитие науки уже очевиден".

Одно из первых применений молекулярных машин, которые уже изготовлены учеными, — механоэлектрическая память. Первые попытки создать из отдельных молекул механические системы были предприняты Флудом, Стодартом и их командой еще в 1996 г. В середине 2004 г. им удалось создать молекулярный элеватор — НЭМС-систему, кото-

рая состоит из стержня и молекулы-лифта. При подаче электрического потенциала на элеватор молекула-лифт передвигалась вдоль стержня. Направление движения элеватора можно было изменить, переключив полярность активирующего потенциала. Различные типы элеваторов показаны на рис. 1. Нужно отметить, что эта НЭМС-система активируется не только электрической, но и световой энергией, а также определенными химическими катализаторами. В качестве лифта в системе 1-го типа ученые использовали молекулу правильного ротаксана; в системе 2-го типа — молекулу катенана и в системе 3-го типа — молекулу псевдоротаксана.

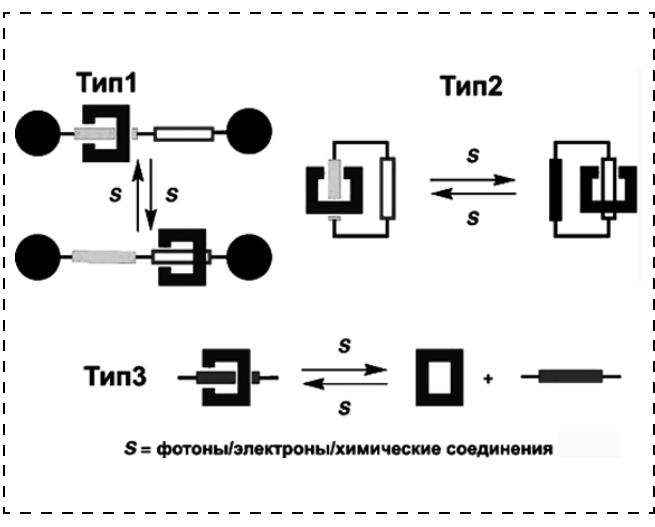


Рис. 1. Типы молекулярных элеваторов

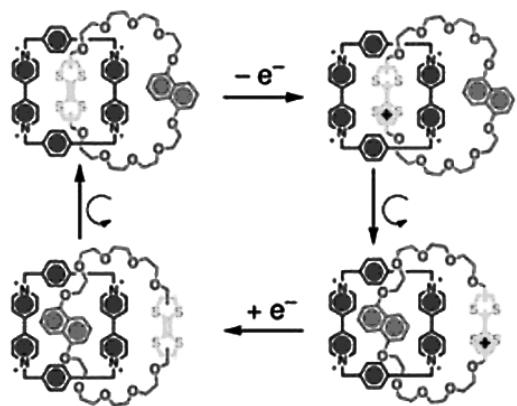


Рис. 2. Активация молекул ротаксана и катенана

Эти молекулы особенны тем, что при захвате молекулой электрона она может изменить свой энергетический потенциал, а находясь в составе наносистемы — изменить положение в пространстве. Так, ротаксаны в наносистемах движутся линейно, в то время как катенаны врачаются вокруг оси стержня, на котором находятся (рис. 2).

Этот же принцип использовался исследователями при конструировании памяти. Как говорит Флуд, они спроектировали 64-битную RAM-память на основе НЭМС-ячеек, использующих ротаксаны. При этом размеры новой памяти бьют рекорды, установленные законом Мура.

Флуд и Стоддарт уже создали элементарную ячейку памяти, которая переключается в логическое состояние 1 и 0 при подаче на нее электрического потенциала. На рис. 3 можно видеть принцип действия новой НЭМС-памяти.

"Когда мы подали положительный импульс на ячейку, молекула ротаксана передвинулась в состояние 1, а когда мы изменили полярность напряжения, она переместилась к положению, обозначающему 0", — сказал Стоддарт. — "Мы проверили работу устройства, заставив его длительно переключаться. При этом мы смогли менять скорость переключения! Мы изменили частоту переключения от 10 000 раз в 1 с до 10 раз. При этом, когда молекулы находились в разных средах, скорость переключения также менялась", — говорит Стоддарт.

Самое интересное в исследовании состоит в том, что, используя различные полимеры в качестве основы для перемещения ротаксанов, ученые добились изменения цвета молекулы (т. е. изменение в излучаемом свете). В опыте использовались переключатели с красного на зеленый. По словам Стоддарта, новые устройства могут работать даже в

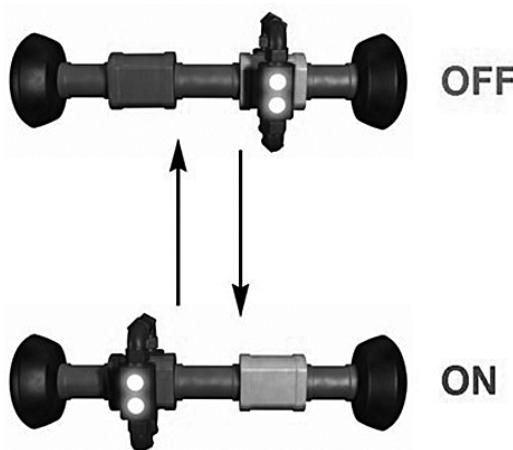


Рис. 3. Модель молекулярной памяти на основе молекул ротаксанов

дисплеях! При этом дисплеи будут механическими, т. е. принципиально новыми для современной компьютерной промышленности! Но, конечно, до создания только прототипов таких устройств еще далеко — от трех до пяти лет.

"Мы очень гордимся тем, что нам удалось создать принципиально новые наносистемы. Я думаю, что это один из шагов к тому, что называют молекулярным производством", — закончил Стоддарт.

Источники:

1. Nanotechnology-Now: Rapid Progress Reported In Emerging Field Of Molecular Electronics
2. Stoddart Supramolecular Chemistry Group, UCLA: Molecular Electronics (18 декабря 2004)

Компания Infineon создала самый маленький в мире транзистор на нанотрубке

Компания Infineon Technologies AG (FSE/NYSE: IFX) совершила прорыв в производстве нанотранзисторов на основе нанотрубок. Ей удалось создать работоспособный нанотранзистор с длиной проводящего канала всего 18 нм. Современные нанотранзисторы — и экспериментальные, и работающие — уже в серии полупроводниковых устройств характеризуются в четыре раза большими размерами проводящего канала. Исследователи из Мюнхенской лаборатории компании Infineon использовали в новом полупроводниковом устройстве нанотрубку диаметром от 0,7 до 1,1 нм, которая была выращена специалистами компании.

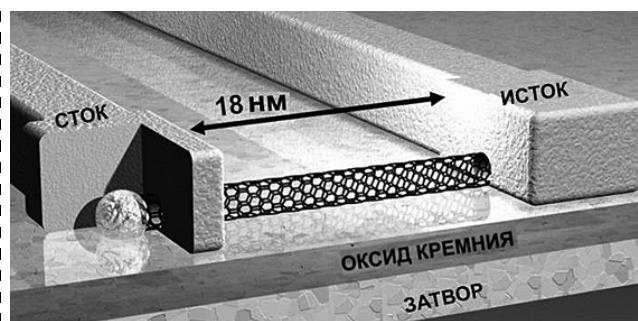


Рис. 4. Полевой нанотранзистор на основе нанотрубки от Infineon

Электрические характеристики углеродных нанотрубок сделали их идеальными кандидатами для использования в микро- и наноэлектронике. Благодаря "баллистическому электронному транспорту" нанотрубки проводят электроэнергию с наименьшим сопротивлением. Поэтому они характеризуются электропроводностью в 1000 раз большей, чем у меди.

Более того, нанотрубки могут выступать как в роли проводников, так и в роли полупроводников. Компания Infineon первой задумалась над промышленным применением полупроводниковых устройств на основе нанотрубок. Исследовательский состав компании разработал новые методы производства нанотрубок для их использования в нанотранзисторах.

