№ 3(140) **♦** 2012

Излается с 1999 г.

2

9

25

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России и в систему Российского индекса научного цитирования

Главный редактор Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора Лучинин В. В.

Редакционный совет:

Аристов В. В. Асеев А. Л. Волчихин В. И. Гапонов С. В. Захаревич В. Г. Каляев И. А. Квардаков В. В. Климов Д. М. Ковальчук М. В. Нарайкин О. С. Никитов С. А. Сауров А. Н. Серебряников С. В. Сигов А. С. Стриханов М. Н. Чаплыгин Ю. А. Шахнов В. А.

Редакционная коллегия:

Шевченко В. Я.

Абрамов И. И. Андриевский Р. А. Антонов Б. И. Арсентьева И. П. Астахов М. В. Быков В. А. Горнев Е. С Градецкий В. Г. Гурович Б. А. Кальнов В. А. Карякин А. А. Колобов Ю. Р. Кузин А. Ю. Мокров Е. А Норенков И. П. Панич А. Е. Панфилов Ю. В. Петросянц К. О. Петрунин В. Φ . Путилов А. В. Пятышев Е. Н. Сухопаров А. И. Телец В. А. Тимошенков С. П. Толvа П. A. Шубарев В. А.

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Григорин-Рябова Е. В. Чугунова А. В.

> Учредитель: Излательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ ____

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

американской программы исследований и разработок в области Агеев О. А., Ильин О. И., Коломийцев А. С., Коноплев Б. Г., Рубашкина М. В., Смирнов В. А., Федотов А. А. Определение геометрических параметров массива вертикально ориентированных углеродных нанотрубок методом атомно-силовой

Ичкитидзе Л. П., Рындина Т. С., Селищев С. В., Пономарева О. В., Табулина Л. В.,

Мальцев П. П., Бочаров Л. Ю. Характеристика состояния и хода реализации

МАТЕРИАЛОВЕЛЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А.,

Шулицкий Б. Г., Галперин В. А., Шаман Ю. П., Благов Е. В. Объемный композитный наноматериал на основе белка и углеродных нанотрубок 13 Мустафаев А. Г., Савинова А. М., Мирзаева П. М. Управление технологическим процессом формирования структур интегральных 20 Раткин Л. С. Современные технологии производства МЭМС. ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Матюшкин И. В. Оценка времени деградации заряда на нанокристаллах Si в 34 Акопьян В. А., Захаров Ю. Н., Панич А. Е., Паринов И. А., Рожков Е. В., Шевцов С. Н. Эффективность пьезоэлектрических генераторов кантилеверного 42

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

Алфимов С. М. Микроробототехника специального назначения: состояние и 49 55

Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайтах журнала (http://novtex.ru/nmst/, http://www.microsystems.ru) и научной электронной библиотеки (http://elibrary.ru). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на сайте журнала: с 1999 г. по 2010 г. в разделе "АРХИВ".

ПОДПИСКА:

по каталогу Роспечати (индекс 79493); по каталогу "Пресса России" (индекс 27849) в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10)

Адрес для переписки: 197076 Москва, Стромынский пер., д. 4 e-mail: nmst@novtex.ru

Чанотехнологии и зондовая микроскопия

УДК 621.38

П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф., директор ИСВЧПЭ РАН, e-mail: iuhfseras2010@yandex.ru, Л. Ю. Бочаров, канд. техн. наук, директор ИПИ РАЕН, e-mail: ipraes@online.stack.net

ХАРАКТЕРИСТИКА СОСТОЯНИЯ И ХОДА РЕАЛИЗАЦИИ АМЕРИКАНСКОЙ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Поступила в редакцию 12.10.2011

Рассматриваются состояние и ход реализации американской программы работ в области нанотехнологий — NNI (National Nanotechnology Initiative — Национальная нанотехнологическая инициатива). Особое внимание уделяется характеристике исследований и разработок программы NNI, проводимых в интересах Министерства обороны США.

Ключевые слова: нанотехнология, приоритетные направления, программа NNI, Министерство обороны США, фундаментальные исследования, стратегический план, программные задачи

Проблемы, относящиеся к развитию нанотехнологий, занимают в настоящее время доминирующее положение практически во всех областях современной науки и техники. Нанотехнология определяется как техника создания, изготовления, характеризации и реализации материалов и функциональных структур и устройств на атомном, молекулярном и нанометровом уровнях.

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 туннельная микроскопия), открытием фуллеренов, развитием геномики и биотехнологий. 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").

Эволюционно-интеграционные процессы в развитии основных областей наук показаны на рис. 1 (см. третью сторону обложки).

По многим прогнозам именно развитие нанотехнологий определит облик XXI века, подобно тому, как открытие атомной энергии, изобретение лазера и транзистора определили облик XX столетия.

Поэтому неслучайно ежегодные мировые объемы инвестиций в нанотехнологии уже исчисляются миллиардами долларов и имеют устойчивую тенденцию к росту.

По данным агентства Venture Analytics мировой объем инвестиций в сферу нанотехнологий в 2003 г. оценивается в ~5,5 млрд долл. Надо отметить, что в отечественной и зарубежной литературе часто приводятся и более высокие цифры -7.5 млрд долл. (за 2003 г.). За период 1976—2003 гг. в области нанотехнологий было зарегистрировано ~85—90 тыс. патентов (из них 64 % — патенты США). Практически весь мировой объем (~90 %) инвестиций в нанотехнологии сконцентрирован в 14 странах: США, Япония, Великобритания, Австралия, Германия, Израиль, Индия, Китай, Канада, Южная Корея, Франция, Финляндия, Сингапур, Тайвань. В большей части этих стран доля государственных расходов на работы по развитию нанонауки и нанотехнологий превышает 50 % от общего объема их финансирования в стране (рис. 2, см. третью сторону обложки).

Ежегодные темпы роста объемов финансирования нанотехнологических работ в мире, по данным Национального научного фонда США (NSF), могут составлять ~25 % в год и утраиваться за три года. Быстрый рост вложений в нанотехнологии обусловлен фактом наличия существенного прогресса этой области исследований и разработок. В интересах планирования НИОКР и прогнозирования развития в 2003 г. NSF фактически интегрировал (естественно, терминологически) области наноматериалов, наноэлектроники, наносистем и МЭМС-изделий. В рамках такого объединения были получены оценки, свидетельствующие о том, что объем американского рынка нанотехнологий к 2015 году достигнет 1 трлн долл. Патентная служба

США (US Patent and Trademark Office) в октябре 2004 г. открыла новый класс — Class 977 — специально для патентов в области нанотехнологий. В соответствии с определением Патентной службы США к нанотехнологическим изделиям относятся устройства с размерами (или одним из габаритных размеров) от 1 до 100 нм и этот размер должен быть существенным для патентуемых функций. Это означает, что даже если некоторые компоненты, например МЭМС-устройства, могут быть отнесены к нанотехнологическим, то в целом МЭМС-устройство может и не соответствовать этим требованиям.

Мировыми лидерами по объемам государственных инвестиций в нанотехнологии являются США и Япония. В этих странах сконцентрировано ~47—49 % мирового объема инвестиций. На рис. 3 (см. четвертую сторону обложки). представлена динамика роста в 1997—2005 гг. мировых объемов государственного финансирования работ в области нанотехнологий.

Надо заметить, что в США давно оценили перспективность государственных вложений в развитие нанотехнологий. Еще в начале девяностых годов прошлого века эта область разработок получила статус государственного приоритетного направления развития науки и техники. Например, еще в 1995 г. в Плане фундаментальных исследований Министерства обороны США работы в области нанонауки были выделены в отдельное приоритетное направление.

В Японии крупномасштабные и долгосрочные нанотехнологические проекты были развернуты в 1992 г.

Государственные расходы на нанонауку и нанотехнологии в 1997 г. составили (в млн долл.): 116 (США, из них 27 % в интересах Министерства обороны), 128 (Япония), 120 (Западная Европа). Как результат таких крупных инвестиций, к началу 2000 г. США заняли лидирующие позиции в области формирования и сборки наноструктур, разделяя с Европой лидерство в создании наноструктурных покрытий и наномасштабной биологии. Япония же достигла первенства в области разработок наномасштабных приборов и наноструктур для материалов повышенной прочности.

Учитывая возрастающую роль нанотехнологий в мировом научно-техническом прогрессе, в 2000 г. конгрессом США была одобрена крупная государственная (межведомственная) программа "Инициатива в области нанотехнологий — National Nanotechnology Initiative" (NNI). Данной государственной программой предусматривалась организация, координация и реализация комплекса исследований и разработок (Research & Development) в области нанотехнологий.

Цели, задачи и направления реализации программы NNI определяются концептуальным документом — Стратегическим планом — National Nanotechnology Initiative Strategic Plan. Первая ре-

дакция этого документа была подготовлена Советом по науке и технологиям при президенте США (National Science and Technology Council (NSTC)) совместно с Управлением по научно-технической политике (Office of Science and Technology Policy (OSTP)) в ноябре 2004 г. [2]. Следующая редакция Стратегического плана появилась в декабре 2007 г. [3]. Очередная, третья редакция этого документа была опубликована в феврале 2011 г. [4].

Стратегическим планом в редакции от февраля 2011 г. определяются следующие важнейшие задачи программы NNI.

Задача № 1. Реализация программы исследований и разработок, опережающих достижения мирового уровня, направленная на максимально полное использование потенциала, имеющегося в области нанотехнологий. В программе NNI выделяют следующие категории проектов исследований и разработок:

- ведомственные исследования и разработки, проводимые по заказам одного заказчика (министерства или агентства);
- межведомственные исследования и разработки, проводимые в рамках сформированной кооперации заказчиков;
- междисциплинарные исследования и разработки, проводимые силами специализированных государственных научно-исследовательских организаций (институтов, центров и лабораторий).

Задача № 2. Содействие эффективному внедрению новых нанотехнологий во все сферы экономики.

Задача № 3. Развитие системы образования в сфере нанотехнологий, подготовка высококвалифицированных кадров и расширение производственной инфраструктуры.

Задача № 4. Поддержка наиболее важных (экономически оправданных) разработок в области нанотехнологий.

Надо отметить, что перечисленные выше задачи программы NNI практически остаются неизменными с момента опубликования первого Стратегического плана (2004 г.).

В рамках установленных программных задач выделено восемь следующих важнейших направлений работ (*Program Component Areas* — PCA).

- 1. Фундаментальные исследования в области нанонауки (наномасштабные явления и процессы). Работы финансируются по статье бюджета "*Basic Research* — Фундаментальные исследования".
- 2. Наноматериалы (полупроводниковые наноструктуры, фотонные кристаллы, магнитные наноструктуры, молекулярные наноструктуры, фуллереноподобные материалы). Работы финансируются в рамках бюджетной статьи "Прикладные исследования и разработки".
- 3. Наноразмерные устройства и приборы (наносистемы и наноэлектроника). Работы финансиру-

| № | Основные направления | Программные задачи NNI | | | | |
|-----|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--|
| PCA | (программные области — РСА) | Задача № 1 | Задача № 2 | Задача № 3 | Задача № 4 | |
| 1 | Фундаментальные исследования в области нанонауки (наномасштабные явления и процессы) | Критическая важность | Вторичная важность | Первичная важность | Вторичная важность | |
| 2 | Наноматериалы (полупроводниковые наноструктуры, фотонные кристаллы, магнитные наноструктуры, молекулярные наноструктуры, фуллереноподобные материалы) | Критическая важность | Вторичная важность | Первичная важность | Вторичная важность | |
| 3 | Наноразмерные устройства и приборы (наносистемы и наноэлектроника) | Первичная важность | Критическая важность | Вторичная важность | Вторичная важность | |
| 4 | Научно-экспериментальная база, метрологическое обеспечение и стандартизация в области нанотехнологий | Вторичная важность | Критическая важность | Вторичная важность | Первичная важность | |
| 5 | Исследования по развитию технологической базы про- изводства наноизделий | Первичная важность | Критическая важность | Первичная важность | Вторичная важность | |
| 6 | Приобретение инструментов, приборов и технологического оборудования (для специализированных государственных научно-исследовательских учреждений) | Вторичная важность | Первичная важность | Критическая важность | Вторичная важность | |
| 7 | Развитие нанотехнологий в интересах решения проблем в области экологии, здравоохранения и безопасности жизнедеятельности | Первичная важность | Вторичная важность | Первичная важность | Критическая важность | |
| 8 | Поддержка образовательных программ в области нанотехнологий и внедрение достижений в интересах решения социальных проблем | Вторичная важность | Вторичная важность | Первичная важность | Критическая важность | |

ются в рамках бюджетных статей "Прикладные исследования" и "Разработки";

- 4. Научно-экспериментальная база, метрологическое обеспечение и стандартизация в области нанотехнологий.
- 5. Исследования по развитию технологической базы производства наноизделий.
- 6. Приобретение инструментов, приборов и технологического оборудования (для специализированных государственных научно-исследовательских учреждений).
- 7. Развитие нанотехнологий в интересах решения проблем в области экологии, здравоохранения и безопасности жизнедеятельности.
- 8. Поддержка образовательных программ в области нанотехнологий и внедрение достижений в интересах решения социальных проблем.

Взаимосвязь между задачами и основными направлениям работ представлена в табл. 1 (матрица приоритетов).

Объемы финансирования работ по условным этапам программы представлены на рис. 4 (два этапа программы: 2001—2004 фин. гг. и 2005—2008 фин. гг.). На первом этапе государственная программа NNI объединяла работы 15 министерств и ведомств (агентств). Из них 10 государственных структур имели целевое бюджетное финансирование на проведение исследований и разработок в рамках NNI.

Примечание: В конце 2003 года Конгрессом и президентом США была одобрена программа финансирования исследований и разработок в области нано-

технологий ("US 21st Century Nanotechnology Research and Development Act") на период 2004—2008 фин. годов. В ней было определено, что Министерство обороны осуществляет финансирование исследований и разработок в области нанонауки и нанотехнологий в рамках своего бюджета НИОКР, а Министерство здравоохранения проводит комплекс работ в рамках отдельной целевой программы (в соответствии с NIH Roadmap).

Общий объем ассигнований, выделенных на реализацию программы NNI в 2001—2004 фин. гг. составил 2848,7 млн долл., из них в интересах Министерства обороны США было израсходовано ~506,8 млн долл. (~18 %). Общий бюджет программы NNI за период 2000—2010 гг. составил более 16 млрд долл.

С момента инициирования программы NNI государственные инвестиции США в развитие нанонауки и нанотехнологии увеличились более чем в 4 раза (с 463,7 млн. долл. в 2001 фин. г. до 1913 млн долл. в 2010 фин. г.). Проектом бюджета США на 2012 фин. г. предусмотрены расходы на эту программу в размере более 2,1 млрд долл.

Распределение объемов финансирования работ в 2011 фин. г. по научно-техническим направлениям (программным областям — PCA) NNI представлено на рис. 5.

Более 70 % от объема ассигнований, выделенных американским правительством в 2011 фин. г. на программу NNI, направлено на получение новых знаний (фундаментальные исследования —

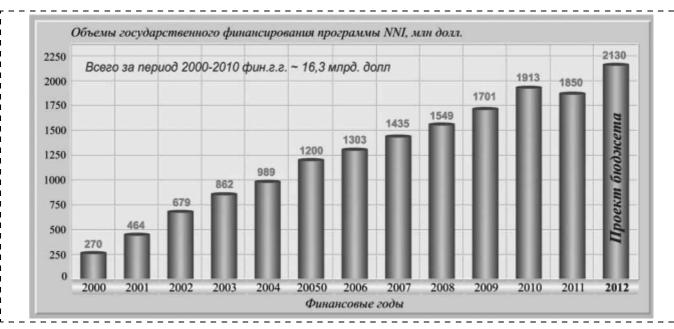


Рис. 4. Объемы финансирования программы NNI



Рис. 5. Распределение бюджетных ассигнований по основным направлениям работ программы NNI (2011 фин. г.)

РСА № 1) и выполнение прикладных исследований и разработок в области наноматериалов, наноэлектроники и наносистем (РСА № 2 и № 3).

Следует заметить, что "Инициатива в области нанотехнологий — NNI" не является самой крупной межведомственной программой исследований и разработок в США. В настоящее время другими приоритетными межведомственными научно-техническими программами США являются (аналогично отечественным федеральным целевым программам в сфере НИОКР) следующие.

1. Национальная программа исследований и разработок в интересах обеспечения лидерства США в мировом инновационном процессе. Эта программа получила название "American Competitiveness Initiative

- (ACI) Инициатива по обеспечению конкурентоспособности США". Основными целями программы АСІ являются:
- расширение спектра фундаментальных исследований на приоритетных направлениях мирового научно-технического прогресса и, прежде всего, в важнейших областях математических и физических наук;
- усовершенствование базовой системы среднего и высшего образования по специальностям в области математических и физических наук;
- формирование гибкой иммиграционной политики в интересах привлечения высококлассных зарубежных ученых и талантливых студентов к проводимым в США исследованиям;

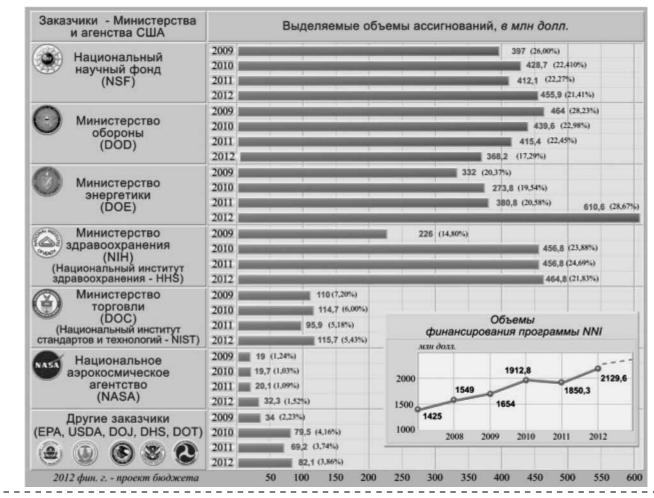


Рис. 7. Распределение объемов финансирования работ в рамках программы NNI по министерствам и ведомствам

- вовлечение новых трудовых ресурсов (из граждан США) в научно-техническую сферу деятельности, формирование высокоэффективного научного потенциала страны;
- модернизация системы налогообложения в целях предоставления налоговых и других привилегий для граждан и организаций, участвующих в реализации национальных проектов НИОКР.

Выполнение программы ACI рассчитано на период до 2016 фин. г. с общим запланированным объемом финансирования в размере 136 млрд долл. Ее участниками (государственными заказчиками — получателями ассигнований на реализацию программы) являются Национальный научный фонд (NSF), Министерство энергетики (Управление научными исследованиями — Office of Science, DOE), Министерство торговли (лаборатории Национального института стандартов и технологий — NIST, DoC). Общий объем ассигнований, выделенных в 2008 фин. г. на реализацию программы ACI, составил 10,207 млрд долл (более чем в 6 раз превысил расходы на программу NNI — 1,549 млрд долл).

2. Программа НИОКР в области информационных технологий и телекоммуникаций (Networking and Information Technology R & D). В 2010 фин. г. на ре-

- ализацию этой программы было выделено 3 927 млн долл. Основными ее участниками являются: Министерство обороны США, Национальный научный фонд (NSF), Министерство здравоохранения (HHS), Министерство энергетики, Министерство торговли и Национальное аэрокосмическое агентство (NASA).
- 3. Программа научных исследований изменений климата (Climate Change Science Program (CCSP)). В 2010 фин. г. на реализацию этой программы было выделено 2 026 млн долл.

На рис. 6 (см. четвертую сторону обложки) представлены объемы финансирования крупных национальных межведомственных программ НИОКР США в 2010 фин. г.

В настоящее время в реализации программных задач принимают участие 25 министерств и федеральных агентств. В 2011 фин. г. основными государственными заказчиками в рамках программы NNI [5] являлись (рис. 7) следующие организации:

1) Национальный научный фонд (*National Science Foundation* — NSF), в 2011 фин. г. бюджет НИОКР в области нанонауки и нанотехнологий составил ~412,1 млн долл.;

| | Научно-технические направления | Финансовые годы | | | | |
|---|---|-----------------|-------|-------|-------|--------|
| | (программные области — РСА) | | 2010 | 2011 | 2012 | Итого |
| 1 | Фундаментальные исследования в области нанонауки (наномасштабные явления и процессы) | | 138,0 | 180,1 | 162,8 | 708,7 |
| 2 | Наноматериалы (полупроводниковые наноструктуры, фотонные кристаллы, магнитные наноструктуры, молекулярные наноструктуры, фуллереноподобные материалы) | 55,2 | 59,1 | 31,5 | 24,1 | 169,9 |
| 3 | Наноразмерные устройства и приборы (ноносистемы и наноэлектроника) | | 168,5 | 145,3 | 132,6 | 554,1 |
| 4 | Научно-экспериментальная база, метрологическое обеспечение и стандартизация в области нанотехнологий | 3,6 | 6,6 | 2,4 | 2,1 | 14,7 |
| 5 | Исследования по развитию технологической базы производства наноизделий | | 26,4 | 27,7 | 20,3 | 87,2 |
| 6 | Приобретение инструментов, приборов и технологического оборудования (для специализированных государственных научно-исследовательских учреждений) | 22,1 | 35,6 | 25,7 | 16,4 | 99,8 |
| 7 | Развитие нанотехнологий в интересах решения проблем в области экологии, здравоохранения и безопасности жизнедеятельности | 1,8 | _ | _ | _ | 1,8 |
| 8 | Поддержка образовательных программ в области нанотехнологий и внедрение достижений в интересах решения социальных проблем | _ | 5,4 | 2,8 | 10,0 | 18,2 |
| | Итого | 431 | 439,6 | 415,5 | 368,3 | 1654,4 |

- 2) Министерство обороны (*Department of Defense* DOD), в 2011 фин. г. военному ведомству США на реализацию программных задач в рамках NNI было запланировано выделить 415,4 млн долл. (бюджетные категории работ: фундаментальные исследования (6.1), прикладные исследования (6.2) и технологические разработки (6.3));
- 3) Министерство энергетики (*Department of Energy* DOE), в 2011 фин. году бюджет НИОКР в рамках NNI определен в размере 380,8 млн долл.;
- 4) Министерство здравоохранения (*Department of Health and Human Services*), наибольший объем работ координирует и заказывает Национальный институт здравоохранения (*National Institutes* of Health NIH) в рамках отраслевой программы. В 2011 фин. г. бюджетом было предусмотрено выделение Министерству здравоохранения на проведение работ в области нанонауки и нанотехнологий ~456,8 млн долл.;
- 5) Министерство торговли (*Department of Commerce*), работы координирует и заказывает Национальный институт стандартов и технологий (*National Institute of Standards and Technology* NIST), в 2011 фин. г. в рамках программы NNI этому министерству было предусмотрено выделить ~95,9 млн долл.;
- 6) Национальное аэрокосмическое агентство (*National Aeronautics and Space Administration* NASA), бюджет NASA на проведение работ в рам-ках программы NNI в 2011 фин. г. был определен в размере ~20,1 млн долл.

Ежегодная доля ассигнований, выделяемых Министерству обороны США, составляет ~31—32 % от

общего объема государственных инвестиций в программу NNI. Из них ~95—96 % средств направляется на проведение исследований и разработок в рамках научно-технических направлений PCA № 1, 2, 3. Распределение по научно-техническим направлениям (программным областям) работ военного ведомства США представлено в табл. 2 (в млн долл.).

В Министерстве обороны США заказчиками исследований (фундаментальных и прикладных) и технологических разработок (ТР) в области нанонауки и нанотехнологий являются армия США, ВМС США, ВВС США, Управление перспективных исследований и разработок Министерства обороны США (DARPA).

Надо отметить, что в США принято различать понятия "нанонаука" (Nanoscience) и "нанотехнология" (Nanotechnology) [1]. Нанонаука, объединяя в себе наноэлектронику, наномеханику, наноматериалы и основываясь на достижениях в различных областях естественных наук (прежде всего в таких областях, как физика, химия, биология, математика и информатика), обеспечивает появление и развитие нанотехнологий. Государственное финансирование исследований в области нанонауки осуществляется в рамках бюджетной категории "фундаментальные исследования" (Basic Research, для Министерства обороны США — бюджетная статья 6.1). В настоящее время доля фундаментальных исследований (РСА № 1) в общем объеме средств, выделяемых военному ведомству США на проведение работ в области нанотехнологий (РСА № 1, 2, 3, 4, 5), составляет ~47 % (в рамках программы NNI доля фундаментальных исследований — PCA № 1составляет ~28 %).