Также исследователи смогли выращивать нанотрубки на определенных поверхностях. Новый нанотранзистор (рис. 4) может проводить токи до 15 мА при подаче на него напряжения всего 0,4 В (обычные нанотранзисторы работают на напряжении 0,7 В). При производстве микроэлектронных компонентов на основе нового чипа плотность размещения транзисторов будет в 10 раз больше, чем в современных чипах. Также из-за низкого напряжения питания исследователи из Infineon предполагают, что чипы на новых транзисторах станут более экономичными, чем современные.

Уменьшение напряжения питания до 35 В не предполагалось производителями чипов до 2018 г., а новый транзистор работает на 0,4 В уже сейчас. Как мы писали ранее, новая паровая технология производства нанотрубок обещает сделать их дешевыми. Так что вполне возможно, что через несколько лет в микроэлектронике будут использоваться нанотранзисторы на основе нанотрубок.

Источник:

1. Nanotechnology-Now (23 октября 2004)

IBM утроит производительность транзисторов

Компания IBM 6 декабря представила новую технологию, которая позволяет втрое улучшить производительность транзисторов, что даст возможность компании производить в следующем десятилетии более компактные и быстродействующие чипы. При этом новый метод совместим с традиционной CMOS-технологией.

По словам исследователей, ускорить работу транзистора позволил слой *напряженного германия* (strained Ge). Так же, как и в случае напряженного кремния (strained silicon), "изюминка" технологии состоит в том, что в кристалле полупроводника создается механическое напряжение, приводящее к увеличению подвижности носителей заряда и, как следствие, улучшению характеристик транзисторов, в частности, электрических.

По данным IBM, транзисторы, выполненные из напряженного германия, обладают втрое лучшими параметрами по сравнению с транзисторами из обычного кремния. Как полагает компания, применение технологии напряженного кремния будет необходимо для изготовления интегральных микросхем с соблюдением 32-нанометрового техпроцесса. Сообщается, что ключевым моментом технологии является создание тонкого слоя германия на затворе транзистора.

Германиевые или гибридные кремний-германиевые технологические процессы (а, судя по всему, именно о таком процессе идет речь), как правило, являются более трудоемкими и дорогими, чем кремниевые, да и используются они куда реже.

Новые чипы на основе напряженного германия по 32-нанометровому техпроцессу IBM планирует выпускать только в 2013 г. Напомним, что чипы по 65-нанометровому техпроцессу появятся на рынке уже в 2005 г.

Компания IBM официально объявит об использовании новой технологии на международной конференции по электронным устройствам (2004 International Electron Devices Meeting), которая состоится в Сан-Франциско. В понедельник 6 декабря IBM представила первый наименьший в мире чип SRAM (статическая RAM). Компании-производители чипов почти всегда тестируют новые технологии созданием SRAM-ячеек. Исследователи использовали новые методы в производстве SRAM (ячейка состоит всего из шести транзисторов). Новые ячейки SRAM в 2 раза меньше изготовленных ранее прототипов и в 10 раз меньше, чем использующиеся сегодня.

Источник:

1. Infoworld. com: IBM triples transistor performance with germanium (7 декабря 2004)

Наночастицы и дендромеры помогают космонавтам

Вскоре наши глаза смогут служить в качестве многофункционального диагностического монитора. Исследователи из Мичиганского университета разработали методику, с помощью которой можно "на лету" установить дозу радиоактивного облучения, полученного человеком. Первыми испытателями этого метода "на себе" будут космонавты, которым необходимо все время контролировать степень облучения.

Исследования по разработке простого, эффективного, а главное, быстрого мониторинга состояния тела космонавта финансирует, в первую очередь, NASA. Команда из Мичиганского университета получила грант в размере 3 млн долл. на проведение соответствующих исследований. Работы по мониторингу состояния космонавтов велись разными командами давно.

В 2000 г. различные команды ученых разработали ряд наночастиц, содержащих флуоресцентные вещества, активирующиеся в том случае, если степень облучения организма была велика. Расскажем подробнее о прошлых достижениях мониторинга, чтобы было понятно, что придумали в Мичиганском университете.

"Назначение наночастиц — представить новый тип терапии, которая состоит в проникновении в от-

дельные клетки для их восстановления или избавлении от них, если они слишком повреждены", — пояснил Джеймс Лири из медицинской ветви Техасского университета. Ученые Джеймс Лири и Стивен Ллойд возглавляют исследования в области наномедицины с использованием наночастиц. Вместе с ними работают Массуд Мотамеди (Техасский университет), Николай Котов (университет Оклахомы) и Юрий Львов (университет Луизианы).

Их проект фокусируется на проблеме, близкой к проблемам онкологических заболеваний. Большие дозы радиации получают астронавты, работая в космосе (особенно, если будут пилотируемые полеты на Луну или Марс), так как они лишаются естественного защитного "зонтика" — магнитного поля Земли. Даже специально разработанные материалы не могут полностью изолировать космонавтов от высокоэнергетической космической радиации. Частицы с высокой энергией проникают в тела астронавтов и как микроскопические пули повреждают все молекулы на своем пути. Когда ДНК клетки повреждена таким образом, клетка работает с нарушениями, часто приводящими к образованию раковых опухолей (рис. 5).

"Это очень важная проблема, — говорит Лири. — Если люди собираются долговременно жить в космосе, мы должны знать, как можно их защитить от космической радиации". Ученые решили, что организм астронавтов должен сам сопротивляться

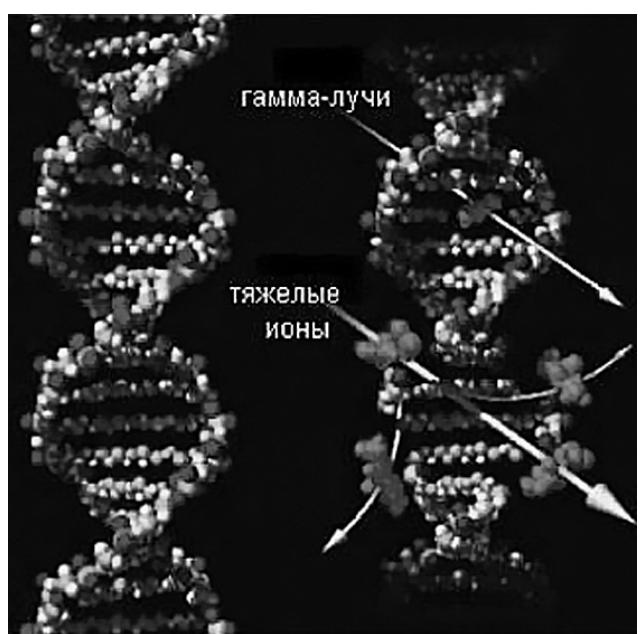


Рис. 5. Высокоэнергетическая космическая радиация может травмировать ДНК и способствовать ракообразованию на клеточном уровне

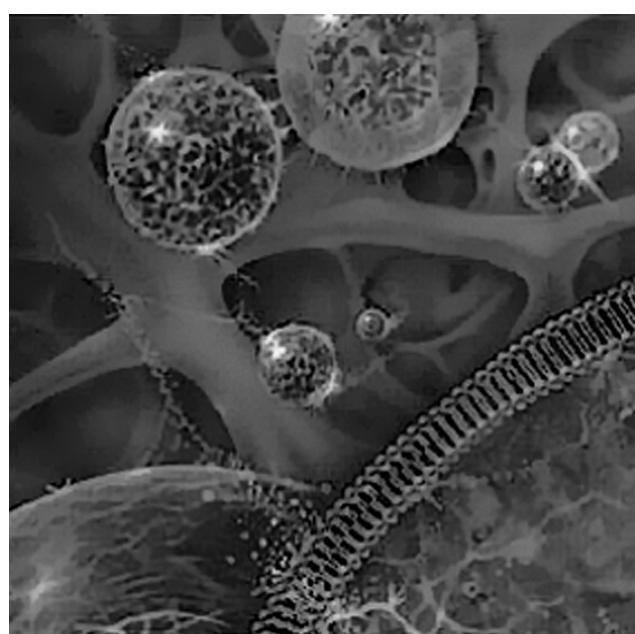


Рис. 6. Двухслойная мембрана (справа) отделяет содержимое клетки от внешнего окружения. Сложные молекулы во внешнем слое мембранны контролируют взаимодействия с другими клетками

гамма-излучению, потому что разработка внешних экранирующих устройств не принесла ожидаемого эффекта.

Одно из решений этой проблемы — использование наночастиц в качестве посредников между больными клетками и устройствами мониторинга. Эти капсулы для доставки лекарств очень малы, размерами всего несколько сотен нанометров.

Простая подкожная инъекция может доставить тысячи или миллионы этих частиц в кровеносную систему пациента. Триллионы клеток в человеческом теле идентифицируют друг друга и передают сообщения с помощью сложных молекул, находящихся в их мембранах. Эти молекулы действуют как химические "флаги" для связи с другими клетками или как химические "ворота", контролирующие поступление в клетку молекул из кровотока (например, гормонов).

Когда клетка повреждается гамма-излучением, она производит маркер — определенный класс белков, названный "CD-95", и помещает их на внешней поверхности мембраны (рис. 6). "Это похоже на то, что клетка говорит другой — я повреждена", — сказал Лири.

Если поместить на внешнюю поверхность наночастиц молекулы, способные присоединяться к белковым маркерам "CD-95", то ученые смогут "программировать" наночастицы для поиска клеток, поврежденных радиацией. И, возможно, использовать наночастицы для доставки специальных восстанавливающих энзимов к отдельным клеткам.

Человеческий организм и другие организмы имеют естественные энзимы, способствующие восстановлению (репарации) ДНК. Правда, некоторые из них работают лучше, некоторые хуже. "Существуют организмы, которые могут выдерживать большие дозы радиации, чувствуя себя при этом удовлетворительно", — говорит Лири. Изучая эти естественные механизмы восстановления, ученые получат возможность сконструировать такие энзимы, которые могут быть доставлены с помощью нанокапсул.

Команда Лири изучает также способы присоединения флуоресцентных молекул на поверхность наночастиц (рис. 7). Они могут быть использованы для отображения определенных ступеней процесса заражения и восстановления. Для разных ступеней можно будет применять разные цвета. Эти флуоресцентные метки смогут обеспечить мониторинг наночастиц внутри тела.

Все элементы этой идеи представлены порознь: ДНК-репарационные энзимы, наночастицы, флуоресцентные метки. Фокус в том, как объединить это в одно работающее устройство.

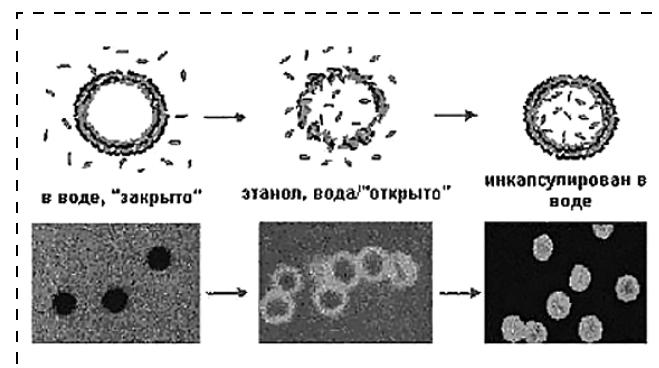


Рис. 7. На этом рисунке стенки нанокапсул растворяются, вбирая внутрь флуоресцентное вещество. Подобные наночастицы могут быть сделаны из ряда "самособираемых" полимеров, таких как теллурид кадмия

"Это очень трудная проблема, и мы не способны разрешить ее даже за три года — срок финансирования проекта. Мы пока пытаемся открыть новые области этой науки, а это само по себе большой прогресс, — говорит Лири, — но над многим еще придется поработать".

Через четыре года после изысканий Джеймса Лири команда Мичиганского университета поставила себе более тривиальную задачу: маркирование лейкоцитов, пострадавших от гамма-излучения, простыми флуоресцентными наночастицами. Суть технологии проста: пациенту вводят раствор наночастиц, которые соединяются с лейкоцитами, пострадавшими от воздействия радиации. Далее, облучая сетчатку глаза высокочастотным лазерным лучом, на цитометре можно будет подсчитать число лейкоцитов, содержащих метки-наночастицы, и по их числу установить, насколько серьезную дозу облучения получил космонавт.

Наночастицы, предложенные доктором Джеймсом Баркером, представляют собой дендромеры, к которым исследователи прикрепили молекулы с высокой степенью адгезии к больным лейкоцитам и флуоресцентные молекулы красителя (рис. 8).

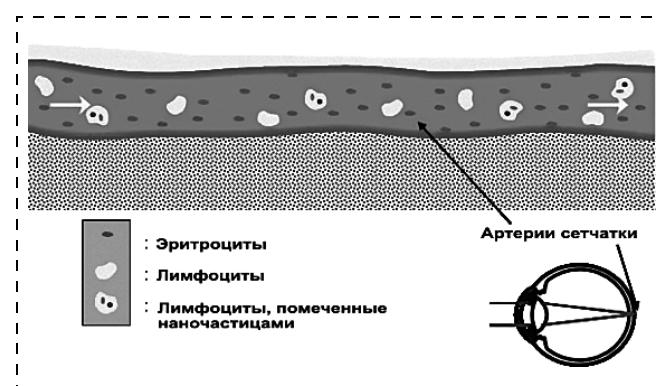


Рис. 8. Принцип действия нового метода, использующего дендромеры

Теперь космонавту не нужно будет даже сдавать кровь на анализ — степень облучения можно узнать с помощью лазерного сканнера, который, сканируя сосуды сетчатки, считает число флуоресцентных меток в протекаемой через сосуды сетчатки крови.

Новый цитометр, способный считать число вспышек от флуоресцентных частиц "на лету", был построен профессором Теодором Норрисом из команды исследователей.

В предполагаемом путешествии пилотируемого корабля к Марсу люди проведут около двух лет, постоянно получая дозы радиации. "NASA сказало, что большинство из команды корабля получит билет в один конец, — сказал Норрис. — Поэтому, если команда не будет пользоваться методами ранней диагностики лучевой болезни, на Землю может никто не вернуться".

Исследователями уже проведены эксперименты на мышах, в ходе которых была продемонстрирована эффективность дендромерного мониторинга. Как говорят ученые, им необходимо еще два года, чтобы сделать работоспособную методику диагностики для человека.

Источники:

1. University of Michigan: Molecular Biophysics and Bioengineering.
2. Nanotechnology-Now: Astronaut's eyes may become windows on the bloodstream (10 декабря 2004).

Близится эра саморазмножающихся наномашин

Компания *General Dynamics* опубликовала итоги полугодового исследования, посвященного проблеме

создания саморазмножающихся наномашин — таких наномеханизмов, которые способны создавать себе подобные устройства. Исследование проводилось по заказу NASA, а его главным выводом является то, что создание таких механизмов возможно в обозримом будущем. Более того, по конструкции эти устройства будут проще, чем процессы Pentium 4.

В исследовании, полный текст которого можно найти на сайте (файл PDF размером 1,73 Мбайт), рассматриваются так называемые "кинематические ячеистые автоматы" — наноустройства, состоящие из идентичных блоков. Подобные автоматы могут наращивать функциональность путем подключения дополнительных блоков, т. е., по сути, собирать сами себя. Кроме того, такой наноробот может собирать себе подобные аппараты.

Исследователи *General Dynamics* оценили существующие конструкции саморазмножающихся нанороботов с точки зрения правил безопасности, предложенных калифорнийской компанией Foresight Institute. Эти правила разработаны специально для того, чтобы обеспечить максимальную безопасность процесса автоматической сборки нанороботов, но пока носят скорее теоретический, чем прикладной характер.