Надо отметить, что общий запланированный объем финансирования программ фундаментальных, прикладных исследований и технологических разработок Министерства обороны США в 2011 фин. г. был предусмотрен в размере ~11,8 млрд долл (~15,5 % от всех средств на НИОКР), из них на проведение фундаментальных исследований — ~2,0 млрд долл.

К числу приоритетных направлений фундаментальных исследований, проводимых в интересах Министерства обороны США в рамках программы NNI, относятся:

- 1) наноразмерные машины и движительные устройства;
- 2) молекулярное управление процессами формирования наноэлектронных и наномагнитных структур; молекулярные ансамбли (molecular assemblies, selfaggregated systems), единичные молекулы "функциональные" молекулы (smart molecules), наноразмерные молекулярные стержни и проволоки (molecular rods and wires));
- 3) наноматериалы и наноконструкции для источников энергии (наноразмерные конструктивные элементы для электрохимических генераторов);
- 4) методы оценки свойств и характеристик наноразмерных элементов, устройств и систем (методы комплексного диагностирования свойств наноструктур);
- 5) научные основы технологий производства и применения углеродных нанотрубок (УНТ);
- 6) наноразмерные электронные устройства и архитектура их построения;
- 7) структуры с туннельно-прозрачными барьерами (транзисторы с резонансным туннелированием электронов и сверхрешетки), квантовые проволоки; процессы формирования гетероструктур для элементной базы наноэлектроники;
- 8) наноэлектромеханические системы (НЭМС) для измерителей параметров движения, систем предохранения и взведения боеприпасов, взрыватели;
- 9) деформация, повреждения и разрушения в наноструктурах (нанотрубках, нанопластинах и нановолокнах);
- 10) наноструктуры катализаторы химических реакций;
- 11) полимерные нанокомпозиты (высокотемпературные и высокопрочные) для летательных аппаратов;
- 12) органические материалы для наноразмерной электроники и оптоэлектроники;
- 13) квантовые вычисления и устройства, реализующие механизмы квантовых вычислений (раздел: квантовые информационные технологии). В настоящее время Министерством обороны США реализуется уже третья программа в области квантовых информационных технологий;

- 14) биомолекулярные системы (преобразователи сигналов, чувствительные элементы датчиков);
- 15) синтез и модификация наноструктурных поверхностей;
- 16) магнитные наноструктуры и наночастицы в интересах их применения в биотехнологиях и медицине.

К числу наиболее общих результатов анализа хода выполнения программы NNI можно отнести следующие.

- 1. В рамках программ фундаментальных исследований создано активное междисциплинарное взаимодействие между различными областями знаний. Объем средств, выделяемых на проведение в рамках программы NNI фундаментальных исследований, остается стабильным на протяжении десятилетнего периода и колеблется в пределах 22—28 % от общего ежегодного объема ассигнований. Масштабы вложений в нанонауку привлекли внимание талантливой молодежи. Активное участие в организации и проведении фундаментальных исследований в рамках программы NNI принимает военное ведомство США. На эти работы бюджетом программы NNI на 2011 фин. г. Министерству обороны США было запланировано выделить ~180,1 млн долл. (более 1/3 от общих средств на РСА № 1). Надо заметить, что американские специалисты давно оценили перспективность применения нанотехнологий в военной технике. Еще в 1995 г. в Плане фундаментальных исследований Министерства обороны США междисциплинарные работы в области нанонауки были выделены в отдельное приоритетное направление.
- 2. За последние 10 лет открыто более 70 академических и управленческих специализированных центров, располагающихся по всей территории США.
- 3. К реализации программных мероприятий NNI привлечены крупные инвесторы и маркетинговые группы.
- 4. Обеспечены условия для создания малых компаний, специализирующихся на внедрении достижений, полученных в ходе проведения исследований и разработок.
- 5. Число американских публикаций и патентов в области нанонауки и нанотехнологий с каждым годом стало возрастать в среднем на 19 % (на \sim 17 % количество публикаций и на \sim 30 % число патентов).
- 6. Основными из сдерживающих факторов широкомасштабного внедрения в США, например наноматериалов, на сегодняшний день являются:
- существующая неопределенность в стабильности свойств наноматериалов (долговечность, стойкость к воздействию радиации, температуры и т. п.) в конкретных условиях эксплуатации;
- слабая изученность вопросов токсичности наноматериалов;
- отсутствие нормативов и регламентов, регулирующих порядок применения наноматериалов и их утилизацию.

В заключение следует отметить, что 25 министерств и федеральных агентств США принимают участие в реализации программных задач NNI в условиях отсутствия единого координирующего и контролирующего органа. Такой подход, на наш взгляд, способствует, с одной стороны, усилению межведомственного взаимодействия в ходе решения программных задач, с другой стороны, по целому ряду направлений создает конкурентную среду в области эффективного расходования бюджетных ассигнований (конкуренция на уровне научно-технических достижений и объемов финансовых затрат на их получение).

Список литературы

- 1. **Basic research Plan**, Department of Defense, Director of Defense Research and Engineering. 1996. February. 197 p.
- 2. **The National** nanotechnology initiative Strategic Plan. National Science and Technology Council. 2004. December. 48 p.
- 3. **The National** nanotechnology initiative Strategic Plan. National Science and Technology Council. Engineering, and Technology. 2007. December. 52 p.
- 4. **The National** nanotechnology initiative Strategic Plan. National Science and Technology Council. Engineering, and Technology. 2011. February. 60 p.
- 5. **The National** nanotechnology initiative. Research and Development Leading to a Revolution in Technology and Industry, Supplement to the President's 2012 Budget. National Science and Technology Council. 2011. February. 56 p.

УДК 621.38-022.532

- О. А. Агеев, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,
- О. И. Ильин, инженер,
- А. С. Коломийцев, канд. техн. наук, ассистент,
- Б. Г. Коноплев, д-р техн. наук, проф., декан,
- М. В. Рубашкина, инженер,
- В. А. Смирнов, канд. техн. наук, доц.,
- А. А. Федотов, канд. техн. наук, доц.,

Технологический институт Южного федерального университета, г. Таганрог

e-mail: ttismirnov@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАССИВА ВЕРТИКАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Поступила в редакцию 08.11.2011

Представлены результаты экспериментальных исследований геометрических параметров углеродных нанотрубок и плотности массива вертикально ориентированных углеродных нанотрубок (ВОУНТ) в контактном, полуконтактном и бесконтактном режимах атомно-силовой микроскопии (АСМ). Разработана экспресс-методика определения высоты массива ВОУНТ методом АСМ, с использованием которой определены значения максимальной и средней высоты нанотрубок в экспериментальном образце массива ВОУНТ, которые составили 1,98 мкм и $1,12 \pm 0,45$ мкм соответственно. В бесконтактном режиме ACM определена плотность нанотрубок в экспериментальном образце массива ВОУНТ, равная 31 мкм Полученные результаты могут быть использованы при разработке методов нанодиагностики, а также технологических процессов формирования элементов микро- и наноэлектроники на основе ВОУНТ.

Ключевые слова: нанодиагностика, атомно-силовая микроскопия, растровая электронная микроскопия, вертикально ориентированные углеродные нанотрубки, геометрические параметры углеродных нанотрубок, режимы сканирования АСМ

Введение

Углеродные нанотрубки (УНТ) относятся к перспективному классу наноматериалов, уникальные электрические, химические и механические свойства которых могут активно использоваться при разработке и создании новых устройств нано- и микроэлектроники, а также нано- и микросистемной техники [1]. Эмиттерные структуры на основе вертикально ориентированных УНТ (ВОУНТ) обладают низким пороговым электрическим полем, высокой удельной плотностью эмиссионного тока и хорошей стабильностью, что делает их привлекательными для применения в различных устройствах (газочувствительных сенсорах, дисплеях и др.) [2, 3]. Однако для применения массивов вертикально ориентированных углеродных нанотрубок в качестве элементной базы современной электроники необходимо проведение исследований по разработке экспрессметодов их диагностики.

Для разработки и формирования элементов на основе ВОУНТ с заданными характеристиками необходимо учитывать следующие параметры: структуру углеродных нанотрубок, ориентацию и аспектное соотношение, а также плотность и однородность ВОУНТ в массиве [2].

Исследования массива ВОУНТ методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) позволяют получить только качественные оценки его параметров, но не дают возможности статистической обработки измеряемых параметров и определения их количественного значения.

Одним из перспективных методов исследования наноразмерных структур является метод атомно-силовой микроскопии (АСМ), который позволяет без специальной пробоподготовки определять параметры поверхности подложки, а также проводить ее модификацию методами зондовой нанолитографии. Поэтому актуальной задачей нанодиагностики является разработка методики определения геометрических параметров ВОУНТ и плотности их распределения в массиве методом АСМ.

Основной трудностью при исследовании массива ВОУНТ методом ACM является развитая повер-

хность массива ВОУНТ и подвижность нанотрубок при их взаимодействии с острием кантилевера. Кроме того, при высокой плотности углеродных нанотрубок в массиве глубина проникновения острия кантилевера между отдельными трубками ограничена параметрами самого зонда (радиусом закругления и аспектным соотношением сторон острия), что может приводить к отображению на АСМ-изображениях не индивидуальных нанотрубок в массиве, а их пучков [4].

Целью работы является разработка методики определения геометрических параметров ВОУНТ методом атомно-силовой микроскопии, а также исследование влияния различных режимов сканирования ACM на достоверность полученных результатов.

Методика эксперимента

Массив ВОУНТ нанотрубок был выращен с использованием многофункционального нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 (производитель — ЗАО "Нанотехнология-МДТ", Россия) методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD) [5]. В экспериментах использовали подложки кремния, на поверхности которых формировалась двухслойная структура, состоящая из пленки ванадия толщиной 20 нм и пленки никеля толщиной 10 нм. В качестве реакционного газа использовали ацетилен. Более подробно режимы выращивания ВОУНТ описаны в работе [5].

Исследование поверхности полученного массива ВОУНТ проводили с помощью растрового электронного микроскопа Nova NanoLab 600 (FEI Company, Нидерланды), результаты которого представлены на рис. 1. Анализ полученных РЭМ-изображений показал, что выращенные ВОУНТ имели эффективный диаметр около 70 нм, эффективную высоту около 2 мкм и плотность нанотрубок в массиве около 30 мкм⁻². Вертикально ориентированные углеродные нанотрубки росли преимущественно по вершинному механизму.

Более детально исследования поверхности массива ВОУНТ проводили с использованием Зондовой нанолаборатории Ntegra [6] в контактном, полуконтактном и бесконтактном режимах ACM. Зондом служил кремниевый кантилевер марки NSG 20 [6]. Для обработки экспериментальных данных использовался пакет прикладных программ ImageAnalysis 3.5 [6].

Результаты и их обсуждение

Анализ полученных в контактном режиме ACM-изображений показал, что в процессе сканирования поверхности массива BOУНТ зонд "отрывал" углеродные нанотрубки от поверхности подложки, при этом иногда разрыв происходил на высоте 40...160 нм от основания трубки (рис. 2). Таким образом, контактный режим ACM не может быть использован для диагностики и определения геометрических параметров BOУНТ.

В результате исследования поверхности массива ВОУНТ в полуконтактном режиме АСМ были получены АСМ-изображения, представленные на

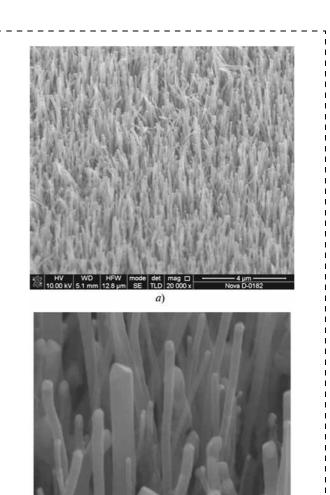


Рис. 1. РЭМ-изображения поверхности массива вертикально ориентированных углеродных нанотрубок с различным увеличением: $a-50~000^{\circ};~\delta-160~000^{\circ}$

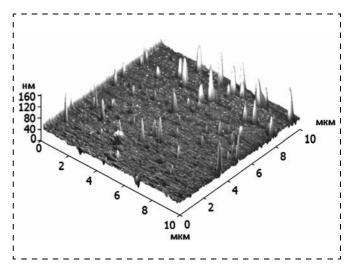


Рис. 2. ACM-изображение поверхности массива вертикально ориентированных УНТ, полученное в контактном режиме ACM

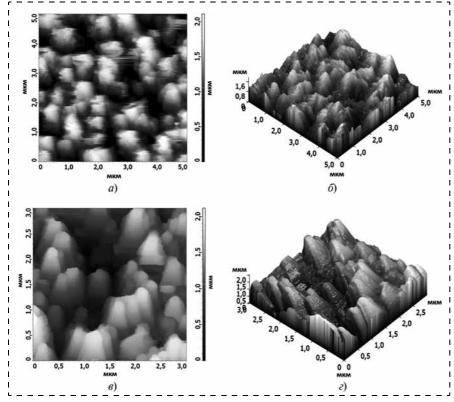


Рис. 3. ACM-изобржения поверхности массива BOУHT, полученные: в полуконтактном режиме ACM (a, δ) и в бесконтактном режиме ACM (s, ϵ)

рис. 3, a, δ , анализ которых показал, что при воздействии зонда происходит объединение отдельных УНТ в пучки. Статистическая обработка данных АСМ-изображений позволила определить среднюю высоту пучка ВОУНТ, которая составила 1.03 ± 0.31 мкм, максимальную высоту, равную 2.29 мкм, а также плотность пучков ВОУНТ в массиве около 1.49 мкм $^{-2}$.

Основным недостатком АСМ-изображений массива ВОУНТ, полученных в полуконтактном режиме, является наличие множества артефактов сканирования, вызванных высокой подвижностью

нанотрубок при механическом контакте с зондом и, как следствие, относительно низкая разрешающая способность данного режима ACM (рис. 3, a).

Использование бесконтактного режима сканирования АСМ, при котором зонд взаимодействует с поверхностью массива только за счет Ван-дер-Ваальсовых сил [7], позволил получить АСМ-изображения пучков вертикально ориентированных УНТ с более высоким пространственным разрешением, без явных артефактов (рис. 3, в). Статистическая обработка АСМ-изображений показала, что максимальная высота пучка составила 2,52 мкм, средняя высота равна $1,27 \pm 0,35$ мкм, а плотность отдельных пучков ВОУНТ в массиве составила около $1,68 \text{ мкм}^{-2}$.

При исследовании массива ВО-УНТ в бесконтактном режиме АСМ отдельные нанотрубки также объединялись в пучки диаметром около 300 нм (рис. 3, в, г). При сканировании в бесконтактном режиме АСМ механическое воздействие зонда на массив ВОУНТ отсутствует, так как причиной, вызывающей "слипание"

индивидуальных трубок в пучки, может быть влияние Ван-дер-Ваальсовых сил [8].

Анализ АСМ-изображений отдельных пучков ВОУНТ в бесконтактном режиме (рис. 4) позволил оценить диаметр нанотрубок в массиве ВОУНТ, который составил 76 нм, что дает возможность говорить о многослойной структуре УНТ. Средняя площадь отдельного пучка ВОУНТ составила около $0,33\,$ мкм². Число индивидуальных нанотрубок со средним диаметром 76 нм в пучке составило около 18, а плотность ВОУНТ в массиве составляет около $30\,$ мкм $^{-2}$.

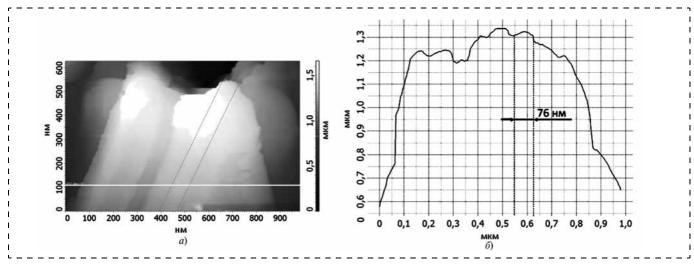


Рис. 4. АСМ-изображение пучка вертикально ориентированных УНТ, полученное в бесконтактном режиме АСМ: a — топология поверхности; δ — профилограмма вдоль линии

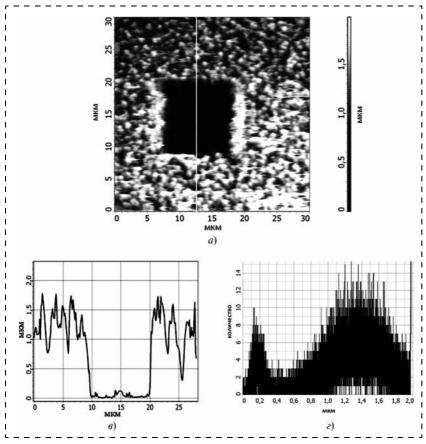


Рис. 5. АСМ-изображение массива ВОУНТ, полученное по разработанной методике: a — топология поверхности; δ — профилограмма вдоль линии; ϵ — гистограмма распределения ВОУНТ по высоте

Таким образом, установлено, что для исследования поверхности и определения геометрических параметров вертикально ориентированных УНТ оптимальным режимом сканирования является бесконтактный режим АСМ, который позволяет получать АСМ-изображения массива ВОУНТ с более высокой разрешающей способностью без разрушения структуры УНТ. Результаты, полученные методом АСМ в бесконтактном режиме, хорошо коррелируют со значениями геометрических параметров ВОУНТ, определенных методом растровой электронной микроскопии.

С использованием полученных результатов была разработана экспресс-методика измерения высоты массива ВОУНТ, основанная на последовательном сканировании в контактном, а затем в полуконтактном или бесконтактном режимах поверхности массива ВОУНТ с разной площадью. В данной

работе сканировались области массива ВОУНТ площадью 10×10 мкм, а затем 30×30 мкм (рис. 5). Анализ профилограммы границы областей сканирования и гистограммы распределения ВОУНТ в массиве (рис. 5, δ , ϵ) позволил определить максимальную высоту ВОУНТ, которая составила 1,98 мкм и среднюю высоту нанотрубок в массиве ВОУНТ, равную 1,12 \pm 0,45 мкм.

Разработанная экспресс-методика измерения высоты ВОУНТ в массиве позволяет с более высокой достоверностью, чем полуконтактный или бесконтактный режим АСМ, определять значение высоты ВОУНТ, так как измерение данного параметра проводится относительно поверхности подложки, а не наибольшей глубины проникновения зонда АСМ в массив.

Сравнительный анализ параметров массива ВОУНТ, определенных полуконтактным, бесконтактным режимами АСМ и на основе разработанной экспресс-методики, представлен в таблице.

Заключение

В результате работы проведены исследования массивов ВОУНТ ме-

тодом АСМ в различных режимах. Разработана экспресс-методика измерения высоты ВОУНТ в массиве на основе последовательного сканирования в контактном и полуконтактном (бесконтактном) режимах АСМ поверхности массива ВОУНТ с разной площадью. Данная экспресс-методика позволяет с более высокой степенью достоверности, чем методики на основе РЭМ, определять значения геометрических параметров нанотрубок в массиве ВОУНТ за счет возможности получения статистического набора данных и его последующей обработки.

Методом АСМ в бесконтактном режиме определены следующие характеристики: максимальная и средняя высота, диаметр ВОУНТ, плотность ВОУНТ в массиве. Полученные значения позволяют определить аспектное соотношение ВОУНТ.

Геометрические параметры массива ВОУНТ, полученные при различных режимах сканирования методом АСМ и методом РЭМ

| Режим сканирования АСМ | Максимальная высота ВОУНТ, мкм | Средняя высота ВОУНТ, мкм | Диаметр ВОУНТ, нм | Аспектное соотношение ВОУНТ | Плотность пучков ВОУНТ в массиве, мкм ⁻² | Плотность ВОУНТ в массиве, мкм ⁻² |
|--|--------------------------------------|---|----------------------|-----------------------------------|---|---|
| Полуконтактный Бесконтактный По разработанной методике РЭМ | 2,29 2,52 1,98 2,00 | $1,03 \pm 0,31$ $1,27 \pm 0,35$ $1,12 \pm 0,45$ | 76 - 70 | 33:1 - 29:1 | 1,49 1,68 — — | 27 31 — 30 |

Таким образом, установлено, что метод АСМ позволяет получить достаточно большой объем данных о массиве ВОУНТ. Данный метод не требует специальной пробоподготовки образца, а бесконтактный режим АСМ позволяет исследовать массив ВОУНТ без разрушения его структуры в процессе сканирования.

Полученные результаты могут быть использованы для развития методов нанодиагностики, а также при создании и разработке элементов вакуумной микроэлектроники на основе ВОУНТ.

Список литературы

1. Bhushan B. Springer Handbook of Nanotechnology. 3rd edition, 2010. 1964 p.

2. Shakir M. I., Nadeem M., Shahid S. A., Mohamed N. M.

2. Shakir M. I., Nadeem M., Shahid S. A., Mohamed N. M. Carbon nanotube electric field emitters and applications // Nanotechnology. 2006. № 17. P. 41—56.

3. Bell M. S., Teo K. B. K., Milne W. I. Factors determining properties of multi-walled carbon nanotubes/fibres deposited by PECVD // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. № 40. P. 2285—2292.

4. Bhushan B. Scanning probe microscopy in nanoscience and nanotechnology // Springer. 2011. V. 2. 816 p.

5. Areeb O. A., Ильин О. И., Климин В. С., Коноплев Б. Г., Федотов А. А. Исследование режимов формирования каталитических центров. для выращивания ориентированных

литических центров для выращивания ориентированных массивов углеродных нанотрубок методом PECVD // Химическая физика и мезоскопия. 2011. № 2. Т. 13. С. 226—231. 6. Официальный сайт ЗАО "Нанотехнология-МДТ"

http://www.ntmdt.ru
7. Поляков В. В., Смирнов В. А., Рубашкина М. В. Исследование параметров биологических объектов методом атомно-силовой микроскопии // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 4. С. 193—198.

8. Liu L., Cao G., Chen X. Mechanisms of nanoindentation

on multiwalled carbon nanotube and nanotube cluster // Journal of Nanomaterials. Article ID 271763. Vol. 2008. 12 p.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ и технологические основы МНСТ

УДК 29.33.47:531.7:54-148

Л. П. Ичкитидзе^{1*}, канд. физ.-мат. наук, доц., ст. науч. сотр., **Т. С. Рындина**¹, студент, **С. В. Селищев**¹, д-р физ.-мат. наук, зав. каф.,

О. В. Пономарева², директор, **Л. В. Табулина**³, канд. хим. наук, ст. науч. сотр., **Б. Г. Шулицкий**³, ст. науч. сотр.,

В. А. Галперин⁴, канд. техн. наук, нач. лаб., **Ю. П. Шаман**⁴, мл. науч. сотр.,

Е. В. Благов⁵, д-р физ.-мат. наук, зам. дир-ра ¹Национальный исследовательский университет (ТЕИМ)

Научно-производственная фирма "ДЕЛТАРУС" ³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР) НПК "Технологический центр" МИЭТ, Москва ⁵Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН (ИНМЭ), Москва

*эл.-почта: leo852@inbox.ru

ОБЪЕМНЫЙ КОМПОЗИТНЫЙ НАНОМАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ **ΕΕΛΚΑ Μ ΥΓΛΕΡΟΔΗЫΧ НАНОТРУБОК**

Поступила в редакцию 13.09.2011

Исследованы свойства биосовместимых композиционных наноматериалов (КНМ) на основе бычьего сывороточного альбумина (БСА) и многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ), представляющих собой функционализированные $(MYHT_{th})$ и нефункционализированные MУНТ. При изготовлений объемных КНМ из 25 мас. %

водных суспензий БСА с (0,0015-0,04) мас. % МУНТ_ф и МУНТ использовался метод лазерной нанотехнологии. Оптическая плотность и коэффициент поглощения ультрадисперсионных водных суспензий $ECA + MYHT_{db}$ были в 5-10 раз выше соответствующих параметров суспензий на основе $\mathit{ECA} + \mathit{MYHT}$. Значение твердости H_{ν} КНМ с МУНТ $_{\phi}$ было $^{\sim}$ 250 МПа, а в случае КНМ с МУНТ $H_{\nu} \approx$ 300 МПа, что в 5—6 раз выше, чем у контрольных образцов из чистого БСА и композиционного материала БСА + сажа K-354 ($H_{\nu} \approx 45...50$ МПа). Прочность на разрыв КНМ ($\sigma \approx 30$ МПа) была на порядок ниже, чем их твердость. Максимальные значения удельной твердости $H_{\rm V}/\rho \approx 0,24~{\rm M\Pi a}/(\kappa \epsilon/{\rm M}^3)$ и удельной прочности $\sigma/\rho \approx 0.024$ МПа/(кг/м³) для КНМ практически совпадали с соответствующими значениями для человеческой пористой костной ткани.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, функционализация, альбумин, суспензия, твердость, прочность, биосовместимый нанокомпозиционный материал

Введение

Высокие значения механических параметров типичны для углеродных нанотрубок (УНТ), например, для однослойных УНТ (ОУНТ) модуль Юнга $E \approx 5$ ТПа [1], что на несколько порядков выше, чем для высокопрочной стали. Подобная же ситуация реализуется в многослойных МУНТ, кроме того, при их введении в различные композиционные материалы (полимеры, керамики и т. п.), даже при весьма малой концентрации нанотрубок $C \approx 0.1$ мас. % наблюдается значительное улучшение механических свойств объектов. За счет небольших добавок УНТ удалось улучшить также термические, электрические и другие параметры таких материалов, что служит одной из причин повышенного интереса к широкому применению УНТ в современной технике, в частности в медицинской практике [2—4]. Так, здесь в течение последних 20 лет используются заполняющие материалы имлантататов костной ткани на основе искусственного гидроксиапатита (ГАП), которые, однако, значительно уступают по механическим (твердость, прочность и др.), физическим (пористость, тепло- и электропроводность и др.), химическим (инертность, толерантность к другим материалам) и биологическим (биорезорбции и регенерации биотканей) параметрам, присущим натуральной костной ткани, даже при добавлении в ГАП УНТ и введении в них карбонных групп [5—11].