По мнению авторов исследования, подобные разработки смогут найти применение уже в ближайшее десятилетие. Причем сфера их использования будет самой широкой от программируемых микросхем до роботов для изготовления изделий с молекулярной точностью.

<http://websurfer.kulichki.com\IndexArchive.html>

Составил Ю. Г. Свидиненко

ПРЕДСТАВЛЯЕМ КНИГУ

Нанотехнологии в полупроводниковой электронике / Отв. редактор А. Л. Асеев. — Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004. — 368 с.

В монографии представлены результаты работ ИФП СО РАН по развитию нанотехнологий и методов диагностики для создания нового поколения устройств и приборов современной микро- и наноэлектроники. Рассмотрены: технологии молекулярно-лучевой эпитаксии; методыnanoструктурирования, позволяющие создавать двух- и трехмерные nanoструктуры различных форм и геометрии; современные методы диагностики полупроводниковых nanoструктур с атомным разрешением; результаты применения нанотехнологий для изготовления устройств наноэлектроники.

Монография представляет интерес для специалистов в области физики полупроводников, физики и химии твердого тела, микро-, наноэлектроники и нанотехнологий.

Утверждено к печати Ученым советом Института физики полупроводников СО РАН

Рецензенты:

акад. Ф. А. Кузнецов, чл.-корр. РАН И. Г. Неизвестный,
д-р физ.-мат. наук В. К. Малиновский

Человости микросистемной техники

Роботы начинают питаться живой плотью

Шаг беспрецедентной значимости, который будет иметь самые серьезные последствия для всего человечества, сделали британские ученые. Они создали робота, который получает энергию, поедая живую плоть — самых настоящих москитов. Открывается дорога к созданию боевых роботов, которые смогут в самом что ни на есть прямом смысле поедать своих поверженных противников из числа людей и животных. Если дальнейшие опыты покажут, что подобный механизм выработки электроэнергии обладает высокой эффективностью, здравый смысл уже не сможет остановить научный прогресс.

Как сообщает New Scientist, британские ученые из университета Бристоля изобрели робота под названием EcoBot II, использующего в качестве топлива мух (см. рисунок). В основе разработки британских ученых — технология, позволяющая вырабатывать электрический ток за счет разложения организмов живых мух, пойманных роботом с помощью ароматизированной наживки (созданную

по аналогии с человеческими экскрементами). Переваривание осуществляется в специальных топливных элементах. При переваривании живой плоти высвобождаются электроны, которые ведут к образованию электрического тока. Энергия получается из полисахаридов хитина, из которого состоит насекомое.

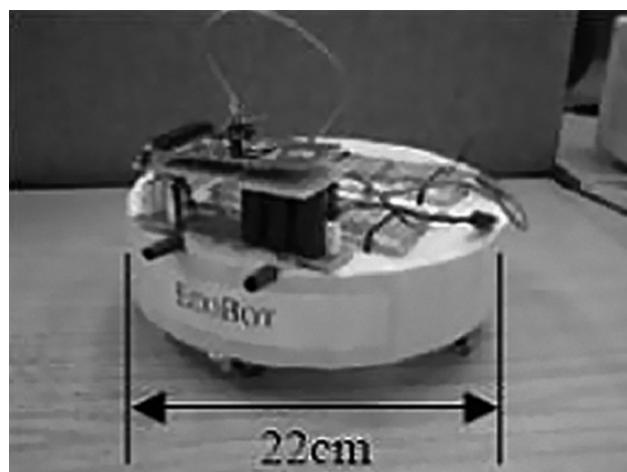
Скорость передвижения робота составляет 10 см/ч.

Робот EcoBot II является плодом усилий по созданию роботов, управление которыми можно будет осуществлять по принципу "отправил и забыл". Такие роботы могли бы, по мнению британских ученых, собирать информацию в опасных или недружественных по отношению к человеку условиях, осуществлять наблюдение за промышленными объектами либо за противником на поле боя и т. д.

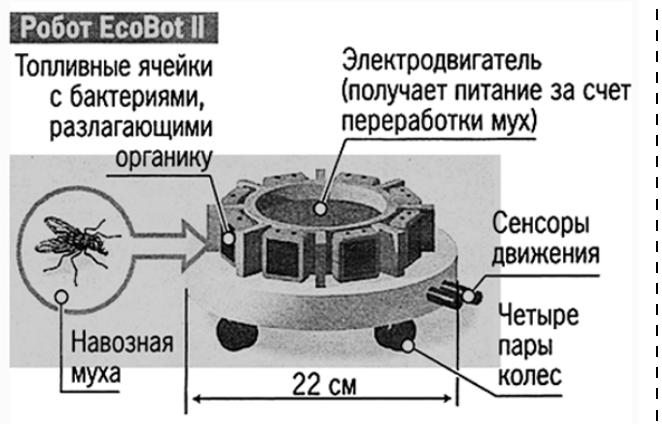
Правда, пока что до автономности новому роботу далеко — руководителю группы Крису Мелуишу (Chris Melhuish) и его сотрудникам приходится самостоятельно кормить свое детище мухами.

CYBERINFO <http://cyberinfo.ru/>

<http://websurfer.kulichki.com/IndexArchive.html>.



a)



б)

Робот EcoBot II:

а — конструкция; б — внешний вид

ИНФОРМАЦИЯ

II Всероссийский конкурс молодежных проектов в области нанотехнологий

Nanotechnology News Network, Молодежное Научное Общество и Концерн "Наноиндустрия" при поддержке КБ "Юниаструм Банк" и POWERCOM представляют:

"II Всероссийский конкурс молодежных проектов в области нанотехнологий"

Цель конкурса — выявление и поддержка перспективных молодых ученых России и СНГ, мобилизация талантливой молодежи на развитие нанотехнологий в России, а не за рубежом.

Нанотехнологии в ближайшем десятилетии произведут такую же революцию в обработке материи, как компьютеры — в обработке информации.



II ВСЕРОССИЙСКИЙ КОНКУРС
МОЛОДЁЖНЫХ ПРОЕКТОВ
В ОБЛАСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Именно это высокотехнологичное направление позволяет вывести страну на путь интенсивного инновационного развития, трудоустроить в России большинство ученых и инженеров, поднять другие отрасли промышленности на качественно новый технологический уровень, повысить качество жизни людей. Невозможно преувеличить значение развития отечественных нанотехнологий в решении актуальнейших проблем медицины, электроники, национальной безопасности и борьбы с терроризмом.

Наиболее актуальные направления проектов:

1. Точное изучение атомно-молекулярного строения вещества.
2. Поведение наночастиц иnanoструктур в органических и неорганических системах.
3. Перспективные наноматериалы для автомобилестроения и авиации.
4. Нанометрология.
5. Микро- и наноэлектромеханика.
6. Нанотехнологии в энергетике.
7. Наноэлектроника и квантовые вычисления.

Официальный сайт конкурса: <http://www.nanonewsnet.ru/a/competition/rus/>.

8. Нанофотоника, лазеры и оптоэлектроника на новых физических принципах.

9. Управление синтезом нанообъектов, методы молекулярной сборки и самосборки.

10. Нанобиотехнология и наномедицина.

11. Имплантанты и нейротехнологические интерфейсы.

12. Программное обеспечение и алгоритмы для наноинструментов и наномашин.

13. Нанотехнологии для внедрения на промышленных предприятиях РФ.

В конкурсе могут принять участие школьники, студенты, молодые ученые и специалисты в возрасте до 30 лет, проживающие на территории стран СНГ.

К рассмотрению принимаются технически грамотные проекты от индивидуальных исследователей и команд, основанные на системном подходе, предлагающие оригинальный инновационный подход к обеспечению проекта технологическими, кадровыми, финансовыми, интеллектуальными, информационными, правовыми и иными ресурсами. Должна присутствовать оценка экономической эффективности проекта.

Конкурсная комиссия представлена выдающимися российскими учеными и опытными промышленниками в области нанотехнологий. При оценке проектов учитывается возраст и образование их авторов.

Предусмотрены призы:

I—X места — бесплатная годовая подписка на журнал "Наука и жизнь";

I—XX места — бесплатная годовая подписка на ежемесячный CD "Мир Нанотехнологий";

I—XXX места — комплект отечественного состава РВС на основе наночастиц для восстановления и повышения надежности автомобильного двигателя.

Кроме того:

- Победителей также ждет возможность практической реализации своих проектов.
- Наиболее интересные работы будут опубликованы на ведущих сайтах отрасли.
- Авторам могут быть предоставлены рекомендательные письма для содействия в получении финансирования, трудоустройстве или поступлении в учебные заведения.

Рекомендации по разработке и управлению проектами можно найти в разделе "Библиотека" на сайте Молодежного Научного Общества www.mno.ru.

Большое количество материалов по нанотехнологиям и дополнительную информацию о конкурсе можно найти на сайте www.nanonewsnet.ru, предоставленном компанией Nanotechnology News Network.

**КОМПЛЕКС АППАРАТУРЫ
ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО СВЕРХЛОКАЛЬНОГО И ПОСЛОЙНОГО
ИОННО-ЛУЧЕВОГО И ИОННО-ХИМИЧЕСКОГО ПРЕПАРИРОВАНИЯ
СЛОЖНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

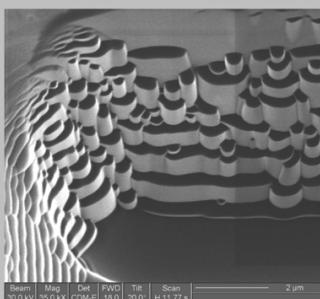


Аппаратура ионно-плазменного послойного препарирования. Разработка Центра микротехнологии и диагностики СПбГЭТУ

Возможности:

- прецизионное послойное ионно-химическое избирательное травление;
- текущий “in situ” оптический микроскопический контроль, цифровая запись изображения;
- текущий “in situ” спектральный интерферометрический контроль

Материаловедение



- Препарирование дислокации

Микроэлектроника



- Препарирование интегральной микросхемы

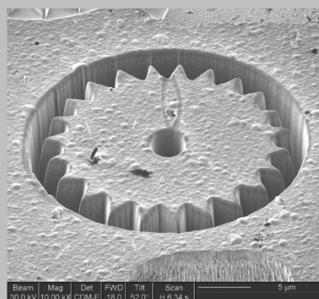


Аппаратура ионного-лучевого сверхлокального препарирования STRATA FIB 205 компании FEI

Возможности:

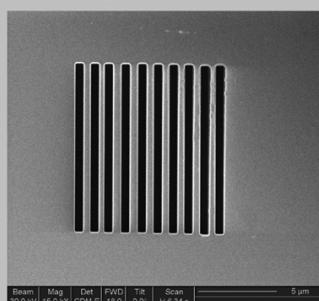
- сверхлокальное ионно-лучевое травление;
- избирательное локальное ионно-стимулированное травление;
- текущий “in situ” контроль во вторичных электронах и ионах, цифровая запись изображения

Микромеханика



- Ионное микрофрезерование карбида кремния

Микрооптика



- Ионное микрофрезерование на торце оптоволокна. Дифракционная решетка

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”,

Центр микротехнологии и диагностики,

197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д.5, тел. 234-16-82, e-mail: cmid@eltech.ru

11th IEEE International On-Line Testing Symposium
Côte d'Azur, France
July 6-8, 2005

General Chairs
Michael Nicolaidis,
iRoC Technologies
Lorena Anghel,
TIMA Laboratory

Program Chairs
Cecilia Metra,
U. Bologna
Kaushik Roy,
Purdue University

Vice-General Chairs
Yervant Zorian,
Virage Logic
Dimitris Gizopoulos,
U. Piraeus

Vice-Program Chair
Régis Leveugle,
TIMA Laboratory
Joao Paolo Teixeira,
IST/INESC-ID

Publicity
Daniele Rossi,
U. Bologna

Publications
Swarup Bhunia,
Purdue University

Local Chair
Raoul Velasco,
TIMA Laboratory

Audio Visual Chair
Michele Portolan,
TIMA Laboratory

Industrial Liaison
E. Dupont,
iRoC Technologies

ETTTC Liaison
Joan Figueras,
U. P. de Catalunya



Preliminary Call for Papers

Issues related to on-line testing are increasingly important in modern electronics systems. In particular, the huge complexity of electronic systems has seen reliability needs growing up in various application domains as well as pressure for low cost products. There is a corresponding increasing demand for cost-effective on-line testing techniques. These needs have increased dramatically with the introduction of very deep submicron and nanometer technologies. Nanometer technologies impact adversely noise margins and make mandatory integrating on-line test in modern ICs. The Symposium is also emphasizing on on-line testing in the continuous operation of large applications such as wired, cellular and satellite telecommunication, as well as in cryptographic chips. The Symposium is sponsored by the IEEE Computer Society Test Technology Technical Council (TTTC), co-organized by the TTTC On-line Testing TAC and the European Group of TTTC, in collaboration with TIMA Laboratory, University of Bologna, Purdue University and iRoC Technologies.

The topics include (but are not limited to) the following ones:

- ❖ Reliability issues in nanometer technologies
- ❖ Field diagnosis, maintainability and reconfiguration
- ❖ Security issues in cryptographic chips
- ❖ On-line testing of analog and mixed signal circuits
- ❖ On-line test in the continuous operation of large systems
- ❖ On-line testing in automotive, railway, avionics and industrial control
- ❖ Self-checking circuits and coding theory
- ❖ On-line and off-line BIST
- ❖ Synthesis of on-line testable circuits
- ❖ Radiation effects
- ❖ Fault-tolerant and fail-safe Systems
- ❖ On-line power monitoring and control
- ❖ On-line monitoring of current, temperature and other reliability indicators
- ❖ Reliability evaluation

Submissions:

The IOLTS Program Committee invites authors to submit papers in the above areas. All submissions should have a title page with the name, address, phone number, fax number, and e-mail address of the contact author. Accepted papers will be included in a formal Proceedings to be published by the IEEE.

For updated submission information please visit the web site tima.imag.fr/conferences/iolts

Please observe the following key dates:

- submission deadline: **February 1st, 2005**
- notification of acceptance: **March 25th, 2005**

Submission Information

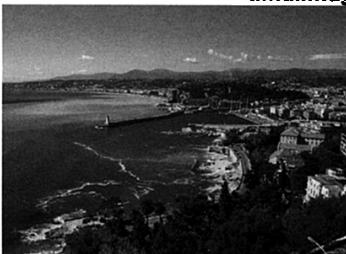
General Information

Kaushik Roy
Purdue University
1285 Electrical Engineering
Building, West Lafayette
IN 47907-1285, USA
Tel: +1 765 494 2361
Fax : +1 765 494 3371
kaushik@ecn.purdue.edu

Lorena Anghel
TIMA Laboratory
46, av. Felix Viallet
38031 Grenoble Cedex
France
Tel: +33 4 76 57 46 96
Fax : +33 4 76 47 38 14
lorena.anghel@imag.fr

Michael Nicolaidis
iRoC Technologies
World Trade Center, BP 1510
38025 Grenoble Cedex
France
Tel: +33 4 38 12 07 63
Fax: +33 4 38 12 96 15
michael.nicolaidis@iroctech.com

For all updated information concerning IOLTS 2005, please visit the web site
tima.imag.fr/conferences/iolts




IEEE COMPUTER SOCIETY


Test Technology Technical Council



01-03 June 2005

SYMPORIUM on

Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS

Hotel Eden au Lac
Montreux, Switzerland

Sponsored by

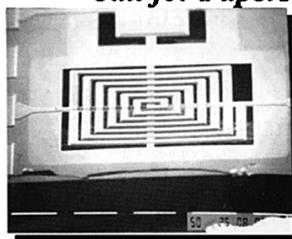


IEEE Computer Society

Test Technology Technical Council

IEEE Components, Packaging and
Manufacturing Technology Society (pending)The Institute of Electrical and Electronics
Engineers, Inc.