Применение УНТ в качестве добавок улучшало свойства и других биологических материалов. Так, при исследовании "доза-эффекта", т. е. зависимости механических свойств пленки нанокомпозита из пластифицированного крахмала и МУНТ от концентрации нанотрубок, было обнаружено двукратное увеличение σ и *E* при $C \approx 3$ мас. %. Достигнутые максимальные значения $\sigma \approx 5$ МПа и $E \approx 40$ МПа все же были существенно (на несколько порядков) ниже соответствующих параметров человеческой костной ткани (
 $\sigma \approx 150$ МПа, $E \approx 15$ ГПа, $H_{\rm v} \approx 500$ МПа). Авторы работ [12, 13] наблюдали "доза-эффект" для материала на основе хитосана с МУНТ (СНІ + + МУНТ). В этом случае имело место: C = 2 масс. %, $\sigma \approx 70 \text{ M}\Pi \text{a}, H_{\text{v}} \approx 150 \text{ M}\Pi \text{a}$ и $E \approx 2 \text{ }\Gamma\Pi \text{a}$ [12], что также заметно ниже параметров человеческой костной ткани.

Всякого рода наночастицы и наноструктуры, в том числе УНТ, характеризуются высоким риском преобразования молекул ДНК в потенциальные мутагены [14]. Основными причинами повреждающего действия УНТ являются индукция активных форм кислорода и окисление биологических молекул [15]. Предлагаемые к продаже образцы УНТ содержат значительное количество примесей металлов и различных форм углерода, влияющих на их свойства и токсикологическую активность. Например, в работе [16] приведены данные исследований ОУНТ, выпускаемых производителями США. Оказалось, что кроме основных примесей, связанных с применением при синтезе металловкатализаторов (часто Ni), в конечном продукте обнаруживаются токсичные примеси элементов Сг, Рь, Си, Со, появление которых, по-видимому, связано с составом применяемого производственного оборудования. Содержание Ni в материале может доходить до 20 %. Поэтому выводы о токсичности УНТ могут оказаться недостоверными без строгого определения влияния присутствующих в них примесей [17]. Очевидно, что при биологическом использовании материалов следует отдавать преимущество "зеленому" производству УНТ, в котором не используются Ni или другие потенциально опасные металлические катализаторы [18].

Из анализа многочисленных исследовательских работ относительно риска и безопасности УНТ, а также наноматериалов и продуктов на их основе, следуют важные выводы:

- токсичность УНТ зависит от степени их очистки от различных примесей, в том числе каталитических металлов;
- токсичность ОУНТ больше, чем у МУНТ;
- токсическое проявление ОУНТ меньше, чем токсичность такой же дозы частиц асбеста, введенных под кожу опытных животных (мышей);
- функционализированные УНТ значительно менее токсичны, чем нефункционализированные [19—26].

Согласно последнему выводу, очевидно, что предпочтение следует отдавать функционализированным УНТ при создании на их основе наноматериалов для биомедицинских приложений. Такой подход применялся в работах [27—32] при получении композиционных материалов на основе бычьего сывороточного альбумина (БСА) для матрицы и добавок из МУНТ для наполнителя, так как матрица функционализирует последние [33, 34].

Вместе с тем, композиционные наноматериалы, состоящие из альбумина в качестве матрицы и МУНТ в качестве наполнителя, представляют отдельный самостоятельный интерес. При этом наполнителем могут служить как нефункционализированные, так и функционализированные нанотрубки. Цель настоящей работы — исследование таких объемных наноматериалов и сравнение их свойств.

Приготовление образцов и методики измерения

Исследованные КНМ имели основные компоненты: альбумин и УНТ. Альбумин составляет около 60 % белков плазмы крови человека и животных и он хорошо изучен на атомарно-структурном уровне [35]. Как БСА, так и человеческий сывороточный альбумин (ЧСА) широко используют в медицинской практике, однако ЧСА менее стабилен, чем БСА.

Выбор БСА был связан с его высокой биосовместимостью, широкой доступностью и стабильностью характерных параметров. Также накоплен достаточный опыт использования БСА в лазерной технологии для получения биосовместимых материалов, например в качестве биоприпоя для лазерной сварки [31, 32].

В настоящей работе в качестве нанотрубок применяли МУНТ, поскольку они более дешевы и менее токсичны по сравнению с ОУНТ. При изготовлении МУНТ использовался биметаллический катализатор Fe-Mo/MgO. Синтез МУНТ протекал при температуре ~900 °С в потоке Ar и CH $_4$ в течение 40 мин. Для получения стабильных водных суспензий полученный материал окисляли в 8,8 М растворе перекиси водорода в течение 1 ч [36]. После этого материалы обрабатывали концентрированной соляной кислотой с концентрацией $C_{\rm K}=11,5$ М, при

объемном соотношении 50 мл кислоты на 100 мг используемого вещества. Длительность данной обработки составляла 24 ч. Затем материалы подвергали воздействию концентрированной азотной кислоты, с $C_{\rm K}=15$ М, при объемном соотношении 100 мл кислоты на 1 г вещества. Эту обработку проводили при 120...140 °C в течение 1 ч с использованием обратного холодильника. Все использованные для очистки химические вещества имели классификацию марки "хч". Вещества, обработанные минеральными кислотами, отмывали водой до рH = 5 и сушили на водяной бане, затем в сушильном шкафу при температуре 120 \pm 10 °C до постоянной массы. Доля МУНТ в итоговом материале после очистки составляла 95 \pm 1 мас. %.

Этапы функционализации МУНТ подробно описаны в работе [37], но здесь отметим некоторые основные процедуры, позволяющие получить устойчивые водные суспензии МУНТ:

- отжиг материала, содержащего МУНТ, на воздухе в течение 1,5 ч при температуре 350 °C;
- обработка в концентрированной соляной кислоте при комнатной температуре в течение 24 ч для удаления частиц катализатора;
- обработка в концентрированной азотной кислоте при температуре 140 °С в течение 1 ч;
- обработанные минеральными кислотами МУНТ отмывали водой до pH = 5 декантацией и сушили на водяной бане, а затем в сушильном шкафу при температуре 120 °C до постоянного веса;
- в процессе проведения кислотной обработки на поверхности МУНТ происходит формирование карбоксильных (O=C—OH), карбонильных (C=O) и альдегидных групп (O=C—H), которые препятствуют коагуляции нанотрубок МУНТ в растворе и повышают стабильность МУНТ_ф в воде.

В настоящей работе использовались способы получения КНМ, которые описаны в работах [27—32], где применялись совокупные нано- и лазерные технологии. При этом варьировались многочисленные технологические параметры: длительность перемешивания, мощность и длительность ультразвуковой обработки, значения концентрации C, плотность мощности и длительность лазерного облучения, температура и время дополнительной сушки изготовленных КНМ и др.

Для формирования КНМ проводили следующие подготовительные процедуры:

- 1. Порошок БСА растворяли в дистиллированной воде. Полученный раствор диспергировали в магнитной мешалке в течение 1-2 ч и в ультразвуковой бане при температуре ≤ 40 °C в течение 2 ч, декантировали и фильтровали.
- 2. В водный раствор БСА добавляли порошки МУНТ или сажи K-354 с концентрацией 0,0015—0,04 масс. %, а для контрольных образцов добавляли сажу в таких же пропорциях.

3. Полученные суспензии 25 масс. % БСА + + MУНТ, 25 масс. % БСА + сажа K-354 и 25 масс. % БСА + МУНТ $_{\rm th}$ подвергали обработке аналогично п. 1.

Приготовленные суспензии облучали диодным лазером ($\lambda_{\text{тен}} = 970$ нм, мощность 10-20 Вт) до испарения воды и получения образцов КНМ с различной консистенцией — от резиноподобной до твердой. В дальнейшем они высушивались на воздухе при температуре 30...35 °C.

Оптические измерения характеристик суспензий в области длины волн 380...990 нм проводили с помощью фотометра $K\Phi K$ -03-1.

Признак достаточно высокого качества конечного продукта — отсутствие в КНМ белесых областей денатурированного альбумина. Образцы, полученные под действием лазерного излучения, при длительном хранении в нормальных условиях ведут себя по-разному: КНМ с МУНТ или МУНТ $_{\Phi}$ сохраняют свой вид и прочность в течение года и более, в то время как БСА или БСА + сажа через несколько часов распадаются (фрагментируются) на отдельные чешуйки материала. Аналогично этому происходит фрагментирование при обычном высыхании суспензии альбумина в отсутствие лазерного облучения [38, 39].

Объемные образцы КНМ имели массу \sim 1 г, их плотность ρ измеряли методом гидростатического взвешивания. Фрагменты КНМ, полученные при их механическом разломе, шлифовали и полировали для измерения твердости $H_{\rm v}$ и контроля поверхности с помощью оптического микроскопа. Значения $H_{\rm v}$ определяли по шкале Виккерса с использованием микротвердомера ПМТ-3М. Алмазный индентор, входящий в состав лифта микротвердомера, имел форму пирамиды с углом 136°. Во всех исследованиях была фиксированная нагрузка на лифте — 0,2 Н. Значения σ определяли на образцах в форме "мостик" со следующими размерами: ширина — 1,5...2 мм, длина 4...6 мм, толщина — \sim 1 мм, "берега" \sim 5 \times 5 мм.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Исследования проводили на трех сериях образцов, состоящих из следующих частей: $1-\mathrm{BCA}$ и $\mathrm{BCA}+\mathrm{caжa}$; $2-\mathrm{KHM}$ на основе BCA и нефункционализированных МУНТ, т. е. $\mathrm{BCA}+\mathrm{MУHT}$; $3-\mathrm{KHM}$ на основе BCA и функционализированных МУНТ, т. е. $\mathrm{BCA}+\mathrm{MYHT}_{\Phi}$. Все водные суспензии имели приблизительно одинаковые концентрации углеродных (МУНТ, МУНТ $_{\Phi}$ и сажа K-354) добавок, что облегчало сравнение их характеристик. Во всех сериях образцов составные части имели концентрации: $\mathrm{BCA}-\mathrm{25}$ масс. %, углеродные добавки $-\mathrm{0,0015...0,04}$ мас. %.

На рис. 1 представлен типичный внешний вид исследуемых образцов. В твердой форме кристаллизационный БСА имеет золотистый цвет, однако при незначительной концентрации $C \ge 0{,}0015$ масс. %

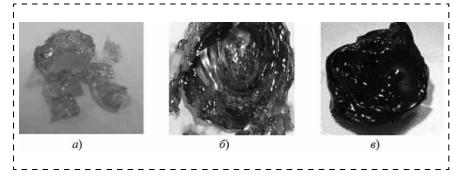


Рис. 1. Внешний вид некоторых образцов: a — высушенный БСА; δ — КНМ, C ≈ 0,003 масс. % МУНТ; ϵ — КНМ, C ≈ ≈ 0,003 масс. % МУНТ_ф

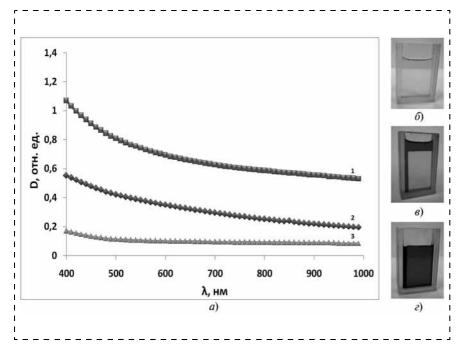


Рис. 2. Оптическая плотность и внешний вид образцов в жидком состоянии: a-1- суспензия БСА + 0,0017 масс. % МУНТ $_{\Phi}$; 2- суспензия БСА + 0,0017 масс. % сажа K-354; 3- суспензия БСА + 0,0017 масс. % МУНТ; $\delta-$ раствор БСА; $\delta-$ суспензия БСА + 0,0017 масс. % МУНТ; $\epsilon-$ суспензия БСА + 0,0017 масс. % МУНТ $_{\Phi}$. В кюветах δ и ϵ находятся стеклянные вкладыши, поэтому в них активная толщина суспензии равна 0,5 мм

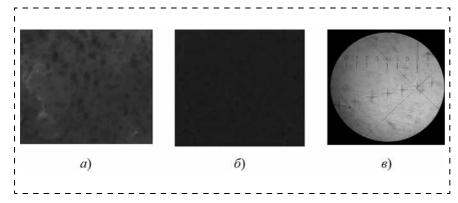


Рис. 3. Внешний вид поверхности некоторых образцов: a - KHM, 25 % БСА + 0,0030 масс. % МУНТ (оптический микроскоп, увеличение × 150); $\delta - \text{KHM}$, 25 % БСА + 0,0030 масс. % МУНТф (оптический микроскоп, увеличение × 150); $\delta - \text{вид}$ типичной поверхности КНМ в микроскопе микротвердомера (масштаб деления 30 мкм)

углеродных частиц (сажа, МУНТ, МУНТ $_{\Phi}$) его цвет меняется от серокоричневого (рис. 1, δ) до темночерного (рис. 1, θ).

Оптические измерения водных растворов БСА и суспензий из БСА и углеродных частиц показали (рис. 2, a): оптическая плотность D гораздо выше в суспензиях с функционализированными углеродными трубками (БСА + $0,0017~{
m macc.}~\%~{
m MУНТ}_{\Phi},$ кривая $\it I$), чем в суспензиях с МУНТ без функционализации (БСА + 0,0017 масс. % МУНТ, кривая 3), или с частицами сажи (БСА + 0,0017 масс. % сажа, кривая 2). На рис. 2, δ показан вид растворов в рабочих кюветах фотометра со стеклянными вкладышами. Хорошо видно, что суспензия БСА + + 0,0017 масс. % МУНТ $_{\rm d}$ менее прозрачна, чем суспензия БСА + + 0,0017 масс. % МУНТ, что согласуется с результатами, приведенными на рис. 1. Коэффициент поглощения µ суспензий измерялся относительно воздуха на длине волны 600...990 нм при соблюдении закона Бугера—Ламберта—Бэра для различных значений толщины слоя суспензии (h = 0.5; 1; 3; 10 мм). Были получены следующие значения $\mu \approx 0.012 \text{ cm}^{-1} \text{ (BCA)}; \sim 0.060 \text{ cm}^{-1}$ (БСА + 0,0017 масс. % МУНТ); $0.176 \text{ cm}^{-1} \text{ (BCA + } 0.0017 \text{ macc. } \%$ $МУНТ_{ф}$).

Значения D и μ в водных суспензиях БСА + 0,0017 мас. % МУНТ $_{\Phi}$, выше, чем в БСА + 0,0017 масс. % МУНТ, что, по-видимому, связано с более однородным распределением МУНТ $_{\Phi}$. В этом случае практически не происходит агломерация МУНТ $_{\Phi}$ с образованием крупных частиц (кластеров).

В другом случае, т. е. в суспензиях с БСА + 0,0017 масс. % МУНТ, агломерируется часть нанотрубок в кластерах, поэтому суспензия представляет собой смесь больших кластеров из МУНТ и одиночных частиц МУНТ, находившихся в водном растворе БСА. Тогда водная суспензия, обедненная частицами МУНТ, имеет более низкие значения D и μ , чем в случае, когда все МУНТ однородно распределены в объеме суспензии. Можно предположить, что сразу после приготовления водная суспензия БСА + МУНТ непрерывно

обедняется, поскольку из нее частицы МУНТ уходят в кластеры; следовательно, суспензия становится более прозрачной, т. е. ее интегральные значения D и μ уменьшаются (рис. 2, кривая I, кювета 3) 1 .

На рис. 3 показан вид поверхности исследованных КНМ в оптическом микроскопе. Для образца КНМ с низким значением концентрации $C \approx 0,0030$ масс. % МУНТ видны кластеры (рис. 3, a), выделенные из основной матрицы. Их средние размеры порядка ≤ 20 мкм, и, по-видимому, они зарождались ввиду агломерации нанотрубок. В КНМ с МУНТ $_{\Phi}$ выделенные из основной матрицы кластеры практически не видны (рис. 3, δ), так как их размеры гораздо меньше или они как таковые отсутствуют. Это обстоятельство, а также практически одинаковые размеры следов индентора в микротвердомере (рис. 3, θ), указывают о преимущественной однородности КНМ с МУНТ $_{\Phi}$, относительно КНМ с МУНТ

Между значениями D, μ (см. рис. 2) и результатами, приведенными на рис. 3, a, δ , просматривается корреляция: высоким D и μ (водные суспензии БСА + МУНТ $_{\Phi}$) соответствуют более темные цвета поверхности (объемные КНМ с МУНТ $_{\Phi}$) образца с отсутствием кластеров. По-видимому такая корреляция также подчеркивает то, что как водные суспензии БСА + МУНТ $_{\Phi}$, так и приготовленные из них объемные КНМ с МУНТ $_{\Phi}$ более однородны, чем суспензии БСА + МУНТ и соответствующие объемные КНМ с МУНТ.

Механические свойства и плотность объемного КНМ сильно зависели от концентрации МУНТ. Значения H_{ν} , σ и ρ наноматериала коррелированно увеличивались с ростом С МУНТ или МУНТ_ф. В таблице приведены измеренные параметры некоторых образцов при максимальных концентрациях ($C \approx 0.04$ мас. %) углеродных частиц (МУНТ или МУНТ_ф, сажа К-354). Соотношения между параметрами являются типичными для всех исследованных КНМ, например, потери общей массы за счет потери влаги (воды) в процессе приготовления и сушки образцов, более высокая плотность (до ~20 %) конечного продукта относительно БСА и воды и большое отношение значений $H_{\rm v}$ для КНМ и БСА — 5—6. Следует подчеркнуть, что прочность на разрыв образцов КНМ $\sigma \approx 30...35$ МПа, что в $\sim 8-9$ раз меньше, чем значения H_{ν} для этих образцов, что характерно для керамических материалов. Видно, что незначительные добавки наполнителя ($C \approx 0.04$ мас. %), которыми служили нефункционализированные (серия 2) или функционализированные (серия 3) МУНТ, значительно меняют плотность и твердость КНМ относительно исходного материала БСА, являющегося матри-

Параметры образцов, состоящих из 25 масс. % БСА и добавок углеродных частиц концентрации 0,04 масс. %

| | Cep | ия 1 | Серия 2 | Серия 3 БСА + + МУНТ _ф | |
|--|------------|-----------------|----------------|---|--|
| Параметры | БСА | БСА + + сажа | БСА + +MУНТ | | |
| Отношение масс КНМ до и после | 3,8 | 3,9 | 3,6 | 3,5 | |
| сушения Π лотность 1 , кг/м 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 | 1030 50 | 1040 45 | 1250 300 | 1240 250 | |

 $^{^{1}}_{2}$ Относительная погрешность — $\rho \le 2$ %. Относительная погрешность — $H_{v} \sim 10$ %.

цей. Однако в контрольном материале с наполнителем "сажа К-354" практически не наблюдаются изменения (улучшения) характеристик относительно матрицы, несмотря на то, что технологический режим приготовления и концентрации составных частей в контрольных материалах и наноматериалах на основе углеродных нанотрубок были идентичны.

Эти обстоятельства позволяют сделать следующие выводы и предположения:

- УНТ играют определенную роль в уменьшении образования пор в процессе высушивания водной сунспензии БСА + УНТ, что увеличивает значения р получаемого КНМ;
- лазерное облучение ориентирует УНТ относительно электрического поля лазерного луча, текстурирует УНТ в суспензии, а потом в КНМ;
- лазерное облучение создает каскадообразные структуры из УНТ, на которых располагаются молекулы альбумина;
- образуется КНМ, армированные очень прочными каскадами из УНТ (материалы серии 2 и 3);
- в композиционных наноматериалах с УНТ (нефункционализированными или функционализированными), полученных нано- и лазерными технологиями, реализуются высокие механические параметры;
- в контрольных композиционных материалах (серия 1), где вместе с УНТ использовались частицы сажи K-354, не наблюдались существенные изменения механических параметров (ρ , $H_{\rm v}$) относительно матрицы, несмотря на то, что все образцы серии 1, 2 и 3 готовили в идентичных режимах.

Заключение

Исследования композиционных наноматериалов на основе бычьего сывороточного альбумина (матрица) и углеродных нанотрубок (наполнитель) показали возможности создания 3D-наноматериалов с высокими механическими параметрами, в 5—6 раз превышающими показатели матрицы, тогда как в них концентрация наполнителя (УНТ) незна-

 $^{^1}$ Уменьшение D и μ за счет возможного осаждения кластеров и частиц MУНТ на дно кюветы пренебрежимо мало: эта причина учитывалась в эксперименте.

чительна ~0,04 масс. %. Механические свойства образцов значительно улучшаются после использования как нефункционализированных, так и функционализированных многослойных углеродных нанотрубок. Достигнуты следующие параметров объемных нанокомпозиционных материалов: плотность на ~20 % выше плотности составляющих материалов — альбумина и воды; твердость в 5—6 раз выше, чем твердость альбумина, и близка к твердости человеческой пористой костной ткани (~500 МПа) [40]. При этом в контрольных материалах на основе бычьего сывороточного альбумина (матрица) и сажи К-354 (наполнитель) зафиксированы незначительные изменения (в несколько процентов) параметров (плотность, твердость) относительно матрицы, тогда как все материалы с добавками сажи и углеродных нанотрубок были приготовлены в идентичных технологических режимах.

Сравнительные оценки показали следующие значения параметров объемных композиционных наноматериалов: удельная твердость $H_{\rm v}/\rho \approx 0.24~{\rm M}\Pi a/({\rm kr/m}^3)$; удельная прочность $\sigma/\rho \approx 0.025~{\rm M}\Pi a/({\rm kr/m}^3)$; человеческая пористая костная ткань $H_{\rm v}/\rho \approx 0.26~{\rm M}\Pi a/({\rm kr/m}^3)$; $\sigma/\rho \approx 0.026~{\rm M}\Pi a/({\rm kr/m}^3)$ [40].

Дисперсионные водные суспензии на основе бычьего сывороточного альбумина и различных углеродных частиц (сажа, нефункционалированные многослойные углеродные нанотрубки, функционализированные многослойные углеродные нанотрубки), приготовленных в идентичных режимах и при близких концентрациях наночастиц, имели различные оптические свойства. Оптическая плотность и коэффициент поглощения суспензий были в несколько раз (5-10 раз) выше в составах с функционализированными многослойными углеродными нанотрубками, чем у других суспензий с нефункционализированными углеродными нанотрубками и сажей. Визуально материалы в первом случае были более темными и непрозрачными, чем в других случаях. Это, по-видимому, связано с тем, что в суспензиях с функционализированными многослойными углеродными нанотрубками практически не происходит их агломерация и они однородно распределены в объеме. Так как в суспензиях с нефункционализированными многостенными углеродными нанотрубками образуется агломерация углеродных нанотрубок в виде кластеров и суспензия становится неоднородной — локально прозрачной (суспензия БСА) и локально темной с углеродными кластерами.

Таким образом, в исследованных композиционных 3D-наноматериалах на основе биологического, т. е. абсолютно биосовместимого материала — бычьего сывороточного альбумина и углеродных нанотрубок концентрация углеродных нанотрубок очень низка (≤0,04 масс. %). Поэтому можно полагать, что такой 3D-наноматериал будет иметь высокую степень биосовместимости. Хотя 3D-наноматериал с функционализированными на-

нотрубками имеет на ~20 % меньшую твердость и прочность, чем у наноматериала с нефункционализированными нанотрубками, предпочтение надо отдать композициям с функционализированными нанотрубками, поскольку считается, что они менее рискованные и опасные [19—26].

Функционализированные многослойные углеродные нанотрубки также выявляют более высокую эффективность при регенерации клеток, что подтверждено результатами работы [41], где изучалась возможность использования функционализированных УНТ в качестве клеточного каркаса для роста и размножения остеобластов и последующего формирования кости. В работе [42] продемонстрирован активный рост нервных клеток на подложках из функционализированных нанотрубок.

Следовательно, можно рекомендовать композиционный 3D-наноматериал на основе бычьего сывороточного альбумина и функционализированных многослойных углеродных нанотрубок в качестве биосовместимого функционального материала для биомедицинских приложений (наполнители костной ткани, различные имплантаты и др.), а также в качестве очень легкого и прочного материала для аэрокосмических конструкций.

Приведенные результаты исследования, относящиеся к разработке, подбору технологии, приготовлению и изучению некоторых характеристик биосовместимых композиционных 3D-наноматериалов на основе биологического белка (альбумин) и углеродных нанотрубок (МУНТ и МУНТ_ф), являются предварительными. Несомненно, существуют различные пути для дальнейшего улучшения характеристик рассмотренного наноматериала, в частности, варьированием многочисленных технологических факторов и концентрацией УНТ. Можно полагать, что в последнем случае увеличение концентрации УНТ до нескольких массовых процентов максимально улучшит механические свойства наноматериала, особенно тогда, когда компоненты для функционализации и нанотрубки будут локально-изоморфными веществами.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Лаборатории "Прочности и динамических испытаний", Центру коллективного пользования "Нанотехнологии в электронике" МИЭТ и ООО "НПФ" "ДЕЛТАРУС" за содействие в работе и полезные советы.

Работа выполнена при частичном финансировании Минобрнауки РФ (Госконтракт № 16.426.11.0043 от 12 сентября 2011 г.).

Список литературы

- 1. **Harris P. J. F.** Carbon Nanotube Science: Synthesis, Properties and Applications // University of Reading. Centre for Advanced Microscopy, University of Reading, UK. 314 p.
- 2. **Grobert N.** Carbon nanotubes becoming clean // Materials today. 2007. V. 10. Iss. 1—2. January—Fabrary. P. 28—35.
- 3. Sinha N., Yeow J. T.-W. Carbon Nanotubes for Biomedical Applications // IEEE Transactions on nanobioscience. 2005. V. 4, N 2. P. 180-195.

- 4. **Zhang D., Yi C., Zhang J., Chen Y.** et al. / The effects of carbon nanotubes on the proliferation and differentiation of primary osteoblasts // Nanotechnology. 2007. Vol. 18. P. 475102. (9 p).
- 5. **Bonfield W., Tanner E.** Hydroxyapatite Composite Biomaterials Evolution and Applications // Source Materials World. January 1997. Vol. 5, № 1. P. 18—20.
- 6. **Fritsch A., Dormieux L., Hellmich C., Sanahuja J.** Mechanical behavior of hydroxyapatite biomaterials: an experimentally validated micromechanical model for elasticity and strength // J. Biomed. Mater. Res. A. 2009. Vol. 88, N 1. P. 149—161.
- 7. **Jalota S., Bhaduri S. B., Tas A. C.** A New Rhenanite (β -NaCaPO₄) and hydroxyapatite biphasic biomaterial for skeletal repair // J. Biomed. Mater. Res. B. 2007. Vol. 80. P. 304—316.
- 8. **Kovaleva E. S., Putlayev V. I., Filippov Ya.Yu.** et al. Carbonated hydroxyapatite nanopowders for preparation of bioresorbable materils // Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 2008. Vol. 39, N 11—12. P. 1—8.
- 9. **Kealley C., Elcombe M., van Riessen A., Ben-Nissan B.** Development of carbon nanotube-reinforced hydroxyapatite bioceramics // Physica B. 2006. Vol. 385. P. 496—498.
- 10. **Komlev V. S., Fadeeva I. V., Gurin A. N.** et al. Effect of the concentration of carbonate groups in a carbonate hydroxyapatite ceramic on its in vivo behavior // Inorganic Materials. 2009. Vol. 45, N 3. P. 329—334.
- 11. Cao X., Chen Y., Chang P. R., Huneault M. A. Preparation and properties of plasticized starch/multiwalled carbon nanotubes composites // J. Applied Polymer Science. 2007. Vol. 106. P. 1431—1437.
- 12. **Wang S.-F., Shen L., Zhang W.-D., Tong Y.-J.** Preparation and mechanical properties of chitosan/carbon nanotubes composites // Biomacromolecules. 2005. Vol. 6. P. 3067—3072.
- 13. **Abarrategi A., Gutiérrez M.C., Moreno-Vicente C.** et al. Multiwall carbon nanotube scaffolds for tissue engineering purposes // Biomaterials. 2008. Vol. 29 (1). P. 94—102.
- 14. **Magrez A., Kasas S., Salicio V.** et al. Cellular toxicity of carbon-based nanomaterials // Nano Letters. 2006. Vol. 6 (6). P. 1121—1125.
- 15. **Schranda A. M., Daia L., Schlager J. J.** et al. Differential biocompatibility of carbon nanotubes and nanodiamonds // Diamond and Related Materials. 2007. Vol. 16 (12). P. 2118—2123.
- 16. **Plata D. L., Gschwend P. M., Reddy C. M.** Industrially synthesized single-walled carbon nanotubes: compositional data for users, environmental risk assessments, and source apportionment // Nanotechnology. 2008. Vol. 19, № 18. P. 185706 (14 p).
- 17. **Krug H. F., Wick P.** Nanotoxicology: An Interdisciplinary Challenge // Angewandte Chemie International Edition. 2011. Vol. 50. Iss. 6. February 7. P. 1260—1278.
- 18. **Lynch R. M., Voy B. H., Glass D. F.** et al. Assessing the pulmonary toxicity of single-walled carbon nanohorns // Nanotoxicology. 2007. Vol. 1, N 2. P. 157—166.
- 19. **Muller J., Huaux F., Moreau N.** et al. Respiratory toxicity of multi-walled carbon nanotubes Respiratory toxicity of carbon nanotubes // Toxicol. Appl. Pharmacol. 2005. Vol. 207. N 3. P. 221—231.
- 20. **Donaldson K., Aitken R., Tran L.** et al. Carbon nanotubes: review of their properties in relation to pulmonary toxicology and workplace safety // Toxicological Science. 2006. Vol. 92. Iss. 1. P. 5—22.
- 21. **Лысцов В. Н., Мурзин Н. В.** Проблемы безопасности нанотехнологий. М.: МИФИ, 2007 г. 70 с.
- 22. **Magrez A., Kasas, V. Salicio V.** et al. Cellular toxicity of carbon-based nanomaterials // Nano Lett. 2006. Vol. 6, N 6. P. 1121—1125.
- 23. **Kolosnjaj-Tabi J., Hartman K. B., Boudjemaa S.** et al. In vivo behavior of large doses of ultrashort and full-length single-walled carbon nanotubes after oral and intraperitoneal administration to swiss mice // ACS Nano. 2010. Vol. 4, № 3. P. 1481—1492.
- 24. **Koyama S., Endo M., Kim Y.-A.** et al. Role of systemic T-cells and histopathological aspects after subcutaneous implan-

- tation of various carbon nanotubes in mice // Carbon. 2006. Vol. 44. N 6. P. 1079—1092.
- 25. **Tian F., Cui D., Schwarz H.** et al. Cytotoxicity of single-wall carbon nanotubes on human fibroblasts // Toxicol. In Vitro. 2006. Vol. 20. N 7. P. 1202—1212.
- 26. **Ичкитидзе Л. П., Комлев И. В.** Углеродные нанотрубки и композитные наноматериалы: токсичность // Лазеры в науке, технике, медицине: сб. научных трудов / Под ред. В. А. Петрова. М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова. 2010. Т. 21. С. 103—113.
- 27. **Ичкитидзе Л. П., Подгаецкий В. М., Пономарева О. В., Селищев С. В.** Механические свойства объемного нанокомпозита, полученного при лазерном облучении продукта // Изв. вузов. Физика. 2010. № 3/2. С. 125—129.
- 28. Андреева И. В., Баграташвили В. Н., Ичкитидзе Л. П. и др. Исследование механических свойств биосовместимых объемных нанокомпозитов, изготовленных лазерным методом // Медицинская техника, 2009. N 6 (258). С. 1—9.
- 29. Подгаецкий В. М., Савранский В. В., Симунин М. М., Кононов М. А. Получение объемных нанокомпозиций на основе водного раствора альбумина под действием лазерного излучения // Квантовая электроника, 2007. Т. 37, № 9. С. 801—803.
- 30. Агеева С. А., Елисенко В. И., Герасименко А. Ю., Ичкитидзе Л. П. и др. Испытания на биологическую совместимость объемных нанокомпозитов, созданных лазерным методом // Медицинская техника. 2010. № 6 (264). С. 35—39.
- 31. **Герасименко А. Ю., Ичкитидзе Л. П., Подгаецкий В. М.** и др. Нанокомпозитный припой для лазерной сварки биологических тканей // Известия вузов. Электроника. 2010. № 4. С. 33-41.
- 32. Ичкитидзе Л. П., Подгаецкий В. М., Пономарева О. В., Селищев С. В. Исследование прочностных свойств лазерных швов с биоприпоями на основе наноматериалов // Лазеры в науке, технике, медицине: сб. научных трудов / Под ред. В. А. Петрова. М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова. 2009. Т. 20. С. 164—169.
- 33. **Fu K., Huang W., Zhang D.** et al. Functionalization on carbon nanotubes with bovine serum albumin in homogeneous aqueous solution // J. Nanosci. Nanotech. 2002. Vol. 2, № 5. P. 457—461.
- 34. **Zhao X., Liu R., Chi Z.** et al. New insightsinto behavior of bovine serum albumin adsorbed onto carbon nanotubes: comprehensive spectroscopic studies // J. Chem. Phys. B 2010. Vol. 114, N 16. P. 5625—5631.
- 35. **Уайт А., Хендлер Ф., Смит Э., Хилл Р., Леман И.** Основы биохимии. Т. 3. М.: Мир, 1981. 726 с.
- 36. **Shiraishi M., Takenoba T., Jamada A.** et al. Hydrogen storage in single-walled carbon nanotube bundles and peapods // Chem. Phys. Lett. 2002. Vol. 358. Iss. 3—4. P. 213—218.
- 37. Sun Y.-P., Fu K., Lin Y., Huang W. Functionalized Carbon Nanotubes: Properties and Applications // Acc. Chem. Res. 2002. Vol. 35. P. 1096—1104.
- 38. **Белова Л. М., Потехина Ю. П.** Исследование конформационных изменений молекулы альбумина в различных условиях методом клиновидной дегидратации (сообщение I) // Нижегородский медицинский журнал. 2003. № 3—4. С. 1—5.
- 39. **Ferrer M. L., Duchowicz R., Carrasco B.** et al. The conformation of serum albumin in solution: a combined phosphorescence depolarization-hydrodynamic modeling study // Biophys. J. 2001. Vol. 80, № 5. P. 2422—2430.
- 40. **Хенч Л., Джонс Д.** Биоматериалы, искусственные органы и инжиниринг. М.: Техносфера, 2007. 304 с.
- 41. **Zanello L. P., Zhao B., Hu H., Haddon R. C.** Bone Cell Proliferation on Carbon Nanotubes. // Nano Letters. 2006. Vol. 6, N 3. P. 562—567.
- 42. **Hu H., Ni Y., Mandal S. K.** et al. Polyethyleneimine Functionalized Single-Walled Carbon Nanotubes as a Substrate for Neuronal Growth. // Physical Chemistry Letters. 2005. Vol. 109, N 10. P. 4285—4289.

А. Г. Мустафаев, канд. техн. наук, доц., e-mail: arslan_mustafaev@mail.ru, **А. М. Савинова**, аспирант, **П. М. Мирзаева**, аспирант, Дагестанский государственный технический университет

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУР ИНТЕГРАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Поступила в редакцию 01.11.2012

Современные технологические процессы формирования структур интегральных элементов обеспечиваются использованием низкотемпературных неравновесных импульсных и радиационно-стимулированных технологических операций. Решение задачи управления технологическими процессами основывается на понимании взаимосвязи между свойствами изделий, особенностями технологии их изготовления и характеристиками оборудования, с помощью которого реализуется эта технология. Разработанные подходы управления технологическими процессами позволяют исключить субъективный фактор и повысить эффективность систем управления. Показано, что основными технологическими операциями, существенно влияющими на выходные характеристики интегральных элементов при их производстве, являются ионная имплантация, отжиг, травление. Исследование и моделирование процессов на этих операциях позволяют выработать рекомендации по управлению и разработать алгоритмы эффективного управления технологическими процессами формирования структур интегральных элементов.

Ключевые слова: технологический процесс, управление процессом, интегральные элементы, модель технологического процесса

Повышение эффективности производства при обеспечении определенного уровня качества изделий в условиях стабильного технологического процесса (ТП) рассматривается как важная научно-техническая проблема, решение которой особо важно в производстве интегральных элементов (ИЭ).

Производство ИЭ представляет собой сложный многофакторный и многостадийный процесс [1]. Основные характеристики ИЭ, определяющие область их применения, создаются при формировании структур на стадии обработки. Современные ионно-фотонные технологические процессы формирования структур элементов обеспечиваются использованием низкотемпературных неравновесных импульсных и радиационно-стимулированных технологических операций. К таким прогрессивным технологическим операциям относятся: ионная имплантация, некогерентный отжиг, плазмохимическое и ионное травление.

Анализ технологических особенностей процессов формирования структуры ИЭ показал, что к точности и стабильности ТП и условиям их выполнения предъявляются особо высокие требования. Все вышеприведенное и наличие большого разнообразия применяемых методов и приемов обработки приводят к необходимости решения сложных задач управления ТП. Решение этих задач основывается на понимании взаимосвязи между свойствами изделий, особенностями технологии их изготовления и характеристиками оборудования, с помощью которого реализуется эта технология.

При создании ИЭ ионно-фотонные ТП в значительной степени определяют такие характеристики, как процент выхода годных (ПВГ) в производстве и надежность при эксплуатации. Повышение ПВГ требует целенаправленного автоматизированного управления ТП для достижения заданного уровня точности и стабильности работы технологических операций (ТО), однородности параметров выпускаемых изделий. Такое управление возможно на основе моделирования конкретного процесса и для конкретного типа изделий, а также оптимизации технических решений [2]. Однако управление процессами осложняется следующими особенностями рассматриваемого ТП: групповой характер производства; многофакторность; длительность изготовления. Составной частью автоматизированной системы управления являются алгоритмы и программы функционирования, учитывающие особенности протекания исследуемого ТП формирования структур ИЭ на основе математического описания.

Решение различных проблем современного производства ИЭ на основе развития и использования математического моделирования технологических процессов и оптимизации технических решений является актуальным направлением научных исследований [3]. Развитие его позволяет успешно решать задачи обеспечения оптимальных и устойчивых к разбросу параметров ТП и повышать технологичность выпускаемых изделий. Так, моделирование процессов в технологии ИЭ позволяет оптимизировать технологические режимы и достигать требуемых параметров изделий [4]. Кроме того, использование новых моделей и новых технических средств в производстве ИЭ дает возможность эффективно и наиболее оптимальным способом управлять ТП.

Повышение эффективности автоматизированного управления технологическим процессом формирования структур интегральных элементов путем моделирования и оптимизации технического оснащения технологического процесса для поддержания и стабильности выходных характеристик приборов обеспечивается постановкой и решением следующих задач:

 исследование процесса групповой обработки формирования структур как объекта управления;

- управление процессами формирования структурных слоев интегральных элементов;
- разработка алгоритма и структуры системы управления технологическим процессом отжига при формировании структур;
- моделирование процесса травления при формировании топологии интегральных элементов;
- реализация алгоритмов управления процессами формирования структур интегральных элементов в промышленных условиях.

Анализ показывает, что процесс производства ИЭ охватывает разнообразные по физическим принципам, методам контроля и технологическому оснащению методы обработки, причем характер связей между отдельными операциями во времени и пространстве весьма различен. Процесс производства ИЭ представляет собой систему, оптимальная организация которой имеет первостепенное значение для ее эффективного функционирования. Наиболее полно особенности структуры ИЭ и главные черты интегральной технологии отражаются обрабатывающей группой процессов. Группа процессов (обрабатывающая) объединяет все операции, необходимые для формирования структур ИЭ в групповых пластинах и их контроля на функционирование.

Характер и последовательность операций, составляющих процессы этой группы, полностью определяются типом структуры ИЭ. Режимы обработки на отдельных операциях зависят от толщины, электрофизических свойств и областей структуры формируемых слоев.

Важными операциями являются те из них, с помощью которых непосредственно формируется структура ИЭ, т. е. ионная имплантация, отжиг, травление.

Несовершенство производственного процесса вызывает отклонения действительных значений качественных характеристик ИЭ от номинальных. Поэтому качество $T\Pi$ — важнейший из критериев, определяющий качество изделия.

Все ТП, влияющие на качество ИЭ, необходимо контролировать. Однако только использование хорошо организованной системы контроля показате-

лей качества материалов и ИЭ еще не гарантируют обеспечения высокого их качества. Необходимо также и управлять процессом производства, понижая влияние дестабилизирующих факторов, чего можно достичь, располагая исчерпывающими сведениями о состоянии и возможностях производственных процессов.

Характеристики большинства ТП ИЭ таковы, что требуют четкого управления ими. Особенно это относится к процессам формирования структур ИЭ. Необходимость управления ТП формирования структур диктуется требованиями поддержания и обеспечения выходных характеристик ИЭ на заданном уровне.

Решение проблемы управления ТП при производстве ИЭ существенным образом влияет на эффективность ТП. Управление ТП позволяет создать алгоритмы выбора и корректировки режимов технологических операций, направленные на повышение процента выхода и улучшения однородности характеристик ИЭ в партии. Увеличение сложности, степени интеграции и применение групповых методов изготовления приводит к определенным трудностям при управлении ТП производства ИЭ. Полную модель ТП можно задать в виде последовательности частных моделей, описывающих отдельные операции (рис. 1).

На первом уровне строится зависимость параметров от режимов проведения данной операции и предыдущего состояния вектора b:

$$b^{(i+1)} = G\{b_i, T^{(i+1)}\}, i = 0, 1, ..., n-1.$$

На втором уровне строится зависимость вектора контролируемых на данной операции переменных $a^{(i+1)}$ от состояния после выполнения данной операции — вектора $b^{(i+1)}$ и режимов измерения, задаваемых вектором $c^{(i+1)}$.

Считая значения параметров C_N , удовлетворяющие требованиям, предъявленным к ИЭ, целевыми, а их координаты — C, задачу управления ТП производства ИЭ можно сформулировать как задачу управления некоторым объектом: для исходных состояний j-го объекта, определяемых на контроль-

ной операции K_0 , и состояний, измеряемых на промежуточном контроле, требуется подобрать управление l_i (i=1,...,N), т. е. режимы проведения ТП, так, чтобы выходные характеристики C_N^j минимально отличались от целевых.

Управляющими переменными l_n являются величины, которые можно выбирать при управлении. Последовательность векторов l_1 , l_2 , ..., l_N называют стратегией или алгоритмом управления.

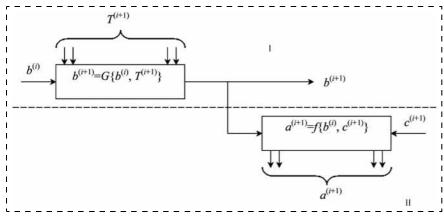


Рис. 1. Структура модели на (i + 1)-й операции

В качестве управлений, т. е. таких переменных, которые контролируются и могут целенаправленно изменяться в ходе процесса, берутся режимы выполнения операций.

Минимум целевой функции L для (n-1)-го шагового процесса имеет вид:

$$f_{n-1}(C_n) = \min_{n-1} L_{n-1} = \min_{i=1}^{n-1} \gamma_i,$$

где γ_i — член, характеризующий собственные цели i-го этапа.

При n=1 и n=2 имеем минимумы целевой функции

$$f_1(C_2) = \min_{l_1} [L_1(C_2; l_1)],$$

$$f_2(C_3) = \min_{l_2} [\gamma_2(C_2; l_2) + f_1(C_2)],$$

где
$$C_2 = C_2(C_3; l_2)$$
.

Целевая функция, соответственно, при этом имеет вид:

$$L_1(C_2; l_1) = \gamma_1(C_2; l_1),$$

$$L_2(C_3; l_2) = \gamma_2(C_2; l_2) + L_1(C_2; l_1).$$

ТП может быть представлен математической моделью, основу которой составляет описание процесса преобразования облика входных объектов в выходные под влиянием технологических воздействий с учетом свойств объекта. Входные данные — это описание топологии слоев изготовления ИЭ, режимов их изготовления и критериев управления.

Анализ показывает, что независимо от физических механизмов выполнения основных ТО существенными факторами структурообразования ТП являются способы формирования слоев ИЭ.

Технологическая задача — формирование с высокой точностью структурных слоев $И \ni —$ в современных производственных системах достигается применением эффективных алгоритмов управления, при которых оцениваются как отклонения технологических режимов процессов в каждой производственной системе, так и отклонения параметров изделий.

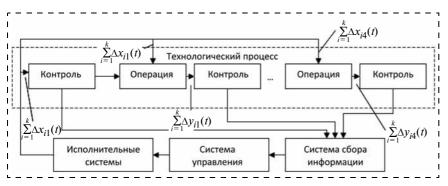


Рис. 3. Схема автоматизированного управления технологическим процессом

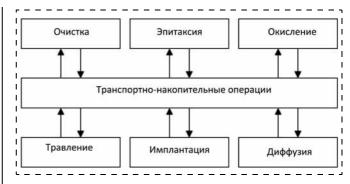


Рис. 2. Схема формирования структурных слоев

ТП формирования структурных слоев может быть структурно представлен в виде отдельных блоков (рис. 2).

В этом случае

$$f_n(C_{n+1}) = \min_{\substack{l_n \\ n = 1, 2, \dots, N-1}} [\gamma_n(C_{n+1}; l_n) + f_{n-1}(C_n)],$$

Точность моделирования в значительной степени влияет на эффективность управления ТП.

Ошибка управления ТП зависит от погрешности управления и погрешности моделирования процессов, определяемых характером производства ИЭ.

Максимальную ошибку управления можно определить соотношением

$$\begin{split} \max & \left[f_0^0 \left(\ C_1^0 \right) - f_{\overline{N}}^0 \left(\ C_{N+1}^0 \right) \right] = \\ & = \max \sum_{n=1}^N \left[\left(\left| \frac{\partial L_n}{\partial I_n} \right|_{\overline{C}_{n+1}^0} \right)^T \left(|\Delta_p I_n| \right) + \right. \\ & + \left. \left(\left| \frac{\partial f_{n-1}}{\partial \ C_n} \right|_{C_n^0} \right)^T \left(|\Delta C_n| \right) + \right. \\ & + \left. \left(\left| \frac{\partial f_n}{\partial \ C_{n+1}} \right|_{C_{n+1}^0} \right)^T \left(|\Delta C_{n+1}| \right) \right] = \Delta_{\text{MAKC}}, \end{split}$$

где $\Delta_p I_n$ — погрешность реализации режимов и задания координат; f_0^0 — конечные отклонения от

цели; f_N^0 — ожидаемые отклонения в начале процесса. Тогда в качестве критерия производственного соответствия можно записать условие:

$$f_0^0 (C_1^0) - f_N^0 (C_{N+1}^0) \le \Delta_{\text{MAKC}}.$$

Схема автоматизированного управления ТП, обеспечивающая номинальные выходные характеристики ИЭ (рис. 3), включает управляемые и контролируемые входные

параметры $\{x_i\}$, i=1,...,k, выходные параметры структур $\{y_i\}$, i=1,...,n, и управляющие сигналы $\{\Delta x_i\}$, i=1,...,k, вырабатываемые системой на основании информации, полученной в результате контроля при измерении выходных параметров y_i .