Call for Papers

In cooperation with
IEEE Circuits and Systems SocietyChair: B. COURTOIS, TIMA Labs, Grenoble, France
Co-Chair: K. MARKUS, Zeus Strategies, LLC, Durham, USA

CONFERENCES

CAD, Design and TestChair: G. WACHUTKA, Munich Univ. of Technology, Germany
Co-chair: J.M. KARAM, MEMSCAP, Bernin, France**Microfabrication, Integration and Packaging**Chair: E. JUNG, IZM, Berlin, Germany
Co-chair: M. ESASHI, Tohoku Univ., Japan

Including

A WORKSHOP on Design for Micro & Nano Manufacture

INVITATION TO PARTICIPATE

This Symposium will be a follow-up to the very successful issues held in 1999 and 2000 in Paris and in 2001, 2002 and 2003 in Mandelieu-La Napoule and 2004 in Montreux Switzerland. This series of Symposia is a unique single-meeting event expressly planned to bring together participants interested in manufacturing microstructures and participants interested in design tools to facilitate the conception of these microstructures. Again, a special emphasis will be put on the very crucial needs of MEMS/MOEMS in terms of packaging solutions. The goal of the Symposium is to provide a forum for in-depth investigations and interdisciplinary discussions involving design, modeling, testing, micromachining, microfabrication, integration and packaging of structures, devices, and systems.

We look forward to welcoming you to Montreux and encourage you to participate by submitting an abstract for one of the two Conferences.

B. COURTOIS
K. MARKUS
CAD, Design and Test ConferenceChair: G. WACHUTKA, Munich Univ. of Technology, Germany
Co-chair: J.M. KARAM, MEMSCAP, Bernin, France

Programme Committee:

B. CHARLOT, TIMA Labs, Grenoble, France
 M. SANTIAGO, Univ. Barcelona, Spain
 M. RENCZ, BUTE, Budapest, Hungary
 M. ISMAIL, Ohio State Univ., Columbus, USA
 F. PRESSEQUE, CNES, Toulouse, France
 R. LAUR, Univ. of Bremen, Germany
 B. ROMANOWICZ, Nano Science & Technology Institute, Cambridge, USA
 R. RUDD, Lawrence Livermore National Lab, Livermore, USA
 Y. C. LIANG, National Univ. of Singapore
 I. BALK, The Ramzay Technologies Inc, Brighton, USA
 J. ZHU, Nanjing Electronic Devices Institute, China
 J. SAMITIER, Univ. of Barcelona, Spain
 S. BLANTON, Carnegie Mellon Univ., Pittsburgh, USA
 O. SIGMUND, TU of Denmark, Lyngby, Denmark
 A. KAISER, IEMN, Lille, France
 A. WILD, Motorola, Munich, Germany
 M.A. MAHER, SofMEMS, Los Gatos, USA
 B. VIGNA, STMicroelectronics, Cornared, Italy
 F. MALOBERTI, Texas A&M Univ., College Station, USA
 Z. CUI, RAL, Didcot, UK
 T. MUKHERJEE, Carnegie Mellon Univ., Pittsburgh, USA
 P. WU, National Chiao Tung Univ., Hsinchu City, Taiwan
 C. CANE, Univ. of Barcelona, Spain
 T. VEIJOLA, Helsinki Univ. of Technology, Finland
 A. RICHARDSON, Lancaster University, UK
 O. SLATTERY, NMRC, Cork, Ireland
 P. SALOMON, 4M2C PATRIC SALOMON, Berlin, Germany

This Conference will bring together researchers, engineers and practitioners involved in the development of CAD tools and design methodologies for MEMS and MOEMS. The participants will also have the opportunity to interact with the other Conference by the means of plenary talks.

A workshop on "Design for Micro & Nano Manufacture" is planned to take place on 30/31 May in conjunction with DTIP. This workshop will feature intermediate results from the new European Network of Excellence "Design for Micro & Nano Manufacture (PATENT-DfMM)", and also discuss industry's needs in this area. PATENT-DfMM aims to establish a collaborative team to provide European industry with support in the field of "Design for Micro and Nano Manufacture (DfMM)" to ensure that problems affecting the manufacturing and reliability of products based on micro nano technologies (MNT) can be addressed before prototyping and production. www.patent-dfmm.org Contact: Patric Salomon, info@patent-dfmm.org

Microfabrication, Integration and Packaging ConferenceChair: E. JUNG, IZM, Berlin, Germany
Co-chair: M. ESASHI, Tohoku Univ., Japan

Programme Committee:

F. TAY, National Univ. of Singapore
 J. DUAL, ETH Zentrum, Zürich, Switzerland
 M. HECKLE, FZK, Karlsruhe, Germany
 H. WICHT, Wicht Technologie Consulting, Munich, Germany
 D. ALLEN, Cranfield Univ., Bedford, UK
 R. MAEDA, MEMS and Packaging Research Group, AIST, Tsukuba, Japan
 G.S. KUO, National Chengchi Univ., Taipei, Taiwan
 A. TAY, National Univ. of Singapore
 K. SATO, Nagoya Univ., Japan
 B. MICHEL, IZM, Berlin, Germany
 C. KHAN MALEK, Lab. FEMTO-ST/LPMO, Besançon, France
 P. VIKTOROVITCH, Ecole Centrale de Lyon/LEOM, France
 V. KEMPE, Sensor Dynamics AG, Austria
 H. HARTNAGEL, TU Darmstadt, Germany
 V. BRIGHT, Univ. of Colorado, Boulder, USA
 Z. WANG, Singapore Institute of Manufacturing Technology (SIMTech), Singapore
 P. NICOLE, Thales Group, France
 H. YANG, National Chung Hsing Univ., Taiwan
 D. COLLARD, CIRMM/IEMN, Villecucu d'Asq, France
 D. TOLFREED, Techpreneur Ltd, Warrington, UK
 P. FRENCH, TU Delft, The Netherlands
 D. SEEGER, IBM, Watson Research Center, Yorktown Heights, USA
 G.-J. WANG, National Chung Hsing Univ., Taiwan
 Y. WANG, SIMIT, Shanghai, China
 T. BOUROUINA, ESIEE, Noisy le Grand, France
 S. BASROUR, TIMA Labs, Grenoble, France
 K. BERGMAN, Columbia Univ., New York, USA

This Conference will bring together researchers, engineers and practitioners involved in the development of integration technologies and packaging for MEMS and MOEMS. The participants will also have the opportunity to interact with the other Conference by the means of plenary talks.

Web site: <http://tima.imag.fr/Conferences/dtip>

The topics for this Conference include (preliminary):

- Technology CAD in general
- Modeling and simulation of fabrication processes
- Devices and components (sensors, actuators, ...)
- MEMS/MOEMS libraries and IP
- Signal processing
- Integrated CAD tools
- Numerical simulation
- Yield estimation
- Failure mechanisms
- Fault modeling
- Fault simulation and test pattern generation
- Mechanical simulation
- Thermal evaluation
- Interoperability of CAD/CAE tools
- Multiphysics simulation
- Structured design methodologies
- Languages for interchange data among designs and tools
- Model order reduction

The topics for this Conference include (preliminary):

- Integrated processes (micromachining, micromolding, ...)
- Process integration between MEMS and electronics
- Microlithography issues unique to MEMS/MOEMS
- Manufacturing
- Materials
- Assembly technologies
- Packaging for harsh environments
- MOEMS packaging
- RF and microwave packaging
- Test structures
- Devices and components (sensors, actuators, ...)
- Dimensional measurements
- Physical measurements
- Failure analysis
- Reliability
- Characterization
- Process monitoring
- Non destructive evaluation

Plenary INVITED TALKS given by prominent speakers will include:

- Micro/Nanomechanical Instrumentations for Nanoengineering
Takahito ONO, Tohoku Univ., Japan

Miniaturized microtools based on recent nano/micromachining technology increase its importance in nanoscale science and engineering. Micro/nano probes for nanometric sensing and processing, including multi probes for scientific measurement and data storage, near-field optical probe with tweezers, ultra-sensitive mass and force sensors will be presented.