Информация о параметрах управляющего процесса представляется в виде

$$\sum_{i=1}^{k} x_{i1}(t) \to \sum_{i=1}^{n} y_{i1}(t) \to \dots \to \sum_{i=1}^{n} y_{iN}(t),$$

где t — текущее значение параметра.

На основании текущих значений факторов $x_i(t)$ прогнозируется ожидаемое значение выходного параметра $y_i(t)$. Если $y_i(t)$ не соответствует заданному значению, то вырабатывается управляющее воздействие $\Delta x_i(t)$. В зависимости от значения и знака управляющего сигнала изменение входных

параметров $\sum_{i=1}^{k} x_{i1}(t)$ осуществляется таким образом, чтобы совокупность $x_{i}(t)$ определила $y_{i}(t)$, близкое к заданному значению y_{i} .

Информация о параметрах y_i воспринимается датчиками, преобразующими величины в сигнал необходимого вида. При этом получение, обработка и отображение информации о качестве ТП формирования структур ИЭ и ее реализация обусловлены необходимостью адаптации системы контроля и управления к конкретному ТП, ввиду различ-

ной структуры и состава информационных потоков, сигналов управления, а также соответствующего математического и аппаратного обеспечения.

Предлагаемые подходы управления ТП позволяют исключить субъективный фактор и повысить эффективность систем управления. Проведенные исследования и анализ показали, что основными ТО, существенно влияющими на выходные характеристики ИЭ при их производстве, являются ионная имплантация, отжиг, травление. Исследование и моделирование процессов на этих операциях позволят выработать рекомендации по управлению и разработать алгоритмы эффективного управления ТП формирования структур ИЭ.

Список литературы

- 1. **Крапухин В. В., Соколов И. А., Кузнецов Г. Д.** Физико-химические основы технологии полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1995. 495 с.
- 2. **Бубенников А. Н**. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. М.: Высшая школа 1989. 320 с
- 3. **Тарнавский Г. А., Жибинов С. Б., Алиев А. В., Тарнавский А. Г.** Современные информационные технологии в наноэлектронике: прямое компьютерное моделирование процессов производственного цикла создания новых полупроводниковых материалов // Инфосфера. 2007. № 35. С. 48—50.
- 4. Kennel H. W., Cea S. M., Lilak A. D., Keys P. H., Giles M. D., Hwang J., Sandford J. S., Corcoran S. Modeling of ultrahighly doped shallow junctions for aggressively scaled CMOS // Proc. of Electron Devices Meeting, 2002. IEDM '02: Digest. International. P. 875—878.

УДК 623.3

Л. С. Раткин, канд. техн. наук, директор по научной работе ООО "АРГМ", e-mail: rathkeen@bk.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МЭМС

Поступила в редакцию 10.01.2012

В 2011 году в Москве Русской ассоциацией разработчиков, производителей и потребителей микроэлектромеханических систем (МЭМС) был организован Международный форум, посвященный современным технологиям производства и перспективам развития МЭМСустройств, на котором были представлены результаты научных исследований ведущих организаций по приоритетным направлениям развития отрасли.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы, МЭМС, космические исследования, беспроводные автономные безбатарейные сенсоры, коммутационная техника, микрооптоэлектростатические переключатели, государственная поддержка, академическая мобильность, многоканальный модуль измерения давления

На форуме МЭМС особое внимание было уделено решению организационных и технологических задач, вопросов развития промышленности МЭМС, реализованным инвестиционным проектам в сфере МЭМС, способности автономной работы изделий с повышением значений основных технических характеристик и параметров, их микроминиатюризации и улучшенным функциональным возможностям. Необходимость обеспечения безотказной работы МЭМС подчеркивалась в связи с возникающими сбоями при проведении работ по программам космических исследований и по государственному оборонному заказу. Были представлены решения проблем многократного повышения радиационной стойкости современной космической техники. Разработка беспроводных автономных безбатарейных сенсоров на базе термоэлектрических и вибрационных преобразователей энергии вызвала повышенный интерес участников и гостей форума, на котором, в частности, были представлены доклады Научно-исследовательского центра наноэлектроники "ІМЕС" (Бельгия), Технического исследовательского центра "VTT" (Финдяндия) и Компании "JP Sercel Associates" (США).

Применению МЭМС в коммутационной технике (КТ) было посвящено выступление П. Эннса, инженера-технолога ОАО "Специальное конструкторско-технологическое бюро по релейной технике" (г. Великий Новгород) ГК "Ростехнологии", одного из ведущих поставщиков в РФ и СНГ изделий электронной техники. Продукция производится на основе МЭМС-технологий с 2005 года, ее номенклатурный ряд включает металлостеклянные и металлокерамические корпуса и источники вторичного электропитания, твердотельные (статические), герконовые и электромагнитные реле и СВЧ керамические фильтры. Среди перспективных направлений применения МЭМС-технологий — ВЧ, оптические и слаботочные микрореле, температурные микродатчики, 12- и 24-канальные коммутаторы и микрофазовращатели. Разработаны температурные биморфные реле и электростатические переключатели, создаются драйверы управления МЭМС коммутаторами (ASIC часть) и микрооптоэлектростатические (МОЭМС) переключатели. Поверхностная технология применяется для изготовления электростатического микрореле, она позволяет при коммутируемом напряжении 80 В и напряжении срабатывания от 50 до 120 В достичь значения коммутируемого тока в 20 мА на подложке из монокристаллического кремния размерами $1,5 \times 2,2 \times 0,5$ мм с металлизацией Cr/Ni и Al. При токе 80 мА для температурного биморфного реле размерами $3 \times 6,4 \times 0,45$ мм и с основанием из стекла ЛК-5 с металлизацией Cr—Al, анодной сваркой с крышкой из монокристаллического кремния коммутируемое напряжение составляет около 50 В. ВЧ-переключатель имеет значения характеристик, в точности соответствующих параметрам ВЧ реле с резистивным соединением, за исключением габаритных размеров: реле имеет диаметр 5 мм при толщине 1,5 мм.

Доклад старшего научного сотрудника Отделения умных систем и энергетических технологий НИЦН "IMEC" д-ра техн. наук В. Леонова касался различных аспектов применения МЭМС для высокоэффективного решения широкого класса задач. Так как в рамках границ одного государства и условий функционирования конкретного предприятия развитие инновационных технологий труднореализуемо, формированию методов и принципов производства электроники нового поколения содействует международное научное сотрудничество. Форум МЭМС привлекает потребителей на отраслевой рынок, обеспечивает интеграцию усилий для выполнения имеющих международное

значение важнейших программ и проектов, популяризирует технологии их создания, стимулирует господдержку и обеспечивает академическую мобильность.

Основных технических и технологических решений по миниатюризации МЭМС-устройств на примере многоканальных преобразователей давления касалась презентация продукции ООО "Драйвер" (г. Саранск). Объединение нескольких элементов в одном корпусе с их предварительной настройкой, в частности, формирование 12-канальных преобразователей избыточного давления с общей обратной полостью INSER 1801/12, является одним из вариантов интеграции многоканальных модулей измерения давления (ММИД). В одном ММИД содержится ряд компонентов и корпусов для первичной обработки информации. Среди них, как правило, элементы и узлы термостабилизации и аналоговые мультиплексоры. От ММИД выходной аналоговый сигнал поступает на вспомогательное устройство, обеспечивая прием и обработку информации с ряда ММИД с усилением сигнала и последующим мультиплексированием, выбор канала и управление нагревателями посредством ряда стабильных напряжений. На внешнее устройство, регулирующее питание нагревателя, от датчика температуры поступает сигнал. Объединением в одном корпусе множества узлов и элементов характеризуется повышенная степень интеграции в структуре ММИД. Возможно объединение в систему с двухуровневым мультиплексированием ряда ММИД INSER1800/32. По технологии МЭМС с размерами 2 × 2 мм при мембране $1,2 \times 1,2 \times 0,012$ мм и размерах кремниевого пьедестала 2 × 2 × 1 мм изготовлен чувствительный элемент преобразователей INSER1800/32. Контроль на рампе и настройка, анализ разбалансировки кристаллов и элементов с пьедесталом и мониторинг диапазона сопротивлений и токов утечки на пластине предусмотрен на этапах отбраковки и контроля качества.

Выводы

- 1. Необходимо внесение изменений в нормативно-правовую базу, в частности, регулирующих права на интеллектуальную собственность с корректировкой ряда положений, затрагивающих вопросы инвестиционной привлекательности проектов.
- 2. Неготовность российского высокотехнологического сектора к полномасштабному внедрению инноваций является одной из ключевых проблем, сдерживающих рост отраслевых капиталовложений в МЭМС.

Элементы МНСТ

УДК 621.315.592

А. В. Войцеховский¹, д-р физ.-мат. наук, проф.,

С. Н. Несмелов¹, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,

H. А. Кульчицкий 2 , д-р техн. наук, проф., e-mail: n.kulchitsky@gmail.ru,

А. А. Мельников², д-р физ.-мат. наук, проф.,

П. П. Мальцев³, д-р техн. наук, проф.

¹Томский государственный университет, e-mail vav@elefot.tsu.ru

²Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики

³Учреждение Российской академии наук Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН), Москва

ТИПЫ ДЕТЕКТОРОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Поступила в редакцию 21.10.2011

Проведен сравнительный анализ основных типов детекторов терагерцового диапазона. Показано, что в настоящее время разработаны низкотемпературные терагерцовые детекторы с характеристиками, близкими к предельным. Проанализированы перспективные для широкополосного детектирования высокотемпературные детекторы.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, детекторы, прямое детектирование, гетеродинное детектирование, полоса частот, чувствительность

Введение

Во многих областях современной науки и техники существует потребность в детекторах электромагнитного излучения терагерцового (ТГц) диапазона частот. Терагерцовый диапазон находится в пределах 0,1...10 ТГц и является результатом перекрытия терагерцовой полосы (1...10 ТГц, 300...30 мкм) с субмиллиметровым диапазоном (0,1...3 ТГц, 3 мм...100 мкм) длин волн [1, 2]. Спектроскопия в терагерцовом диапазоне с помощью гетеродинных приемников является одним из основных методов изучения процессов формирования звезд и планет. Важную научную роль в астрономии терагерцового диапазона играет измерение параметров спектральных линий, так как в этом диапазоне находятся спектральные линии вращательных переходов

многих молекул. Терагерцовые детекторы также активно применяются в системах формирования изображения терагерцового диапазона в навигации, биологии, для целей медицины и безопасности, а также для обнаружения наркотических и взрывоопасных веществ [3].

В настоящее время применяются различные типы детекторов терагерцового излучения как относительно традиционные, так и основанные на новых принципах и материалах. Следует отметить, что различные применения предъявляют различные требования к характеристикам детекторов терагерцового излучения (например, к чувствительности, рабочей частоте и полосе частот детектируемого излучения) [4, 5]. В данной работе проведен краткий обзор характеристик и областей применения основных типов детекторов терагерцового диапазона.

Диоды с барьерами Шоттки

Структуры, основанные на барьерах Шоттки, являются одними из основных элементов терагерцовых технологий. Детекторы с барьерами Шоттки (SBD) используются как для прямого детектирования, так и в качестве нелинейных элементов в гетеродинных смесителях в широком диапазоне температур $T=4...300~{\rm K}$. Криогенно охлаждаемые SBD использовались в смесителях преимущественно в 1980-х и начале 1990-х годов а затем активно заменялись смесителями на структурах сверхпроводник—диэлектрик—сверхпроводник (SIS) или болометрами на горячих электронах (HEB).

Особенности разработок SBD и смесителей для терагерцовых приемников заключаются в переходе от структур на основе матричных SBD с контактами в форме усов к дизайну с планарными SBD. Исторически первые структуры на барьерах Шоттки имели точечные контакты в виде конических металлических проволок. Например, широко использовались p-Si/W-контакты. При комнатной температуре они имели пороговую мощность NEP $\approx 4 \cdot 10^{-10}$ BT/ Γ ц 0,5 . Также использовались точечные контакты из вольфрама или бериллиевой бронзы к слоям n-Ge, n-GaAs, n-InSb. SBD на основе GaAs до сих пор используются как смесители в малошумящих гетеродинных приемниках [6].

Поперечное сечение SBD с эквивалентной схемой перехода показано на рис. 1. Оно состоит из перехода (< нескольких мкм²) между платиновым анодом и эпитаксиальным слоем *n*-GaAs. Нако-

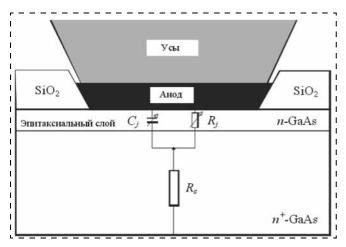


Рис. 1. Поперечное сечение контакта Шоттки с эквивалентной схемой перехода [2, 7]



Рис. 2. Схематическое представление дизайна планарного SBD [1, 8]

нечник металлического уса обеспечивает электрический контакт к аноду, а также служит в качестве длинной проволочной антенны для связи с внешним излучением. Смешивание волн происходит на нелинейном сопротивлении перехода R_{j} . Последовательное сопротивление диода R_{s} и зависящая от напряжения емкость перехода C_{j} являются паразитными элементами, которые приводят к деградации характеристик.

Однако существуют некоторые ограничения этой технологии диодов Шоттки с контактами в форме усов. Начиная с 1980-х годов, усилия разработчиков направлены на производство планарных диодов Шоттки. В целях использования планарной технологии в диапазоне от 300 ГГц до нескольких терагерц была разработана технология "без подложек". При таком подходе диоды интегрируются с согласующей цепью, большая часть подложки из GaAs удаляется из кристалла, и схема создается на оставшейся эпитаксиально выращенной GaAs мембране (рис. 2).

Эпитаксиальный GaAs является наиболее часто используемым полупроводником для изготовления смесителей на основе планарных диодов Шоттки, хотя другие материалы системы III—V также используются в некоторых приложениях.

SBD смесители могут действовать в условиях комнатной температуры до частоты $v \sim 25$ ТГц, но реально с относительно низким шумом SBD обычно применяются в частотном диапазоне <5 ТГц. Смесители на основе диодов Шоттки в этом частотном диапазоне требуют высокой импульсной мощности гетеродина локального осциллятора (LO) (до 1 мВт), что делает проблематичным разработку на их основе крупноформатных матриц [1, 2].

Приемники на основе смесителей с барьерами Шоттки, действующие при комнатной температуре, обычно имеют радиометрическую чувствительность $\Delta T \approx 0.05$ К при $\nu = 500$ ГГц и $\Delta T \approx 0.5$ К при 2,5 ТГц для времени интегрирования 1 с и полосы предварительного обнаружения 1 ГГц [1]. Один из наиболее чувствительных планарных смесительных SBD-приемников при $\nu = 100$ ГГц, работающий при комнатной температуре и при T = 20 К, описан в работе [9]. Шумовая температура составляла $T_{noise}(300\text{ K}) = 200\text{ K}$ и $T_{noise}(20\text{ K}) = 55\text{ K}$ соответственно.

При уменьшении площади перехода уменьшаются емкости переходов, что увеличивает рабочую частоту. Но в то же время это увеличивает последовательное сопротивление. Существующие приборы имеют диаметр анода около 0,25 мкм и емкости C около 0,25 фФ. Для высокочастотного действия слои GaAs легируют до концентрации $n \sim (5...10) \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$. Паразитные параметры R_s и C_j (см. рис. 1) определяют критическую частоту диода, которая равна $1/(2\pi R_s C_j)$. Емкость перехода зависит от напряжения, поскольку размер области обеднения зависит от приложенного смещения.

В диапазоне низких частот ($v < \sim 0,1$ ТГц) действие диодов на основе барьеров Шоттки может быть описано теорией смесителя, учитывающей паразитные параметры диода Шоттки (переменную емкость диода, последовательное сопротивление диода). Однако в субмиллиметровом диапазоне дизайн и характеристика приборов становятся все более сложными. При высоких частотах появляются несколько паразитных механизмов, например, скин-эффект (поверхностный эффект). Кроме того, необходим учет высокочастотных процессов в полупроводнике, таких как рассеяние носителей, время переноса носителя через барьер (оно составляет около 1 пс), а также время диэлектрической релаксации.

При комнатной температуре SBD с прямым детектированием реализуют NEP около $3 \cdot 10^{-10}...$ 10^{-8} Вт/ $\Gamma \mu^{0,5}$ при $\nu = 891$ ГГц [8]. Типичные зависимости чувствительности по напряжению от частоты для таких приборов приведены на рис. 3.

Сплошной линией показана теоретическая зависимость с учетом скин-эффекта, инерции носителей, плазменного резонанса в эпитаксиальном слое f_{pe} и подложке f_{ps} , фононного поглощения (f_t и f_t — частоты поперечных и продольных полярных

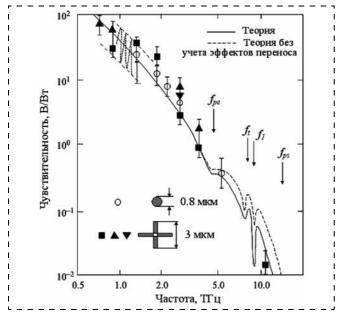


Рис. 3. Зависимость чувствительности по напряжению SBD от частоты при различной форме анодов [1, 2, 8]

оптических фононов) и эффектов переноса. Штриховая линия показывает кривую без учета эффектов переноса. Экспериментальные результаты характеризуют SBD с различными формами анодов.

Сравнение чувствительностей различных приемников в терагерцовом диапазоне показывает, что гетеродинные SBD-приемники несколько хуже по сравнению с охлаждаемыми НЕВ- и SIS-смесителями. В то же время SBD-приемники работают без охлаждения, что дает возможность использования SBD-смесителей в различных миллиметровых и субмиллиметровых приложениях. Их чувствительность хорошо подходит для использования в миллиметровых волновых спектрометрах со средним или высоким разрешением. В диапазоне частот $\nu = 100...120$ ГГц пороговая чувствительность SBD может достигать NEP $\approx 5 \cdot 10^{-12} \text{ Bt/}\Gamma \text{u}^{0.5}$ [1]. Для SBD на основе InP с широкополосной периодической зубчатой антенной чувствительность достигает 10^3 B/Bт при v = 0.3 ТГц и 125 B/Bт при v == 1,2 TFH [10].

Детекторы на эффекте разрыва куперовских пар

Один из методов детектирования фотонов состоит в использовании сверхпроводящих материалов. Если температура значительно ниже температуры перехода T_c , большинство электронов в этих материалах связаны в куперовские пары. Фотоны с энергиями, превышающими энергии связи куперовских пар в сверхпроводнике, могут разорвать эти пары, производя квазичастицы (электроны) (рис. 4). Одним из преимуществ таких детекторов является то, что фундаментальный шум вследствие случайной генерации и рекомбинации тепловых квазичастиц уменьшается экспоненциально с по-

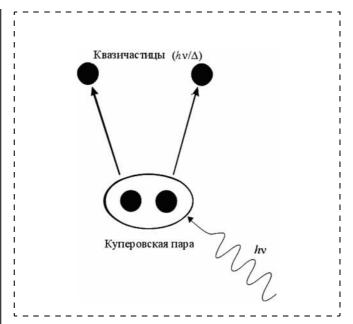


Рис. 4. Схема создания квазичастиц [2]

нижением температуры как $\exp(-\Delta/k_BT)$, где 2Δ — энергетическая щель сверхпроводимости, k_B — постоянная Больцмана. У лучших детекторов шумовая температура может составлять $k_BT \ge h v/\eta$, где η — квантовая эффективность. В детекторах с разрывом пар возможно реализовать $\eta \to 1$ и подойти к квантовому пределу.

Существует несколько типов разработок детекторов с разрывом пар, которые используют различные способы разделения квазичастиц из куперовских пар:

- детекторы со сверхпроводящим переходом (STJ);
- детекторы и смесители сверхпроводник—диэлектрик-сверхпроводник (SIS);
- детекторы и смесители сверхпроводник—диэлектрик—нормальный металл (SIN);
- детекторы с кинетической индуктивностью в радиодиапазоне;
- детекторы с кинетической индуктивностью на основе сверхпроводящих приборов с квантовой интерференцией (SOUID).

STJ-детекторы. Детекторы со сверхпроводящим туннельным переходом (STJ) впервые были предложены в начале 1960-х годов [1]. В таком детекторе туннельный переход используется для того, чтобы квазичастицы прошли через переход и были отделены от куперовских пар. Со связанной антенной STJ-детекторы со считыванием на основе одноэлектронного транзистора (в отсутствии фона) могут обеспечить NEP $\sim 10^{-20}$ Вт/Гц $^{0.5}$ [11]. Эффект прямого преобразования субмиллиметровых фотонов в электрический ток через процесс туннелирования с помощью фотонов может быть использован для прямого и гетеродинного детектирования, поскольку вольт-амперная характеристика нелинейна (рис. 5).

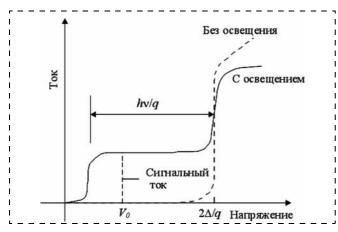


Рис. 5. Схематическая кривая вольт-амперной характеристики для освещенного и неосвещенного STJ-барьера

Интенсивность падающего излучения измеряется как избыточный ток при определенном напряжении смещения V_0 [1, 12]

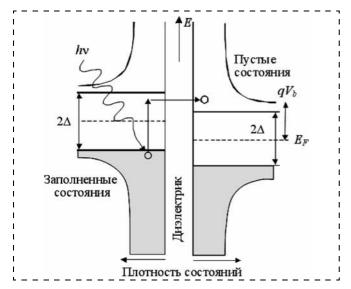


Рис. 6. Схематическая диаграмма зонной структуры и туннелирования квазичастицы при помощи фотонов

Горизонтальная ось представляет плотность состояний в каждом сверхпроводнике и вертикальная ось показывает энергетический уровень квазичастиц. Запрещенная зона соответствует запрещенным состояниям для квазичастиц, где электроны содержатся в куперовских парах [1, 13]

В STJ-структурах электронная плотность состояний в сверхпроводнике (рис. 6) препятствует туннелированию электронов через переход, пока приложенное напряжение смещения V_b не обеспечит достаточно энергии для туннелирования электронов через барьер 2 Δ . Когда излучение с частотой ν попадает на детектор, туннелирование с помощью фотонов возможно для $V_b > 2\Delta/q - h\nu/q$, где q— заряд электрона. Сигнальный ток измеряется как добавочный ток при определенном напряжении смещения V_0 .

Существует несколько предложений по дизайну STJ-детекторов. Прибор состоит из трех видов слоев: верхнего сверхпроводника, диэлектрика и нижнего сверхпроводящего слоя. Реальные STJ-приборы, используемые в таких детекторах, имеют

структуру слоев Nb/Al/AlO $_x$ /Al/Nb. Диэлектрик AlO $_x$ работает как туннельный барьер, физическая толщина которого составляет около 1,5 нм [2]. Терагерцовый элемент детектора содержит антенну из сверхпроводящего Nb, микрополосковую линию из сверхпроводящего Nb и STJ. STJ-детектор может рассматриваться как схема, содержащая L, C, R, в которой существует несколько резонансных частот. STJ диаметром 3 мкм соответствует частотному отклику детектора при $\nu = 0.65$ TГц [1].

SIS-детекторы. Вследствие сильной нелинейности вольт-амперной характеристики туннельных переходов SIS в основном используются как смесители в миллиметровых и субмиллиметровых приемниках гетеродинного типа, но также могут применяться как детекторы, непосредственно преобразующие энергию в электрический ток через туннельный переход.