• MicroFluidic Cell Manipulation and Modification Devices

Philippe RENAUD, EPFL, Lausanne, Switzerland

This paper presents recent developments in BioMEMS for flow cytometry. Biological cells flowing into microfluidic channels can be manipulated, analysed and modified by electrical field that are applied in micro-electrodes. Dielectrophoresis (DEP) forces is be used to filter, separate or trap cells. Single cell analysis is preformed by electrical impedance spectroscopy by comparing impedance spectra (real and imaginary part) at different frequencies. High electrical field in micro-channels can also be used to perform electroporation at the single cell level.

EXHIBITION

An exhibition will be organized in the framework of the Symposium. CAD software, products, equipments, instruments, foundries offerings, etc. may be exhibited. Exhibitors who will register early enough will be given the opportunity to give a product presentation during the vendor session that will be placed in the Symposium programme. If you plan to exhibit, please contact the Symposium Chair.

SPECIFIC EVENTS SPONSORING

If you wish to sponsor an event like a reception, a lunch, or any specific event during the Symposium, please contact the Symposium Chair.

ADVERTISING IN THE PROGRAMME BOOKLET

The programme booklet will be widely distributed to announce the Symposium. If you wish to advertise in the programme booklet, please contact the Symposium Chair.

DATES

Submission of abstracts: 30 NOVEMBER 2004

Notification of acceptance: 14 JANUARY 2005

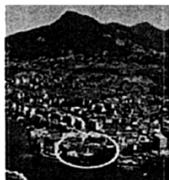
LOCATION

The Symposium will be held at the Hôtel Eden au Lac in Montreux, Switzerland.

On the shores of Lake Geneva, the Hôtel Eden au Lac overlooks the lake and the majestic Alps to the south.

The hotel is less than an hour away from Geneva airport. The distance from Geneva international airport is 90km.

- Time & cost by taxi: approx. 45 minutes & approx. SFr300
- Time & cost by train: approx. 70 minutes & approx. - second class SFr 31, first class SFr 52



Hôtel Eden au Lac
11, rue du Théâtre
CH - 1820 Montreux
Switzerland

Tel.: +41 21 966 0 800

Fax: +41 21 966 0 900

Web site: <http://www.edenmontreux.ch>

PROCEEDINGS

The Proceedings of the Symposium will be available at the meeting.

SPECIAL ISSUES OF JOURNALS AND MAGAZINES

It is a tradition that Special Issues of Journals and Magazines are published after the Symposium. These Special Issues collect revised versions of papers presented during the Symposium. DTIP 2005 Special Issues will be organized in the Journal of Microsystem Technologies and in the Journal of Analog Integrated Circuits and Signal Processing.

CONTACTS

Bernard COURTOIS

TIMA Labs

Tel.: +33 4 76 57 46 15

Fax: +33 4 76 47 38 14

E-mail: Bernard.Courtois@imag.fr

Karen MARKUS

Zeus Strategies

Tel : +1 919 806 4682

Fax : +1 919 806 4990

E-mail: Karen@ZeusStrategies.com

PAPER REVIEW

To ensure a high-quality Symposium, all abstracts will be reviewed by the Programme Committee members under the leadership of the Conference Chairs, and the Proceedings papers will be reviewed by the Conference Chairs for technical merit and content.

ORAL OR POSTER PRESENTATION

Submitted papers may be selected for oral or poster presentation. All oral and poster presentations will be included in the Symposium Proceedings.

SUBMISSION OF ABSTRACTS

Your abstract must include the following:

- Abstract title
- Author listing (principal author first)
 - First (given) name, Last (family) name, and affiliations, Mailing address, telephone, fax, and e-mail address.
- Presentation
 - Indicate your preference for "Oral Presentation" or "Poster Presentation". Placement is subject to chair's discretion.
- Abstract text
 - Not less than 250 words, preferably 1500 words.
- Key words
 - List a maximum of five key words.
- Brief biography (of principal author) approximately 50 words.

Submission will be electronically only at:

<http://tima.imag.fr/Conferences/dtip>

Detailed instructions will be posted in due time on the Symposium web site. Questions may be directed in the meantime by e-mail (dtip@imag.fr).

CONDITIONS OF ACCEPTANCE

Authors are expected to secure registration fees and travel and accommodation funding, through their sponsoring organizations, before submitting abstracts. Abstracts should contain enough detail to clearly convey the approach and the results of the research. Government and company clearance to present and publish should be final at the time of submittal.

Commercial papers with no research, presenting products, cannot be submitted to the Symposium. Such papers can be presented in the framework of the exhibition (see corresponding section).

Web site: <http://tima.imag.fr/Conferences/dtip>

УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО НАНО- И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ

Драгунов В. П., Неизвестный И. Г., Гридчин В. А.

Основы наноэлектроники: Учеб. пособие. — 2-е изд., испр. и доп. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. — 496 с. — (Серия "Учебники НГТУ").

Излагаются основные вопросы физики систем пониженной размерности, рассматриваются особенности энергетического спектра и переноса частиц в многослойных структурах с резкими потенциальными границами.

Пособие предназначено для студентов, магистрантов и аспирантов, специализирующихся в области физики полупроводников и полупроводниковых приборов. Оно может быть рекомендовано всем желающим систематизировать свои знания в области физических основ наноэлектроники.

Р е ц е н з е н т ы:

д-р техн. наук, проф. А. А. Орликовский,
д-р физ.-мат. наук, проф. А. А. Горбацевич

Гридчин В. А., Драгунов В. П.

Физика микросистем: Учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. — 416 с. — (Серия "Учебники НГТУ").

Книга посвящена физическим основам микросистем — новому направлению техники, которое интенсивно развивается в последние два десятилетия.

В данном томе рассмотрены главным образом сенсоры давления и актиоаторы с электростатическим управлением, что обусловлено широтой их практического применения.

Предлагаемая книга ориентирована на лиц, специализирующихся в создании микросистемной техники, для которых важно количественное описание и наличие эффективных численных моделей.

Учебное пособие может быть полезно студентам старших курсов, обучающимся по специальностям "Микроэлектроника и твердотельная электроника" и "Микросистемная техника", а также аспирантам, инженерам и научным работникам.

Под редакцией чл.-корр. РАН И. Г. Неизвестного
Р е ц е н з е н т: д-р техн. наук В. В. Лучинин

Мальцев П. П., Мальцева С. В., Мельников А. А.
Микросистемная техника. Кн. 1. Введение в информационное обеспечение микросистемной техники: Учеб. пособие — Московский государствен-

ный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет). — М.: 2004. — 64 с.

Рассмотрены основы обеспечения информацией микросистемной техники, вопросы формирования рынка бизнес-информации, а также формы представления и пополнения информационного наполнения сайтов, стимулирующие создание устойчивого сообщества пользователей в области микросистемной техники.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности "Микросистемная техника" (201900). Оно может быть использовано ими при изучении дисциплины "Введение в специальность", а также при выполнении курсовых и дипломных проектов. Пособие также может быть полезно студентам других специальностей.

Р е ц е н з е н т ы:

д-р техн. наук К. О. Петросянц,
д-р техн. наук Ю. В. Савченко

Мальцев П. П., Никифоров А. Ю., Телец В. А.
Микроактиоаторы.: Учебно-методическая разработка — Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет). — М., 2004. — 56 с.

Кратко изложены: основные принципы действия, конструкция, технология изготовления, параметры и характеристики, области применения микроактиоаторов — исполнительных устройств изделий микросистемной техники.

Одобрено и рекомендовано к изданию советом кафедры: "Микросистемная техника" МГИРЭА (ТУ).

Р е ц е н з е н т ы:

А. И. Чумаков, Ю. Т. Котов

Лучинин В. В., Степанов Ю. И., Телец В. А.
Микросистемная техника. Прикладные области применения. Учебно-методическая разработка — Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет). — М., 2004. — 100 с.

Кратко изложены основные, направления развития изделий микросистемной техники (МСТ), области их военно-технического применения, состояние и условия развития, принципы построения и технология изготовления, состав базовых параметров и характеристик, материаловедческий, технологический и элементный базисы, в том числе в области СВЧ-техники, перспективные области боевого и специального применения.

Одобрено и рекомендовано к изданию советом кафедры "Материалы и изделия радиоэлектроники военного назначения" МГИРЭА и редакционно-издательским советом ФГУП "22 ЦНИИ Минобороны России".

Распопов В. Я. Микромеханические приборы: Учеб. пособие. Тул. Гос. университет. Тула, 2002. 392 с.

Изложены вопросы по технологическим основам производства микромеханических приборов, начиная с описания свойств кристаллов, методов их выращивания и кончая разработкой технологий и конструкций. Изложены вопросы, связанные с особенностями измерения микроперемещений чувствительных элементов приборов, как с аналоговым, так и с частотным выходом. Приведен подробный материал по теории и расчету акселерометров прямого и компенсационного преобразования с монокристаллическим чувствительным элементом. Изложены основы теории и расчета датчиков давления с мембранными чувствительными элементами. Приведены теория и основы расчета гироскопов, выполненных по схеме с кардановым подвесом и камертонного типа. Проанализированы вопросы динамической настройки гироскопов и способов их реализации. Выполнен анализ демпфирования гироскопов и проведено обсуждение особенностей внутренней электроники гироскопов. Рассмотрены особенности рынка микромеханических приборов и приведены технические характеристики приборов, выпускаемых иностранными фирмами и отечественными разработчиками.

Учебное пособие предназначено для студентов вузов. Может быть полезно магистрам, аспирантам и инженерам.

Р е ц е н з е н т :

заслуженный деятель науки РФ, д-р техн. наук, проф. С. Ф. Коновалов.

Мельников А. А. Расчет электромагнитных и температурных полей методом конечных элементов: Учеб. пособие / Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет) — М., 2000. — 68 с.

Рассмотрены особенности математического описания электромагнитных и температурных полей в сплошных средах. Изложены основы метода конечных элементов, одного из самых эффективных современных численных методов решения ин-

женерных и физических задач. Представлена методика решения задач расчета электростатических, магнитных и температурных полей в однородных, кусочно-однородных, неоднородных линейных и нелинейных средах методом конечных элементов. Приведены примеры решения конкретных инженерных задач.

Учебное пособие предназначено для студентов специальностей "Микросистемная техника" (201900) и "Электронные приборы и устройства" (200300). Оно может быть использовано ими при изучении дисциплин "Проектирование микросистем", "Математические модели и САПР электронных приборов и устройств", а также при выполнении курсовых и дипломных проектов. Пособие также может быть полезно студентам других специальностей.

Р е ц е н з е н т ы:

А. В. Грибанов (МГУ им. М. В. Ломоносова),
К. Б. Поярков (МИЭТ)

Кульчицкий Н. А., Мельников А. А., Войцеховский А. В. Полупроводниковые сверхрешетки: свойства, применение: Учеб. пособие / Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет) — М., 2000. — 80 с.

Изложены основы теории, электронные и оптические свойства полупроводниковых сверхрешеток. Приведена классификация сверхрешеток. Рассмотрены различные типы полупроводниковых сверхрешеток. Наибольшее внимание уделено сверхрешеткам типа HgTe—CdTe. Рассмотрены параметры легированных и композиционных сверхрешеток. Обсуждаются вопросы создания оптоэлектронных приборов на основе полупроводниковых сверхрешеток.

Учебное пособие предназначено для студентов специальностей "Микросистемная техника" (201900) и "Электронные приборы и устройства" (200300). Оно может быть использовано ими при изучении дисциплин "Компоненты микросистемной техники", "Физические основы электронной техники", "Твердотельные приборы и устройства", "Основы микрофотоэлектроники", а также при выполнении курсовых и дипломных проектов. Пособие может быть полезно студентам других специальностей.

Р е ц е н з е н т ы:

М. Л. Ковба (МГУ им. М. В. Ломоносова),
К. Б. Поярков (МИЭТ)

CONTENTS

Aseev A. L. Nanomaterials and Nanotechnologies 2

The real position of businesses in the area of nanotechnologies is briefly considered and some results on the development nanomaterials and nanotechnologies in the scientific establishments of Russia are stated.

Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Kulchitsky N. A., Kulchitsky A. N., Melnikov A. A. The analysis of Threshold Characteristics GeSi/Si Heterojunction Detectors with the Internal Photoemission in a Spectral Range 8–12 11

The questions of creation of infra-red detectors on epitaxial heterostructures $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ are considered. The analysis of formulas for calculation of threshold characteristics GeSi/Si heterojunction detectors with the internal photoemission in a spectral range 8–12 micron is carried out.

Sharov V. B., Sheshin E. P., Schuka A. A. Graphite Field Emission Cathodes for the Diode Light Sources 17

The new technological method of the effective light source producing is represented at this article. The field emission cathode is based on the constructional graphite. The obtained results confirm the big potential of such technology. It must be applied to create different types of the cathodoluminescent devices including the flat panel displays.

Myatiev A. A., Diachenko N. I., Pomadchik A. L., Straumal P. B., Prohorenkov D. V. Synthesis of $\text{Ce}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_y$ Nanocrystalline Material 19

Results of x-ray analysis $\text{Ce}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_y$ powders, where $x = 0.3-0.55$ are presented. The powders were produced by pyrolysis

at 500 °C of mixture of cerium and bismuth carboxylates, and annealed at 700 °C, 800 °C and 1000 °C. Powders consists mainly of cubic phase, formed either at high, or at low temperatures, that differs by lattice parameter. Crystal size of cubic phase is 10 nm at 700 °C and 40 nm and 1000 °C.

Kupryashkin A. S., Sheshin E. P., Schuka A. A. Methods of the Field Emission Cathodes Producing from Carbon Materials 26

The classification of the main modern methods of field emission cathodes producing from two big classes of carbon material are represented at this article. The first class of carbon material is the materials of the industrial production. The second type of the carbon materials is the carbon nanostructured produced directly on the surface. Furthermore the some features of the cathodes producing methods are described at the article.

Bocharov L. Yu. The Analysis Future Trends in Micro-AUV (Autonomous Underwater Vehicle) Development 32

Classification of the types unmanned underwater vehicles (UUV) presented. The most important trends in research and development AUV surveyed. Our review of micro-AUV capabilities confirmed the potential of the technology in some important areas.

Birukov V. I., Pankov V. V. The Multidot Block for Measurement Pressure Difference 40

The design of the multidot block of sensitive elements of pressure is considered, results of research of temperature characteristics of the block are shown, comparison of measuring characteristics with its analogues is given.

For foreign subscribers:

Joint-stock company MK-Periodica. E-mail: info@periodicals.ru Tel.: +7(095) 284-5008. Fax: +7(095) 681-3798

The journal bought since november 1999.

Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev

ISSN 1684-6419.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(095) 269-5510.

E-mail: it@novtex.ru; http://www.microsystems.ru

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4/1. Телефон редакции журнала **(095) 269-5510**. E-mail: it@novtex.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т.Н. Погорелова. Технический редактор И.С. Павлова. Корректор Р. А. Чодарова

Сдано в набор 29.12.2004. Подписано в печать 07.02.2005. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,03. Заказ 322. Цена договорная

Отпечатано в Подольской типографии — филиал ОАО "ЧПК", 142110, г. Подольск, ул. Кирова, 15