Терагерцовые SIS-детекторы прямого детектирования на основе Nb/Al/AlO $_{\rm x}$ /Al/Nb достигают NEP = 1,9 · 10 $^{-16}$ Bt/ Γ ц 0,5 (ν = 0,65 T Γ ц и T = 300 мK) [12]. Если шум, связанный с флуктуациями фонового излучения, пренебрежимо мал, то собственная чувствительность таких детекторов может достигать NEP $\approx 10^{-18}$ Bt/ Γ ц 0,5 . Разработана для субмиллиметровой камеры матрица с малым числом элементов (9 элементов) фотонных SIS-детекторов с NEP $\approx 10^{-16}$ Bt/ Γ ц 0,5 при T = 300 мK и динамическим диапазоном, превышающим 10^9 [14].

SIS-детекторы сейчас являются одними из наиболее чувствительных и малошумящих структур при $\nu=0,3...0,7$ ТГц, которые находят широкое применение, в частности в астрономии [1, 2, 4].

Одноэлементные гетеродинные SIS-детекторы при v=0,1...0,7 ТГц имеют чувствительность, сравнимую с шумом, возникающим от космического микроволнового фона. При больших частотах v=1,0...1,3 ТГц, как в SBD-смесителях, собственный шум в SIS-структурах быстро возрастает из-за увеличения высокочастотных потерь. В настоящее время наблюдаются успехи только в создании матриц с малым числом элементом вследствие заметных трудностей их создания [15].

SIS-структуры являются нелинейными резистивными приборами. Нелинейность создается при разрыве пары в энергиях для одной электронной квазичастицы с обеих сторон туннельного SIS-барьера (рис. 6). Эта резкая нелинейность в одночастичном туннелировании используется для смешивания. Туннельный процесс под влиянием энергии фотонов, полученной антенной, называется туннелированием с помощью фотонов.

Смесительные детекторы на основе SIS (квазичастичных STJ) и сверхпроводящих схем на основе Nb известны как гетеродинные преобразователи частоты с низкой шумовой температурой, которая ограничивается только квантовыми флуктуациями. Минимальное значение шума SIS-приемника

может только в несколько раз превышать квантовый предел (в смесителях SIS на волноводах на основе Nb), но только для частот, меньших частоты $v = 680 \ \Gamma \Gamma \mu$, которая расположена вблизи частотной полосы Nb ($v_{Nb} = 0,65...0,7$ ТГц) [1]. Выше этой частоты Nb имеет потери подобно обычному металлу. Такие приборы являются лучшим решением для радиоастрономии наземного базирования в спектральном диапазоне у < 1 ТГц. Однако существует еще одна причина, препятствующая построению SIS-смесителей в широком диапазоне частот. Это относительно большая емкость SIS-перехода, которая является причиной большой добротности схемы, что приводит, в свою очередь, к относительно узкой частотной полосе и увеличению влияния потерь [16].

Использование других материалов с большой частотной полосой Δ (как, например, в NbTiN Δ = =0.9 ТГц или в NbCN Δ = 1.3 ТГц) потенциально позволяет расширить диапазон действия SIS-смесителей до частот, больших 1.4 ТГц. Но даже для меньших частот шумовая температура T_n в таких структурах существенно выше по сравнению с SIS-детекторами на основе Nb, что частично связано с тем фактом, что поверхностный импеданс и высокочастотные потери выше в NbCN по сравнению с Nb даже при частотах, меньших частоты полосы.

Одноэлементные SIS-смесители обычно требуют импульсной мощности LO приблизительно $P \approx 40...100$ мкВт, которая заметно меньше по сравнению с импульсной мощностью LO для одноэлементных SBD-смесителей ($P \approx 1$ мВт). Однако SBD-смесители могут работать при T = 300 K, что намного выше по сравнению с низкотемпературным режимом работы ($T \approx 0,3...0,4$ K), который необходим для SIS-смесителей.

SIN-детекторы. Емкость SIS-структур является причиной проявления токов, замыкающихся вследствие эффекта Джозефсона. Исключения этого эффекта в SIS-структурах было предложено добиваться заменой одного из сверхпроводников на обычный металлический контакт (SIN-структура) [17]. Хотя вольт-амперные характеристики SIN-структур не обладают такой нелинейностью, как SIS-структуры (это является причиной уменьшения их чувствительности), но влияние эффекта Джозефсона исключается. Для туннелирования электрона из обычного металла в сверхпроводник в SIN-структуре он должен иметь энергию выше уровня Ферми не менее, чем на $E = \Delta - qV_b$, где V_b — напряжение смещения на переходе.

SIN-детектор состоит из поглощающего тонкого слоя обычного металла, например Си, толщиной 30 нм, соединенного с планарной антенной, и туннельного SIN-перехода. Электроны активного слоя поглощают энергию от высокочастотного тока, индуцированного в антенне, и переносят ее к фононам решетки. Для того чтобы избежать потерь энер-

гии в процессе диффузии электронов в антенне, поглощающий слой контактирует со сверхпроводящим электродом (например, Al). Значение NEP может достигать $\sim 7 \cdot 10^{-17}$ Вт/ Γ ц^{0,5} с постоянной времени $\tau = 1,2$ мкс для объема обычного металла 4,5 мкм³ при рабочей температуре T = 270 мК [18].

Полупроводниковые и сверхпроводниковые болометры на "горячих электронах"

Болометры, как и другие тепловые приборы, долгое время традиционно рассматривались как медленные приборы. Во многих применениях их характеристики ограничены компромиссом между скоростью срабатывания и чувствительностью, поскольку быстродействие и чувствительность связаны между собой.

Шум флуктуаций собственной температуры тепловых детекторов определяет верхний предел NEP:

$$NEP = (4k_B T^2 G)^{0.5},$$

где G — теплопроводность.

В традиционных неохлаждаемых микроболометрах для ИК спектральной области ($\lambda \approx 10...100$ мкм) при T=300 К типичное значение теплоемкости C составляет $2\cdot 10^{-9}$ Дж/К (для болометров с размерами $50\times 50\times 0,5$ мкм) и $G\approx 10^{-7}$ Вт/К (α -SiH или VO_x болометры), которые определяют постоянную времени $\tau\sim 20$ мс. Для T=1 К верхний предел значения $NEP_{rad}\approx 1,7\cdot 10^{-19}$ Вт/ $\Gamma_{\Pi}^{0,5}$, но с $\tau\sim 3,5\cdot 10^4$ с (при этом $C\approx 2\cdot 10^{-9}$ Дж/К, а радиационная теплопроводность $G_{rad}\approx 5,7\times 10^{-14}$ Вт/К) [1].

Качественный скачок в достижении высокой чувствительности болометра и его быстрого отклика может быть получен нагревом за счет облучения его подсистемы с низкой теплоемкостью, которая имеет слабый теплоотвод. Такой подсистемой могут быть электроны в полупроводнике или сверхпроводнике, взаимодействующие с решеткой (фононами).

Первым болометром с "горячими электронами" (НЕВ) был болометр на основе низкотемпературного объемного n-InSb [19]. Сегодня предложены различные типы полупроводниковых НЕВ. Время отклика таких болометров составляет $\tau \approx 10^{-7}$ с. Такое время отклика хорошо подходит для некогерентных систем, но не для смесителей. Это большая постоянная времени по сравнению с постоянной времени сверхпроводниковых НЕВ, время отклика в которых обусловлено слабым электронфононным взаимодействием в таких детекторах при низких температурах. Их NEP может достигать $\approx 5 \cdot 10^{-13}$ Вт/ Γ ц 0,5 при рабочей температуре $T \approx 4$ К и ниже в терагерцовом спектральном диапазоне [1].

Для систем гетеродинного обнаружения на основе полупроводниковых НЕВ динамический диапазон ($\Delta f = 1/(2\pi\tau) \approx 10^6 \, \Gamma$ ц) невелик по сравнению с другими смесителями (например, с SBD или SIS). Несмотря на факт, что скорость электронного на-

грева предельно высока из-за высокой скорости фотон-электронного взаимодействия, максимальная частота преобразования ограничена скоростью тепловой релаксации, которая в полупроводниках регулируется временем электрон-фононного взаимодействия ($\tau \approx 10^{-7}$ с при низких температурах).

Нелинейность вольт-амперной характеристики полупроводникового HEB, необходимая для действия гетеродинного детектора, обусловлена зависимостью проводимости от подвижности электронов, которая является функцией приложенного электрического поля, т. е. функцией электронной температуры.

В низкоразмерных полупроводниковых структурах электрон-фононное взаимодействие может быть заметно увеличено (τ уменьшается), и эти структуры могут рассматриваться как преобразователи частоты с высокой промежуточной частотой (IF) и большой шириной полосы вплоть до 10^9 Гц. Прямые измерения релаксации фотоотклика в миллиметровом спектральном диапазоне показывают, что время релаксации τ составляет около 0,5 нс в диапазоне температур 4,2...20 К [20]. Так, IF может быть увеличена примерно на три порядка по сравнению с объемными полупроводниковыми HEB.

Другой подсистемой является электронная подсистема в сверхпроводнике, которая слабо взаимодействует с решеткой вблизи перехода со сверхпроводящим металлом или нормальным металлом при низких температурах, когда теплоемкость металла определяется электронами. Как и для традиционных болометров, верхний предел чувствительности в болометрах на "горячих электронах" определяется флуктуациями собственной температуры с $G \to G_{e-ph} = C_e/\tau_{e-ph}$, где G_{e-ph} — эффективная теплопроводность для переноса теплоты между электронами и фононами; $C_e = \gamma TV$ — электронная теплоемкость, у — постоянная Зоммерфельда, которая зависит от плотности состояний вблизи поверхности Φ ерми, и V — объем чувствительного элемента. Так, в случае металлического НЕВ чувствительность детектора зависит от чувствительного объема элемента:

NEP =
$$(4k_B T^2 G_{e-ph})^{0.5} = \left(\frac{4k_B T^2 \gamma V}{\tau_{e-ph}}\right)^{0.5}$$
.

В сверхпроводящем детекторе при прямом детектировании болометром на основе "горячих электронов" при T=300 мК с титановыми наноболометрами и ниобиевыми контактами с объемом $V \approx 3 \cdot 10^{-3}$ мкм³, созданными на кремниевых планарных объемных подложках, достигнута теплопроводность $G=4 \cdot 10^{-14}$ Вт/К, которая соответствует NEP с фононным шумом $3 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц^{0,5} [21]. Была также продемонстрирована для больших прибо-

ров тепловая постоянная времени $\tau_{e-ph}=25~{\rm MKC}$ при $T=190~{\rm MK}$ [1].

В сверхпроводниковых НЕВ-смесителях на основе NbN с сильным электрон-фононным взаимодействием время отклика может быть достигнуто $\tau \approx 10^{-11}$ с, и поэтому нет принципиальных ограничений для работы при $\nu > 1$ ТГц. Эти приборы могут быть эффективно использованы для гетеродинного детектирования в широком спектральном диапазоне вплоть до видимого [2].

Основные процессы влияния горячих электронов ниже температуры перехода T_c в сверхпроводящих тонких пленках, нанесенных на диэлектрические подложки, показаны на рис. 7.

Здесь T_e и T_p — электронная и фононная температуры; τ_{ep} и τ_{es} — время релаксации энергии электронов через электрон-фононное взаимодействие и время выхода фононов в подложку соответственно; C_e и C_p — удельная теплоемкость электронов и фононов соответственно; $\tau_{pe} = \tau_{ep}(C_p/C_e)$, где τ_{pe} — время фонон-электронной релаксации энергии.

В различных сверхпроводящих материалах отношение C_p/C_e , которое управляет потоком энергии от электронов к фононам и обратным потоком энергии вследствие перепоглощения неравновесных фононов электронами, составляет 0,85 (Nb), 6,5 (NbN), 38 (высокотемпературный сверхпроводник YBCO). Так, например, в тонких (<10 нм) пленках Nb, нанесенных на подложку, $\tau_{pe} > \tau_{ep}$, т.е. над эффективным выходом фононов к подложке превалирует обратный поток энергии к электронам. В результате только τ_{ep} управляет временем отклика тонких (<10 нм) пленок Nb ($\tau_{es} < \tau_{ep} < \tau_{pe} \approx 10^2$ нс), которое приблизительно равно $\tau_{ep} \approx 5$ нс. Так как эти приборы чувствительны в широком диапазоне спектра и намного быстрее по сравнению с объемными полупроводниковыми болометрами, дейс-

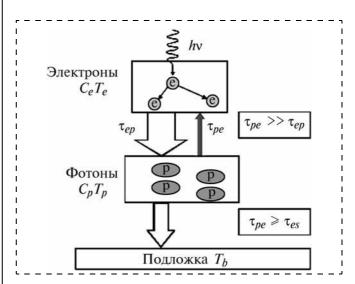


Рис. 7. Схема термализации, показывающая различные каналы переноса энергии в приборе на "горячих электронах", которые релаксируют к полному равновесию [1, 22]

твующими при $T \approx 4$ K, то они могут достигать NEP $\approx 3 \cdot 10^{-13}$ Bt/ Γ ц 0,5 [23].

NbN по сравнению с Nb имеют намного меньшие значения τ_{ep} и τ_{pe} вследствие более сильного электрон-фононного взаимодействия, и в ультратонких пленках с толщиной d=3 нм обе величины τ_{ep} и τ_{pe} определяют время отклика τ детектора с чувствительным элементом на основе NbN, которое может быть около 30 пс вблизи $T_{\rm c}$ ($\tau_{ep} \approx 10$ пс). При этом NEP может достигать значения приблизительно 10^{-12} BT/ Γ ц 0,5 [1].

В последние несколько лет разработки терагерцовых приемников в значительной степени сфокусированы на сверхпроводниковых НЕВ прямого детектирования, НЕВ-смесителях и оптических счетчиках отдельных фотонов [1, 2, 4]. Сверхпроводниковые НЕВ-сенсоры — планарные сверхпроводящие пленочные детекторы прямого обнаружения и смесители, а также сенсоры края перехода (TES — сверхпроводящие пленки, действующие вблизи температур перехода) обеспечивают создание малошумящих детекторов при частотах от миллиметровых длин волн до частотного диапазона в несколько терагерц и даже до коротковолнового ИК диапазона. Они эффективно действуют как дискретные фотонные детекторы, обладающие пикосекундным временем релаксации и, таким образом, гигагерцовой скоростью счета, высокой квантовой эффективностью (~30 %), хорошими темновыми характеристиками и простой схемой смещения.

НЕВ-детекторы и смесители на основе NbN могут действовать при температурах, близких к T_c . Сегодня высокочувствительные и требующие низкой мощности (<мкВт) LO-приемники делают НЕВ-смесители привлекательными для использования при v > 1 ТГц. Их промежуточная частота IF ($\Delta v \sim 10^{10}$ Гц) может быть близка к частоте IF SIS-смесителей. Для субкельвиновского охлаждения (T = 100 мК) было продемонстрировано, что болометры на "горячих электронах" на основе TES могут достигать NEP $\approx 2 \cdot 10^{-18}$ Вт/Гц^{0,5} [24].

В зависимости от типа механизма электронного охлаждения известны две возможные реализации сверхпроводниковых НЕВ-детекторов: перенос теплоты к фононам через электрон-фононное взаимодействие (фонон- или решеточно-охлаждаемые приборы) или диффузия "горячих электронов" (диффузионно-охлаждаемые детекторы) из сверхпроводящей пленки к обычному металлическому контакту [2].

Как фононно-охлаждаемые, так и диффузионно-охлаждаемые HEB-детекторы на основе NbN могут действовать при v > 1 ТГц с частотой IF в несколько гигагерц. Фононно-охлаждаемые приемники на основе NbN обычно превосходят диффузионно-охлаждаемые приемники. Типичные фононно охлаждаемые смесители создаются из ультратонких пленок

NbN ($\tau_{es} \approx 0.5 \tau_{pe}$), а диффузионно-охлаждаемые смесители создаются из Nb, Al или Ta ($\tau_{es} < \tau_{ep} < \tau_{pe}$). По сравнению с SIS-смесителями HEB-смеси-

По сравнению с SIS-смесителями HEB-смесители могут эффективно использоваться при частотах свыше 1 ТГц и по сравнению с SBD-смесителями HEB-смесители работают при гораздо меньшей мощности (~<1 мкВт по сравнению с 1 мВт для SBD) локального осциллятора. Важной особенностью HEB по сравнению с SIS- или SBD-детекторами является отсутствие заметных емкостей в частотном диапазоне свыше 1 ТГц.

Высокотемпературные сверхпроводящие (HTSC) НЕВ не достигли высокой степени технологической зрелости, поскольку сложный состав материала не позволяет создавать очень тонкие слои с высокими значениями T_c и I_c . Они не могут быть разделены на два класса подобно низкотемпературным сверхпроводящим (LTSC) НЕВ из-за того, что они в основном — фононно-охлаждаемые приборы, поскольку механизмом электронной диффузии можно пренебречь в HTSC-пленках. Эти приемники обладают существенно большим шумом по сравнению с LTSC-приборами, так как фононная динамика играет заметную роль вследствие относительно высокой рабочей температуры и наличия избыточных шумов в этих приборах. Пока не ожидается, что они достигнут чувствительности LTSC HEB, но из-за очень малого времени электрон-фононной релаксации ($\tau_{e-nh} \approx 1,1$ пс в YBaCuO [25]) HTSC HEBсмесители характеризуются широкой полосой частот $(2\pi\tau_{e-ph})^{-1}$, что делает материал YBaCuO хорошим кандидатом для производства широкополосных приборов [1]. Кроме того, YBaCuO HTSC HEB требуют намного более высоких охлаждающих температур $T \approx$ 80...90 К по сравнению с температурами охлаждения LTSC-приемников.

Джозефсоновский детектор на основе $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ достиг значений NEP $8\cdot 10^{-15}$ Вт/ $\Gamma \mu^{0,5}$ при T=80 К и $\nu=86$ ГГц и $3\cdot 10^{-13}$ Вт/ $\Gamma \mu^{0,5}$ при T=55 К и $\nu=692$ ГГц [26]. Можно сделать вывод, что значение NEP $\approx 5\cdot 10^{-15}$ Вт/ $\Gamma \mu^{0,5}$ достижимо в этом частотном диапазоне.

Сенсоры края перехода (болометры)

TES — детекторы, сделанные из сверхпроводниковой пленки, действующие вблизи их температуры перехода T_c . Во время перехода из сверхпроводящего в нормальное состояние малые изменения температуры вызывают большие изменения в сопротивлении [2].

НЕВ-смесители и TES-болометры походят друг на друга по принципам действия. Основное различие между HEВ-смесителями и TES-болометрами заключается в скорости их отклика. HEВ-детекторы на основе NbN-быстрые (время отклика $\tau \sim 10^{-10}\,\mathrm{c}$), что позволяет достичь гигагерцовой промежуточной частоты IF, а для TES-болометров (тонкие

Мо/Аu, Мо/Сu, Тi/Au и другие бислои) характерен отклик в микросекундной области. Различие во времени отклика этих приборов связано с тем, что в HEB-детекторах время тепловой релаксации электронов вследствие электрон-фононного процесса охлаждения мало. При выборе материала с большим электрон-фононным взаимодействием (такой, как NbN) и использовании очень тонких пленок ($d \approx 2...4$ нм) фононы могут выйти в подложку до поглощения электронами в сверхпроводнике. В TES-приборах имеют место намного более медленные диффузионные процессы к контактам, что приводит к большему времени тепловой релаксации [1].

Типичные температурные ширины переходов имеют порядок милликельвинов. Различные типы пар сверхпроводящих металлических пленок (бислоев) могут быть использованы (например, тонкие Мо/Аи, Мо/Си, Ті/Аи и др.). Два металла ведут себя как одиночная пленка с температурой перехода между $800 \text{ мK (Mo, } T_c)$ и $0 \text{ K (Au, } T_c)$. Температуру перехода можно перестраивать внутри этого температурного диапазона. Низкая рабочая температура ($T \le 200 \text{ мK}$) необходима вследствие того, что энергетическое разрешение этих приборов масштабируется с температурой. TES нагреваются при постоянном напряжении смещения до рабочей точки внутри сверхпроводящего перехода. Сопротивление и T_c с другими толщинами слоев и размерами различаются внутри широкого предела. Матрицы большого формата могут быть разработаны при использовании TES, чувствительного в диапазоне 0,1...3 ТГц [27].

Создан детектор частиц на основе смещенной напряжением сверхпроводниковой пленки, которая поддерживалась в области перехода за счет сильной отрицательной электротермической обратной связи [28]. В настоящее время TES-болометры могут быть применены для создания терагерцовых счетчиков фотонов из-за высокой чувствительности (NEP $\approx 3 \cdot 10^{-19}$ Вт/ Γ ц 0,5 при T = 300мК) и низкой тепловой постоянной времени (τ = = 25 мкс при T = 190 мК) [29]. TES болометры с изолированной мембраной способны достигать фононное NEP $\approx 4 \cdot 10^{-20}$ Вт/ $\Gamma \mu^{0.5}$ [1]. Важной особенностью этого вида сенсоров является то, что они могут действовать в широкой спектральной полосе, между радио- и гамма-диапазонами. TESболометры являются наиболее чувствительными детекторами для исследования космического микроволнового фона И NEP достигает $(1...6) \cdot 10^{-20} \text{ Bt/}\Gamma \mu^{0.5}$ [1].

Детекторы на основе полевых транзисторов

Нелинейные свойства плазменных волновых возбуждений (возбуждений волн электронной плотности) в наноразмерных полевых транзисторах (FET) делают возможным их отклик при частотах, значительно более высоких, чем граничная

частота прибора, что обусловлено баллистическим транспортом электронов. Результаты, получаемые до сих пор на полевых транзисторах, использованных как субмиллиметровые детекторы, показывают, что FET может быть применен для резонансного (перестраиваемого к определенной длине волны) и нерезонасного (широкополосного) детектирования (см., например, [30]). Терагерцовое детектирование на основе эффекта плазменных волн осуществляет перестройку путем изменения напряжения на затворе и потенциально может быть использовано в селективных твердотельных детекторах.

Эти приемники могут действовать в широком диапазоне температур вплоть до комнатной температуры. Детектирование наблюдалось в FET-приборах (или HEMT и MOSFET): Si MOSFET, GaAs/AlGaAs, InGaP/InGaAs/GaAs, GaN/AlGaN [1, 2]. Осцилляции плазмы также могут наблюдаться в двумерном электронном канале с обратно смещенным переходом Шоттки и FET с двойной квантовой ямой с периодическим решеточным затвором [31].

Физический механизм, поддерживающий создание стабильных осцилляций, лежит в отражении плазменных волн на границах транзистора с последующим усилением амплитуды волн. Плазменные возбуждения в FET на материале с достаточно высокой подвижностью электронов могут быть использованы как для излучения, так и для обнаружения терагерцового излучения.

При изучении Si MOSFET с длинами затвора 20...300 нм при комнатной температуре и частоте v = 0.7 ТГц найдено, что отклик зависит от длины затвора и напряжения на затворе [32]. Было реализовано значение чувствительности 200 В/Вт и NEP $> 10^{-10}$ Вт/ Γ ц 0,5 , что демонстрирует потенциал Si MOSFET как чувствительных детекторов терагерцового излучения. Также создана матрица фокальной плоскости размерности 3 × 5 на основе Si MOSFET, изготовленная с помощью 0,25 мкм КМОП-технологии [33]. Каждый пиксель матрицы состоит из антенны на 645 ГГц, связанной с FET-детектором, и усилителя напряжения на 43 дБ с полосой частот 1,6 МГц. Значение NEP $3 \cdot 10^{-10}$ Вт/Гц $^{0.5}$ было достигнуто, что прокладывает путь реализации широкополосных терагерцовых детекторов и матриц фокальной плоскости с высокой кадровой скоростью формирования изображения на основе КМОП-технологии. Характеристики этих быстрых детекторов при комнатной температуре соответствуют другим неохлаждаемым детекторам в диапазоне частот терагерцового излучения.

Заключение

Терагерцовые технологии активно проникают в различные области человеческой деятельности. Для более широкого их применения необходимо дальнейшее увеличение чувствительности детекторов, а также повышение их рабочей температуры.

Сегодня неохлаждаемые тепловые детекторы прямого обнаружения с NEP = $10^{-10}...10^{-11}$ Вт/Гц 0,5 используются в системах активного наблюдения и спектроскопических применениях с невысоким разрешением. Представляют интерес исследования, направленные на создание новых разработок терагерцовых и субмиллиметровых детекторов, например, на основе $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ [34, 35], низкоразмерных структур из HgCdTe [3, 36], на основе низкоразмерных структур Ge/Si [37].

Неохлаждаемые и охлаждаемые гетеродинные SBD могут обеспечить относительно высокую чувствительность во многих применениях в миллиметровом и субмиллиметровом спектральном диапазоне, но их сложно объединить в крупноформатные матрицы из-за высокой мощности локального осциллятора или гетеродина (около 1 мВт). В настоящее время системы с дискретными когерентными SBD-детекторами и матрицы с небольшим числом пикселей являются доступными, но из-за физических ограничений эти приборы не могут работать при v > 1 ТГц.

Гетеродинные детекторы на основе SIS-структур, действующие при низких или субкельвиновских температурах, являются наиболее чувствительными приборами, обеспечивающими высокое спектральное разрешение в режиме, близком к квантовому пределу при v < 0.7 ТГц. Дальнейший прогресс в этой области связан с созданием крупноформатных матриц со считыванием в фокальной плоскости, удовлетворяющих требованиям высокоразрешающей спектроскопии ($v/\Delta v \approx 10^7$ при у ≥ 1 ТГц). При частотах, превышающих 1 ТГц, НЕВ-смесители на основе сверхпроводящих ультратонких слоев NbN имеют лучшие характеристики и перспективны для использования в крупноформатных матрицах вследствие низкой мощности локального осциллятора, необходимого для их работы. Сверхпроводящие НЕВ-детекторы также перспективны при создании счетчиков фотонов в инфракрасной области спектра. Сверхпроводящие высокотемпературные НЕВ из-за короткого времени электрон-фононной релаксации являются перспективными в качестве широкополосных приборов.

Детекторы прямого обнаружения, например сверхпроводящие HEB, имеют высокую чувствительность и быстрый отклик ($\tau = 10^{-10} \, \mathrm{c}$), а TES-болометры с малыми объемами ($\approx 3 \cdot 10^{-3} \, \mathrm{мкм}^3$) предельно чувствительны при охлаждении до субкельвиновских температур и обладают достаточным быстродействием ($\tau = 10^{-5} \, \mathrm{c}$), что может обеспечить высокую скорость передачи данных и реализовать режим счета фотонов в терагерцовом диапазоне. Характеристики таких приборов могут быть близки к режиму ограничения фоном в случае низкого потока фоновых фотонов, и эти приборы легче объединить в крупноформатные матрицы по

сравнению с гетеродинными детекторами, поскольку отсутствует необходимость использования локального осциллятора.

Работа была поддержана в рамках следующих программ: АВЦП "Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2011 годы)" (рег. № 2.1.2/12459), ФЦП "Научные и научно-инновационные кадры инновационной России" (проекты ΓK 02.740.11.0444, ΓK 02.740.11.0562), а также проектом по гранту НШ-4297.2010.2.

Список литературы

- 1. Sizov F. THz radiation sensors // Opto-Electronics Review. 2010. Vol. 18, \mathbb{N}_2 1. P. 10—36.
- 2. Sizov F., Rogalsky A. THz detectors // Progress in Quantum Electronics. 2010. Vol. 34. P. 278—347.
- 3. Стафеев В. И. Теллуриды кадмия-ртути: фотоприемники инфракрасного диапазона, другие приборы. М.: ФГУП "НПО "Орион", 2011. 204 с.
- 4. **Rogalsky A.** Infrared detectors / 2nd. ed., New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. 876 p.
- 5. **Sizov F., Rogalsky A.** Terahertz detectors and focal plane arrays // Opto-Electronics Review. 2011. Vol. 19, № 3. P. 346—404.
- 6. Crowe T. W., Bishop W. L., Porterfield D. W., Hesler J. L., Weikle R. M. Opening the terahertz window with integrated diode circuits // IEEE J / Solid-St. Circ. 2005. Vol. 40. P. 2104—2110.
- 7. Roeser H.-P., Hubers H.-W., Brundermann E., Kimmitt M. F. Observation of mesoscopic effects in Schottky diodes at 300 R when used as mixers at THz freguencies // Semicond. Sci. Tech. 1996. Vol. 11. P. 1328—1332.
- 8. **Bozhkov V. G.** Semiconductor detector, mixer, and frequency multipiers for the terahertz band // Radiophys. Quantum. El. 2003. Vol. 46. P. 631—656.
- 9. **Piddyachiy V. I., Shulga V. M., Korolev A. N., Mysenko V. V.** High doping density Schottky diodes in the 3 mm wavelength cryogenic heterodyne receiver // Int. J. Infrared Milli. Wavers. 2005. Vol. 26. P. 1307—1315.
- 10. **Ito H., Nakajima F., Ohno T., Furuta T., Nagatsuma T., Ishibashi T.** InP-based planar-antenna-integrated Schottky-barrier diode for millimeter- and sub-millimeter-wave detection // Jpn. J. Appl. Phys. 2008. Vol. 47. P. 6256—6261.
- 11. Schoelkopf R., Moseley S., Stachle C., Wahlgren P., Delsing P. A concept for a sub-millimeter-wave single-photon counter // Trans. Appl. Supercond. 1999. Vol. 9. P. 2935—2939.
- 12. Otani Ch., Ariyoshi S., Matsuo H., Morishima T., Yamashita M., Kawase K., Satoa H., Shimizu H. M. Terahertz direct detector using superconducting tunnel junctions // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5354. P. 86—93.
- 13. **Tucker J. R., Feldman M. J.** Quantum detection at millimeter wavelength // Rev. Mod. Phys. 1985. Vol. 57. P. 1055—1113.
- 14. Matsuo H., Nagata H., Mori Y., Kobayashi J., Okaniwa T., Yamakura T., Otani C., Ariyoshi S. Performance of SIS photon detectors for superconductive imaging submillimeter—wave camera (SISCAM) // Proc. SPIE. 2006. Vol. 6275. P. 627504.
- 15. **Hübers H. W.** Terahertz heterodyne receivers // IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. 2008. Vol. 14. P. 378—391.
- 16. Shitov S. V., Markov A. V., Jakson B. D., Baryshev A. M., Iosad N. N., Gao J. R., Klapwijk T. M. THz low-noise SIS mixer with a double-dipole antenna // Techn. Phys. 2002. Vol. 47. P. 1152—1157
- 17. **Blundell R., Gundlach K. H.** A quasioptical SIN mixer for 230 GHz frequency range // Int. J. Infrared Milli. Waves. 1987. Vol. 8. P. 1573—1579.
- 18. Schmidt D. R., Lehnert K. W., Clark A. M., Duncan W. D., Irwin K. D., Miller N., Ullom J. N. A superconductor-insulator-normal metal bolometer with microwave readout suitable for large-format arrays // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 86. P. 053505.

- 19. **Kinch M. A., Rollin B. V.** Detection of millimetre and submillimetre wave radiation by free carrier absorption in a-semiconductor // Brit. J. Appl. Phys. 1963. Vol. 14. P. 672—676.
- 20. Verevkin A. A., Ptitsina N. G., Smirnov K. V., Gol'tsman G. N., Gershenzon E. M., Ingvesson K. S. Direct measurements of energy relaxation times on an AlGaAs/GaAs heterointerface in a range 4,2—50 K // JETP Lett. 1996. Vol. 64. P. 404—409.
- 21. Karasik B. S., Olaya D., Wei J., Pereverzev S., Gershenson M. E., Kawamura J. H., McGrath W. R., Sergeev A. V. Record-low NEP in hot-electron titanium nanobolometer // IEEE T. Appl. Supercon. 2007. Vol. 17. P. 293—297.
- 22. **Semenov A., Gol'tsman G. N., Sobolewski R.** Hot-electron effect in semiconductors and its applications for radiation sensors // LLE Review. 2001. Vol. 87. P. 134—143.
- 23. Gershenson E. M., Gershenson M. E., Goltsman G. N., Karasik B. S., Lyul'kin A. M., Semenov A. D. Ultra-fast superconducting electron bolometer // J. Tech. Phys. Lett. 1989. Vol. 15. P. 118—119.
- 24. **Mees J., Nahum M., Richard P.** New designs for antennacoupled superconducting bolometers // Appl. Phys. Lett. 1991. Vol. 59. P. 2329—2331.
- 25. Lindgren M., Currie M., Williams C., Hsiang T. Y., Fauchet P. M., Sobolewsky R., Moffat S. N., Hughes R. A., Preston J. S., Hegmann F. A. Intrinsic picosecond response times of Y—Ba—Cu—O superconducting photoresponse // Appl. Phys. Lett. 1999. Vol. 74. P. 853—855.
- 26. **Shirotov V. V., Divin Yu. Ya.** Frequency—selective Josephson detector: Power dynamic range at subterahertz frequencies // Techn. Phys. Lett. 2004. Vol. 30. P. 522—524.
- 27. Brown A. D., Chuss D., Mikula V., Henry R., Wollack E., Zhao Y., Hilton G. C., Chervenak J. A. Auxiliary components for kilopixel transition edge sensor arrays // Solid State Electron. 2008. Vol. 52. P. 1619—1624.
- 28. **Irwin K. D.** An application of electrothermal feedback for high resolution cryogenic particle detection // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 66. P. 1998—2000.
- 29. Olaya D., Wei J., Pereverzev S., Karasik B. S., Kawamura J. H., McGrath W. R., Sergeev A. V., Gershenson M. E. An

- ultrasensitive hot-electron bolometer for low-background SMM applications // Proc. SPIE. 2006. Vol. 6275. P. 627506.
- 30. Fatimy A. El., Teppe F., Dyakonova N., Knap W., Seliuta D., Valusis G., Shchepetov A., Roelens Y., Bollaert S., Cappy A., Rumyantsev S. Resonant and voltage-tunable terahertz detection in InGaAs/InP nanometer transistors // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. P. 131926.
- 31. Peralta X. G., Allen S. J., Wanke M. C., Harff N. E., Simmons J. A., Lilly M. P., Reno J. L., Burke P. J., Eisenstein J. P. Terahertz photoconductivity and Plasmon modes in double-quantum-well field-effect transistors // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 81. P. 1627—1630.
- 32. Tauk R., Teppe F., Boubanga S., Coquillat D., Knap W., Meziani Y. M., Gallon C., Boeuf F., Skotnicki T., Fenouillet-Beranger C. Plasma wave detection of terahertz radiation by silicon field effects transistors. Responsivity and noise equivalent power // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. P. 253511.
- 33. Lisauskas A., Glaab D., Roskos H. G., Oejefors E. U., Pfeiffer R. Terahertz imaging with Si MOSFET focal-plane arrays // Proc. SPIE. 2009. Vol. 7215. P. 72150J.
- 34. **Klimov A., Shumsky V., Kubarev V.** Terahertz sensitivity of $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ // Ferroelectrics. 2007. Vol. 347. P. 111—119.
- 35. Khokhlov D. R., Ivanchik I. I., Raines S. N., Watson D. M., Pipher J. L. Performance and spectral response of $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ far-infrared photodetectors // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 76. P. 2835—2837.
- 36. Сизов Ф. Ф., Апатская М. В., Гуменюк-Сычевская Ж. В., Забудский В. В., Момот Н. И., Смолий М. И., Цыбрий З. Ф., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сахно Н. В. Многоэлементные приемники терагерцового излучения на CdHgTe // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 61—67.
- 37. Жукова Е. С., Горшунов Б. П., Юрьев В. А., Арапкина Л. В., Чиж К. В., Чапнин В. А., Калинушкин В. П., Прохоров А. С., Михайлова Г. Н. Поглощение терагерцового излучения в гетероструктурах Ge/Si(001) с квантовыми точками // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 92, № 12. С. 877—883.

УДК 621.377.622

И. В. Матюшкин, канд. физ.-мат. наук, доц., Московский институт электронной техники, e-mail: imatyuskin@sitronics.com

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ДЕГРАДАЦИИ ЗАРЯДА НА НАНОКРИСТАЛЛАХ Si В ЭЛЕМЕНТАХ ФЛЭШ-ПАМЯТИ

Поступила в редакцию 10.11.2011

В рамках (2n+1)-уровневой (n=4) модели зонной структуры нанокристалла Si, несущего заряд, рассмотрено положение уровня Ферми. Показано, что типичное время утечки заряда на подложку составляет: для электронов зоны проводимости менее $10\ c\ (до\ микросекунд)$ в зависимости от толщины туннельного SiO_2), для электронов на ловушке около $10\ л$ ет и выше.

Ключевые слова: нанокристаллы кремния (nc-Si), энергонезависимая память, время деградации, уровень Ферми

Перспективным направлением разработки флэш-памяти является исследование конструкций ячеек МОП-структуры, где туннельный и блоки-

рующий диэлектрики разделены слоем, хранящим в себе заряд, иногда называемым плавающим затвором. Во избежание закороток с подложкой вследствие неизбежного технологического брака данный слой стараются делать не континуальным, а дискретным, что может быть реализовано посредством нанокристаллов, в частности кремния (пс-Si) [1]. За счет эффекта кулоновской блокады практически снимается проблема деградации оксида, имеющая место в случае сплошных кремниевых или нитридных слоев [2]. По сравнению с оксиднитрид—оксид-структурами [3] данная конструкция ячейки позволяет применять более тонкие подзатворные диэлектрические слои, уменьшая рабочее напряжение и увеличивая быстродействие.

Одной из важных характеристик элементов флэшпамяти является время хранения информации, в нашем случае — время хранения заряда в пс-Si до достижения некоторого порогового уровня, определяемого чувствительностью вольтамперной или вольтфарадной характеристики транзистора (шириной петли гистерезиса) для операции считывания. В данной работе мы попытаемся объяснить

механизм деградации при хранении заряда на nc-Si и на основе разработанной модели оценить время деградации (*retention time*). Особое внимание уделим вычислению положения уровня Ферми заряженного nc-Si.

1. Основные предпосылки модели

Как известно, имеет место эффект квантового конфайнмента, выражающегося в дискретизации энергетических уровней зоны проводимости nc-Si. Спектр этих уровней зависит от размера и формы нанокристалла; приближенно рассчитана [4] последовательность уровней энергии для сферического nc-Si радиуса 2,5 нм: $E_1 = 0,26$, $E_2 = 1,04$, $E_3 = 2,28$, $E_4 = 3,1$ эВ. Спектр энергий отсчитывается от уровня дна зоны проводимости кремния подложки E_c ; было принято, что высота барьера для электрона формально совпадает с разницей энергий дна зоны проводимости объемного Si и SiO₂ ($V_b = 3.2 \text{ эB}$ при $E_{\rm g}=1,12$ эВ). Заметим, что уровень E_4 практически совпадает с уровнем дна проводимости SiO₂, являясь потенциальной возможностью для утечки заряда (рис. 1). Значения энергий уровней $E_1 - E_4$ можно косвенно найти из многочисленных измерений спектров фото- или электролюминесценции [4]. Вместе с тем сама структура зоны проводимости nc-Si весьма сложная и существенно отличается для разных размеров нанокристалла, и более точные расчеты [13, 14] входят в некоторое противоречие с указанными выше данными [4]. В первом приближении можно принять, что электроны зоны проводимости концентрируются вблизи ее дна на первых четырех уровнях $E_1 - E_4$, раз-

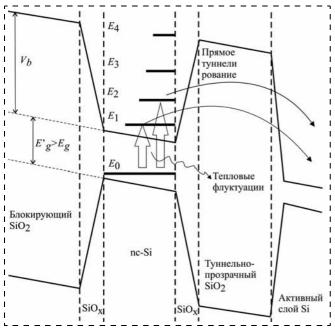


Рис. 1. Зонная диаграмма структуры при небольшом смещении на электроде и основные процессы, ответственные за утечку заряда с нанокластера. Зона валентности рассматривается симметричной

деленных небольшими щелями порядка 0,1-0,2 эВ. Теми электронами, которые окажутся на следующих уровнях, ввиду их незначительного числа, мы пренебрежем. Однако для лучшей демонстрации мы приняли в расчетах значения E_1-E_4 , взятые из работы [4].

Доминирующим механизмом утечки заряда является квантово-механическое туннелирование [5]. Избыточные электроны, внедренные в nc-Si, pacпределяются по уровням в зоне проводимости по статистике Ферми-Дирака и могут туннелировать в подложку, прежде всего посредством прямого туннелирования, хотя и не исключено туннелирование через ловушки в SiO₂. Расчет коэффициента прозрачности барьера в стандартном Вентцеля— Крамерса—Бриллюена (ВКБ)-приближении дает следующую оценку для времени туннелирования: $\tau_t = 10^{-5}...10^{-6}$ с [6], что и определяет время деградации т. Явное противоречие с натурными данными [2] ($\tau \approx 1$ год = $3 \cdot 10^7$ с) заставляет предположить, что рассмотрения одного только туннелирования недостаточно. Кроме того, при естественном предположении, что большинство избыточных электронов туннелирует с уровня E_1 , мы получали бы слабую температурную зависимость времени деградации, что также противоречит эксперименту [5]. Далее при рассмотрении туннелирования мы будем опираться на модель Регистера [7], специально оговорив, что последняя изначально разрабатывалась для описания режимов обогащения/инверсии работы МОП-структуры (в нашем же случае мы предполагаем лишь небольшое смещение на затворе).

Предположение наличия глубоких ловушечных уровней (по крайней мере одного E_0) внутри запрещенной зоны nc-Si позволяет устранить указанные несоответствия; похожая гипотеза высказывалась на основе анализа температурной зависимости вольтамперных характеристик для системы Al/nc-Si—SiO₂/Si [11]. Заметим, что уже высказывалась гипотеза, частично поддержанная опытными данными по фотолюминесценции [3], о наличии таких глубоких уровней в смежных с nc-Si областях диэлектрика; это уточнение никоим образом не сказывается на сути нашего предположения. По-видимому, основной причиной возникновения этих ловушек являются различные особенности строения границы раздела nc-Si/SiO₂, например, оборванные химические связи; для делокализованного по nc-Si (и возможно, также по смежным областям SiO_2) электрона появляется новое собственное значение E_0 для волновой функции. При этом прямое туннелирование с E_0 в зону проводимости кремния станет маловероятным ($E_0 \le E_{\rm c}$) В этом случае при небольшом накопленном заряде будет заполняться уровень E_0 , и лишь малая часть электронов (\sim exp($-E'_{\rm g}/kT$)) в силу тепловых флуктуаций окажется на уровне E_1 . Однако при большом накопленном заряде Q = eN, когда число состояний на E_0 будет заполнено, следует ожидать ускорения процессов деградации, поскольку начнет заполняться уровень E_1 , с которого возможно туннелирование. Кроме того, резко возрастет и заселенность уровней E_2 — E_4 . Значения максимальных заселенностей уровней E_1 и E_0 можно оценить через число атомов в объеме и на поверхности nc-Si.

Ограничивающие область применимости модели предположения состоят в следующем: во-первых, избыточные электроны, каким-либо образом введенные в нанокристалл (например, инжекцией горячих носителей из канала), в каждый момент времени имеют равновесное распределение, т. е. характерное время утечки заряда существенно превышает время установления равновесия в электронном газе; во-вторых, каждый электрон описывается одноэлектронной волновой функцией, т. е. электроны в nc-Si не взаимодействуют; в-третьих, элемент флэш-памяти работает в режиме только хранения, что не исключает рассмотрения влияния небольшого смещения на затворе; в-четвертых, зона проводимости пс-Si представляется состоящей из четырех подзон, каждая из которых аппроксимируется узким энергетическим уровнем с достаточно большим вырождением, т. е. парой (E_i, G_i) , i = 1, 2, 3, 4.

Наличие заряда на nc-Si приводит к искажению энергетических уровней $E_0 - E_4$, поскольку электрон находится в поле избыточных и остающихся в системе электронов. В процессе утечки заряда это искажение постепенно устраняется. Влияние заряда в принципе может быть учтено через теорию возмущений; при этом следует рассмотреть два предельных случая: а) равномерная делокализация электронов по всему объему пс-Si; б) делокализация электронов в узком слое, прилегающем к поверхности nc-Si, включая области нестехиометрического SiO_x. Вопрос о том, какие именно химические особенности на границе раздела nc-Si/SiO₂ (включая слой SiO_v) ответственны за появление состояний в зоне проводимости и, что не менее важно, насколько они локализованы, требует проведения тщательных квантово-химических расчетов из первых принципов. Не менее важное значение имеет положение уровня Ферми µ для всех электронов, локализованных в nc-Si. Очевидно, что в процессе утечки заряда значение химического потенциала понижается к равновесному, находящемуся в середине запрещенной зоны. Также присутствие заряда на nc-Si приводит к понижению барьера для прямого туннелирования.

Следует отметить также два осложняющих модель вопроса: во-первых, о численном значении эффективной массы (при более точном подходе — тензора эффективных масс); во-вторых, об учете геометрии nc-Si (разложение волнового вектора электрона на нормальную и тангенциальную к плоскости SiO_2/Si составляющие перестает быть целесообразным). Примем эффективную массу

равной соответственно для кремния и диэлектрика $m^* = 0,2m$ и $m_d^* = 0,42m$ (эти значения обычно принимаются при расчете токов утечки в МОП-структуре), а геометрию системы формально учтем через коэффициент b = 1/6 (т. е. 1/6 часть поверхности nc-Si, имеющего, по нашему модельному предположению, сферическую форму, вносит наибольший вклад в процесс туннелирования).

2. Формулировка модели

В рамках модели можно выделить две подзадачи: 1) уточнение чувствительности к изменению заряда Q параметров электронной структуры nc-Si, прежде всего, пар "энергия — заселенность" (E_i , N_i) для уровней, и их связь с размером нанокристалла (числом N_{tot} атомов в нем); 2) вычисление проницаемости барьера и тока утечки с учетом наложения на барьер возмущения потенциала, связанного с присутствием заряда на nc-Si. Первую подзадачу мы можем решить лишь приближенно, поскольку нахождение многочастичной волновой функции для задачи с числом частиц $\sim N_{\rm tot} = 400...3000$ требует больших вычислительных затрат (из расчета 50 атомов Si на 1 нм³ для объемного материала). Даже применение приближенных методов, таких как метод псевдопотенциала или кр-теория, оказывается трудоемким. Вторая подзадача также не столь проста, поскольку требуется учесть поляризацию диэлектрика в поле заряженного nc-Si; кроме того, при вычислении туннельного тока желательно знать распределение электронов по импульсам на границе nc-Si/SiO₂.

Для нанокристалла сферической формы диаметра d число атомов кремния в объеме $N_{\rm tot}$ определяет вырожденность уровней E_1-E_4 , принимаемую нами одинаковой, а число атомов на поверхности $N_{\rm sur}$ (точнее в приповерхностном слое пс-Si толщины $h\approx 0.8$ нм [10]) коррелирует с вырожденностью, т. е. максимальной заселенностью уровня E_0 :

$$G_1 < G_2 < G_3 < G_4 \cong \frac{1}{4} 2\beta N_{\text{tot}} \cong \beta \frac{\pi}{12} \left(\frac{d}{d_{\text{Si}}}\right)^3,$$

$$G_0 = 2\alpha N_{\text{sur}} = 2\pi\alpha \left(\frac{d}{d_{\text{Si}}}\right)^2 \frac{h}{d_{\text{SiO}}}.$$
 (1)

где G — число вырождений; $d_{\rm Si}=0.24$ нм — длина связи Si—Si; $d_{\rm SiO}=0.16$ нм — длина связи Si—O; $\alpha<1$ — безразмерный коэффициент, отвечающий за долю атомов приповерхностного слоя, вносящих дефектность и дополнительные подуровни в E_0 (положим $\alpha=1/10$); $\beta\ll 1$ — также безразмерный коэффициент, учитывающий наличие (в смысле снятия вырождения) непрерывного спектра с энергиями выше дна зоны проводимости диэлектрика и наличие близко расположенных уровней

дискретного спектра (положим $\beta = 1/100$). Знаки неравенств определяются тем, что более высоким уровням энергии отвечает большее значение модуля квазиимпульса, а значит и больший фазовый объем, занимаемый фермионами при заданной энергии.

В расчетах будем полагать все числа вырождения G_1-G_4 (населенности) равными. Все уровни энергий будем отсчитывать от уровня дна зоны проводимости кремния подложки, т. е. $E_{\rm c}'=E_1$. Положение уровня Ферми (приближенно, при комнатных температурах — химического потенциала) для нанокристалла диаметра d nc-Si равно половине ширины запрещенной зоны E_G' , которую мы аппроксимируем на основании данных работы [12] зависимостью (рис. 2)

$$\mu_0 = -\frac{E_G'}{2}; E_G' = 1,136 + 2,151 \left(\frac{d}{2}\right)^{-1,63},$$

$$[d] = [HM], [\mu_0] = [\Im B]. \tag{2}$$

В произвольный момент времени химический потенциал μ отличается от μ_0 , будучи функцией от привнесенного заряда Q и расположения глубоких ловушечных уровней (E_0). При этом, очевидно, для динамики хранения заряда большое значение будет иметь знак неравенства: $\mu_0 < E_0$ или $\mu_0 > E_0$. Естественное предположение о невырожденности полупроводника обосновано тем, что инжекции в nc-Si слишком большого заряда будет препятствовать кулоновская блокада.

Для определения химического потенциала рассмотрим абстрактную задачу о (2n+1) уровнях энергии E_i с вырожденностью G_i и вброшенных в систему N_{Σ} электронов. Из записи распределения Ферми—Дирака для каждого уровня получаем полиномиальное уравнение относительно μ :

$$\varepsilon_i = \exp\left(\frac{E_i}{kT}\right); \ \mu = kT \ln z; \ \sum_{i=-n}^n \frac{G_i z}{z + \varepsilon_i} = N_{\Sigma}.$$
 (3)

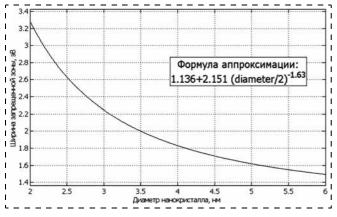


Рис. 2. Аппроксимация данных [12] по ширине запрещенной зоны в зависимости от диаметра nc-Si

В контексте нашей задачи n=4, и парам $(E_{\rm i}, G_{\rm i})$ с отрицательными i<0 отвечают дискретные уровни в валентной зоне, структура которой тоже определяется квантовым конфайнментом. Если химический потенциал отсчитывать от середины запрещенной зоны, энергии $E_i>0$ (i>0) — вверх от дна зоны проводимости, энергии $E_i>0$ (i<0) — вниз от дна зоны валентности (при этом E_1 — $E_{-1}=E_G'>E_G$), то, разлагая в ряд Тейлора члены с номерами i<0, получим

$$\frac{G_0 z}{z + \varepsilon_0} + z \exp\left(\frac{-E_G}{2kT}\right) \sum_{i=1}^n G_i \exp\left(\frac{-E_i}{kT}\right) -
- \frac{1}{z} \exp\left(\frac{-E_G}{2kT}\right) \sum_{i=1}^n G_{-i} \exp\left(\frac{-E_{-i}}{kT}\right) =
= N_{\Sigma} - \sum_{i=1}^n G_{-i}.$$
(4)

Общее число электронов N_{Σ} в (2n+1)-уровневой системе складывается из трех источников — части электронного газа нанокристалла (см. коэффициент β), электронов, предоставленных глубокими ловушками, и электронов, привнесенных извне:

$$N_{\Sigma} = \beta N_{\text{tot}} + G_0/2 + N;$$
 (5)

$$\sum_{i=1}^{n} G_{i} = \sum_{i=1}^{n} G_{-i} = \beta N_{\text{tot}}.$$
 (6)

Выполнение равенств (6), по-видимому, может быть поставлено под сомнение при более точном учете структур зон; исчисление чисел вырождения G_i является центральным вопросом, и здесь находится ничейная земля между методами физики полупроводников, успешно работающих для больших $N_{\rm tot}$, и первопринципными методами квантовой химии (начиная от метода молекулярных орбиталей), справедливых для малых $N_{\rm tot}$. Для простоты предположим симметрию зон и выполнение равенства (6).

Дальнейший способ упрощения (4) зависит от соотношения чисел вырождения G_0 и G_i , а также E_G и E_0 . Опосредованно способ расчета связан с размером d nc-Si. Учет всех трех слагаемых приводит к кубическому уравнению. Самый простой вариант, когда химический потенциал немного смещен от центра запрещенной зоны и ловушек, которые расположены также вблизи этого центра и много заселены, описывается с учетом (1) следующим условием применимости:

$$\frac{\beta}{\alpha} \ll 24 \frac{h d_{\rm Si}}{d d_{\rm SiO}} \exp\left(\frac{E_G}{2kT}\right),$$
 (7)

и итоговой формулой

$$\mu = E_0 + kT \ln \left| \frac{1 + 2N/G_0}{1 - 2N/G_0} \right|. \tag{8}$$

Хотя именно этот случай, по-видимому, реализуется на практике, для полноты рассмотрим другие три варианта. При малом числе ловушек значимы только последние два слагаемых; при этом наличие минуса в левой части (4) усложняет сопоставление с первым членом. В этом случае получаем соотношение (9):

$$\mu = kT \ln \left(\gamma + \sqrt{\gamma^2 + \gamma_0} \right), \tag{9}$$

где
$$\gamma = \exp\left(\frac{E_G}{2kT}\right) \frac{G_0 + 2N}{\sum\limits_{i=1}^{n} G_i \exp\left(\frac{-E_i}{kT}\right)}$$
;

$$\gamma_0 \equiv \sum G_{-i} \exp\left(\frac{-E_{-i}}{kT}\right) / \sum_{i=1}^n G_i \exp\left(\frac{-E_i}{kT}\right) \cong 1.$$

При сильном поднятии уровня Ферми (вплоть до состояния вырожденности полупроводника), что может быть связано с большим значением заряда Q, значимы первые два слагаемых, что дает соотношение:

$$\mu = E_0 + \frac{2G_0 + 4N}{G_0 - 2N + M + \sqrt{(G_0 - 2N)^2 + M(M + 6G_0 + 4N)}}, (10)$$

где
$$M = 2 \exp\left(\frac{E_0 - E_G/2}{kT}\right) \sum_{i=1}^{n} G_i \exp\left(\frac{-E_i}{kT}\right).$$

В формулах (8) и (10) уровень E_0 , как и химический потенциал, отсчитывается от середины запрешенной зоны (условный нуль). Предполагая $M \ll N$, получаем частное условие применимости (10), наиболее интересное для случая ловушек ниже нуля:

$$N > \frac{G_0}{2} \operatorname{th} \left(\frac{-E_0}{2kT} \right). \tag{11}$$

В рамках теории возмущений рассмотрим влияние на зонную структуру nc-Si избыточного заряда, который будем считать равномерно распределенным по шару nc-Si. Как известно, потенциал внутри равномерно заряженного шара диаметра d и диэлектрической проницаемости $\varepsilon(\varepsilon=12)$ растет квадратично с текущим радиусом r:

$$V(r) = -\frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 d} \left(3 - \frac{r^2}{(d/2)^2} \right) + V'(r);$$

$$V'(r > d/2) = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 d} \left(\frac{1}{\varepsilon_d} - \frac{1}{\varepsilon} \right). \tag{12}$$

Слагаемое V' отвечает за действие сил изображения со стороны диэлектрика и, возможно, кремния подложки (сама идеальная задача о заряжен-

ном шаре внутри бесконечной диэлектрической среды решается из общефизических соображений, $\varepsilon_d=4$; однако симметрию задачи нарушает близость плоской границы раздела $\mathrm{Si/SiO_2}$). Для вычисления поправки первого порядка к уровням энергии δE_i нужно вычислить диагональный матричный элемент с учетом номера собственной псифункции (ψ_i) (предполагаем, что вне объема пс-Si волновая функция распространяется слабо):

$$\delta E_i(N) = -e \int_{0}^{d/2} \psi_i^* V(r) \psi_i 4\pi r^2 dr.$$
 (13)

Заметим, что уже при N=10 значение потенциала становится сравнимым с постоянной Ридберга, что делает сомнительным предположение о применимости теории возмущений. Формально малым параметром является отношение $N/N_{\rm tot}$, однако значение знаменателя (12) в силу (1) должна быть взята в степени 1/3.

В общем виде, согласно модели Регистера, плотность туннельного тока, а вместе с этим и постоянная времени хранения вычисляется из дифференциального уравнения

$$\frac{dQ}{Qdt} = -\tau^{-1}(N(t)) =$$

$$= -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n} \frac{G_i f_w(E_i + \delta E_i(N)) T(E_i + \delta E_i(N))}{\exp\left(\frac{E_i + \delta E_i(N) - \mu(N)}{kT}\right) + 1}, \quad (14)$$

где f_w — вейнберговская частота соударений; T — проницаемость барьера.

Для нахождения f_w нужно знать точное выражение для пси-функции, которое будет зависеть от метода расчета энергетической структуры nc-Si. Если ограничиться оценочными соображениями, то можно воспользоваться моделью "частица в яме":

$$f_w(E) = (E - E_c)/h_P, f_w = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{2(E - E_c)}{m^*}},$$
 (15)

где h_P — постоянная Планка; E — энергия частицы; m^* — эффективная масса. Обе формулы численно дают близкий результат около 10^{14} с⁻¹, причем вторая имеет более ясный физический смысл.

В рамках ВКБ-приближения туннельный коэффициент задается (без учета предэкспоненциального множителя) выражением:

$$T_{WKB}(x) = \exp\left(-2\int_{0}^{x} 2\pi/h_{P}\sqrt{2m_{d}^{*}(V_{b} - eV_{d} - E)dx}\right), \quad (16)$$

где x — координата точки поворота, определяемой равенством $V_b - eV_d - E = 0$ (x < l, l — толщина диэлектрика в направлении туннелирования), а V_d — наведенный в диэлектрик электростатический потенциал, определяемый следующим выражением как аналитическое продолжение (12):

$$V_d(x) = -V'(d/2) - \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0(x+d/2)}.$$
 (17)

При сравнительно большой $T_{\rm WKB}$ становится существенным значение предэкспонента, а его строгое вычисление требует рассмотрения опять же знания и, прежде всего, базиса разложения волновой функции. Кроме того, туннелирование происходит в определенном растре углов, т. е. (16) должно предусматривать интегрирование. Поэтому мы ввели эмпирический коэффициент b для определения величины T, подставляемой в уравнение (14):

$$T(E) = b|T_{WKB}(d/2)|.$$
 (18)

3. Результаты расчета положения уровня Ферми

Для расчета энергии Ферми нанокристалла использовался пакет MATLAB R2009а и точная формула (3). Прикладное значение вычисления значения μ состоит в том, что оно определяет средневероятное число электронов, попадающих на самый нижний уровень в зоне проводимости, с которого возможно туннелирование. Особенно важно это для случая, когда избытка электронов недостаточно для полного заполнения уровня E_0 .

При расчете предполагалось, что в системе из (2n+1) уровней (n=4), вырожденность каждого из которых приравнивалась к G=10 электронов (без ограничения общности), находится nG единиц заряда плюс G/2 электронов, привнесенных заполненной ровно наполовину ловушкой, и N избыточных электронов. Энергия Ферми отсчитывалась от условной середины запрещенной зоны, предполагалась симметрия валентной зоны и зоны проводимости, последняя описывалась четырьмя уровнями $[E_1 \ E_2 \ E_3 \ E_4]$ (числовые значения см. выше) с поправкой $+E_G/2$. Зависимость $\mu(E_0, N)$ носит предсказуемый характер и показана на рис. 3.

При недостатке для полного заполнения уровня E_0 электронов N < G/2 положение уровня Ферми с некоторым сдвигом повторяет положение ловушечного уровня. При избытке электронов N > G/2 уровень Ферми стремится к E_1 ; резкость этого перехода слабо зависит от E_0 , составляя примерно 0,05...0,1 эВ/шт при N=5...7.

При N = G/2 и $E_0 < 0$ нами наблюдался любопытный артефакт, связанный с особенностями параметрической зависимости решения дробно-линейного уравнения (3). Он не имеет физического значения и лишь в некоторой степени является следствием какой-либо погрешности численного ме-

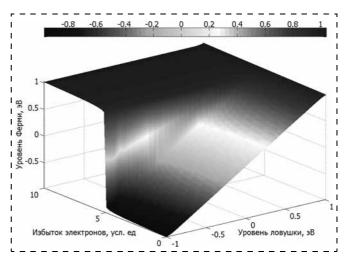


Рис. 3. Зависимость положения уровня Ферми от уровня ловушки E_0 и избытка электронов N. Параметры:

 $G = 10, E_G = 1.5 \text{ } 9B$

тода или накопления вычислительной погрешности. Мы склонны предполагать, что представленная на рис. 4 картина отражает математические свойства решения (3), зависящего от пары (E_0, E_G) или с учетом (2) от пары (E_0, d) , в особой точке N = G/2.

Для поиска решения использовалась функция fzero MATLAB. В каждой точке области вычислительный процесс неизменно сходился (флаг завершения 1) и притом достаточно быстро, судя по общим временным затратам. Не было выявлено какой-либо зависимости от шага, порога ошибки метода, значения стандартной вычислительной ошибки MATLAB eps, а также от перезапуска MATLAB (и в серии независимых запусков скрипта). Результаты расчета, тем не менее, зависели от выбора начального приближения по μ , по крайней мере в широком промежутке [0; 0,5]. Различия составляли около 0,05, поэтому мы сохранили один из случайных результатов на рис. 4.

Отсутствие особенностей при $E_0 > 0$ вполне объяснимо: наличие даже наполовину пустого уровня выше 0 приводило бы к смещению уровня Ферми вверх, в том же направлении действуют и лишние электроны в системе. При $E_0 \le 0$ оба влияния противоборствуют. Уравнение (3) несложно привести к полиномиальному виду (9-я степень по z), причем зависимость от E_0 будет присутствовать линейно во всех его коэффициентах. Даже если бы степень уравнения была только 3, запись корня уравнения содержала бы кубические радикалы (а под ними — по крайней мере кубические полиномы); и следовательно, даже для такого случая оценить число экстремумов функции затруднительно. Это частично объясняет, почему столь нерегулярен (однако и не хаотичен!) ландшафт рис. 4, отражая действительные свойства численного итерационного процесса.

Мы не сбрасываем со счетов неравноценность экспонент в уравнении (3) и необходимость ЭВМ

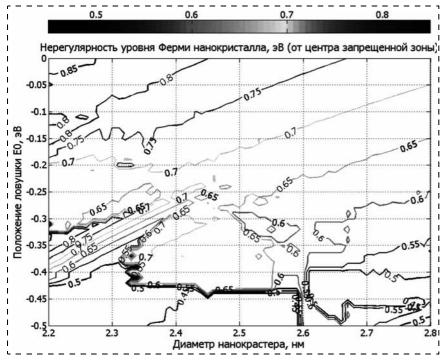


Рис. 4. Нерегулярность численного решения нелинейного уравнения (3) в особой точке N=G/2 в области $E_0<0$ на плоскости (d,E_0)

складывать большие числа с малыми по значению (как возможный источник погрешности). Однако устойчивость решения к повторным запускам скрипта отрицает влияние этого источника.

В качестве иллюстрации приведем средние заселенности уровней $E_1,\ E_2,\ E_3,\ E_4$ при ширине за-

прещенной зоны 1,5 эВ, отвечающей диаметру нанокристалла 6нм, в ситуации N = G/2 - 0,01 и $E_0 = 0,3$ эВ (считая от центра запрещенной зоны): $N_1 = 1,75 \cdot 10^{-19}$, $N_2 = 4,93 \cdot 10^{-33}$, $N_3 = 1,42 \cdot 10^{-54}$, $N_4 = 2,71 \cdot 10^{-72}$.

4. Результаты расчета времени деградации

Расчет велся по уравнению (14) без учета кинетики деградации и зависимости электронной структуры nc-Si от накопленного заряда; оценивалась только постоянная τ уравнения. Для лучшего восприятия цифр отметим, что $3 \cdot 10^8$ с примерно соответствует 10 годам. В качестве независимых переменных на рис. 5 выступают геометрические параметры: диаметр nc-Si и его расстояние (от нижнего края) до кремния подложки. Наряду с геометрией задачи определяющее влияние на

постоянную деградации оказывает эффективная масса электрона m_d^* (16) в зоне проводимости ультратонкого слоя SiO2 и положение ловушечного уровня. В работе [15] обсуждался вопрос об истинном значении эффективной массы дырок для наноразмерного слоя SiO2, отличающегося от случая объемного SiO₂; относительно электронов зоны проводимости было высказано предположение о сохранении стандартного значения 0,42. По нашему мнению, с учетом аморфной структуры SiO_2 вопрос о значении m_d^* остается открытым для конкретных практических случаев.

Сравнение графиков для различных m_d^* показывает, что время деградации существенно зависит от значения эффективной массы, которое в первую очередь обусловлено структурой ультратонкого SiO₂. В практически важной области (рис. 5: d = 4...6 нм,

l=2...3 нм) изменение этого значения в 2 раза приводит к изменению постоянной деградации на 3—4 порядка. Сравнение графиков для случая избытка (N > G/2) и недостатка (N < G/2) лишних электронов показывает, что время жизни электрона на дне зоны проводимости очень мало, что приводит

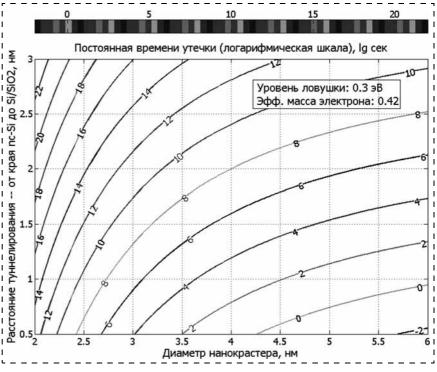


Рис. 5. Постоянная деградации при эффективной массе электрона 0,42 и уровне ловушки 0,3 эВ

к резкому уменьшению времени деградации до неприемлемого для элементов флэш-памяти уровня (10...100 с). Зависимость постоянной деградации от диаметра нанокристалла слабая, что объясняется общей картиной заселенности энергетических уровней. Сравнение графиков для разных положений ловушек показывает, что понижение уровня ловушки на 0,3 эВ вызывает увеличение постоянной деградации на шесть порядков. Это обусловлено больцмановской экспонентой для вероятности термостимулированного скачка электрона с ловушки на дно зоны проводимости. В процессе утечки заряда постоянная деградации меняется незначительно, возрастая примерно в 2—3 раза в практически значимой области.

Заключение

На основании предложенной математической модели проведено исследование времени деградации ячейки флэш-памяти, работающей в режиме хранения, в зависимости от размера нанокристаллов кремния и их расположения относительно границы раздела SiO₂/объемный Si. Показано, что на основе nc-Si возможно создать флэш-память, обладающую хорошим временем деградации (более 10 лет). Уменьшение расстояния от пс-Si до подложки (до канала МОП-транзистора) в целях получения большей чувствительности представляется достижимым, однако при этом нужно контролировать качество ультратонкого слоя SiO₂. В процессе длительной эксплуатации ячейки флэшпамяти появившиеся дефекты могут сказываться на ключевых параметрах — эффективной массе электрона в зоне проводимости SiO₂, расположении ловушечных уровней и общей емкости ловушек. Следовательно, для эффективной работы ячейки памяти необходимо стремиться улучшать качество подзатворного диэлектрика и делать свойства границы раздела nc-Si/SiO2 более контролируемыми, намеренно внося дефекты, энергетический спектр которых приближен к центру запрещенной зоны.

Для повышения надежности следует делать пс-Si более мелкими, однако более крупные пс-Si более эффективны, будучи способными хранить больший заряд. Рассмотрение относительно неблагоприятных случаев показывает, что диаметр пс-Si 3,5 нм и дистанция 2,5 нм до границы $\rm Si/SiO_2$ позволяют сохранить компромисс значения времени деградации заряда $\sim 10^8$ с.

Автор благодарит О. М. Орлова, В. А. Бурдова и А. А. Конакова за полезные замечания и обсуждение работы.

Список литературы

- 1. **Cooks M.** Flash fast forward to quantum dot memory // Semiconductor Today. Compounds & Advanced Silicon. 2008. Vol. 3, N 5. P. 45—49.
- 2. **Bu J., White M. H.** Design considerations in scaled SONOS nonvolatile memory device // Solid-State Electronics. 2001. Vol. 45. P. 113—120.
- 3. **Михайлов А. Н.** Люминесцентные свойства систем на основе оксидов с ионно-синтезированными нанокристаллами кремния / Дисс. на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат наук., Нижегородский университет, 2006. 153 с.
- 4. **Ефремов М. Д., Аржанникова С. А.,. Володин В. А., Камаев Г. Н., Марин Д. В.** Нанометровые кластеры и нанокристаллы кремния // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2007. Т. 2. Вып. 2. С. 51—60.
- 5. **Hinds B. J., Yamanaka T., Oda Sh.** Emission lifetime of polarizable charge stored in nano-crystalline Si based single-electron memory // J. of Applied Physics. 2001. Vol. 90, № 12. P. 6402—6408.
- 6. **Simmons G.** Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film // J. Appl. Phys. 1963. N 34. P. 1793—1803.
- 7. **Register L. F., Rosenbaum E., Yang K.** Analytic model for direct tunneling current in polycrystalline silicon-gate metal-oxide-semiconductor devices // Applied Phys. Letters. 1999. N 74. P. 457—459.
- 8. **Тетельбаум Д. И., Михайлов А. Н., Горшков О. Н.** и др. Свойства нанокристаллов кремния, сформированных и легированных методом ионной имплантации в различных оксидных матрицах // Нанотехника. 2006. № 3. С. 36—52.
- 9. Антонова И. В., Гуляев М. Б., Яновицкая З. Ш. Сопоставление электрических свойств и фотолюминесценции в зависимости от состава слоев SiO_{χ} , содержащих нанокристаллы кремния // Физика и техника полупроводников. 2006. Т. 40, вып. 10. С. 1229—1235.
- 10. **Ternon C., Gourbilleau F., Rizk R., Dufour C.** Si/SiO₂ multilayers: synthesis by reactive magnetron sputteringand photoluminescence emission // Physica E. 2003. N 16. P. 517—522.
- 11. **Рябчиков Ю. В., Форш П. А., Лебедев Э. А., Тимошен-ко В. Ю.** и др. Перенос носителей заряда в структуре с кремниевыми нанокристаллами, внедренными в оксидную матрицу // ФТП. 2006. Т. 40, вып. 9. С. 1079—1081.
- 12. **Konakov A. A., Burdov V. A.** Optical gap of silicon crystallites embedded in various wide-band amorphous matrices: role of environment // J. Phys.: Condens. Matter. 2010. V. 22, N 21. 215301 (8 p.).
- 13. **Ngoc Bich Nguyen, Dufour C., Petit S.** Atomic and electronic structure of silicon nanocrystals embedded in a silica matrix // J. Phys.: Condens. Matter. 2008. N 20. 455209 (8 p.)
- 14. **Seino K., Bechstedt F., Kroll P.** Influence of SiO₂ matrix on electronic and optical properties of Si nanocrystals // Nanotechnology. 2009. N 20. 135702 (8 p.)
- 15. Векслер М. И., Тягинов С. Э., Шулекин А. Ф. Транзистор с туннельным МОП-эмиттером как инструмент для определения эффективной массы дырки в тонкой пленке диоксида кремния // ФТП. 2006. Т. 40. Вып. 4. С. 498—503.

- **В. А. Акопьян**¹, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., e-mail: akop@math.rsu.ru,
- **Ю. Н. Захаров**², канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., рук. лабораторией, e-mail: delta46@mail.ru,
- **А. Е. Панич**³, д-р техн. наук, директор, e-mail: rctt@rctt.ru,
- **И. А. Паринов**¹, д-р техн. наук, зав. лаб., e-mail: ppr@math.rsu.ru,
- **Е. В. Рожков**¹, ст. науч. сотр., e-mail: rozhkov@math.rsu.ru,
- **С. Н. Шевцов**⁴, д-р техн. наук, проф., зав. лаб., e-mail: acrondstu@list.ru
- ¹ НИИ механики и прикладной математики им. И. И. Воровича, г. Ростов-на-Дону
- ² НИИ физики Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону
- ³ Научное конструкторско-технологическое бюро "Пьезоприбор" Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону
- ⁴ Южный научный центр РАН, пос. Октябрьский Ростовской обл.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ КАНТИЛЕВЕРНОГО ТИПА. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Поступила в редакцию 14.11.2011

В результате численного и экспериментального анализа электрофизических параметров пьезогенератора кантилеверного типа рассчитаны и подтверждены экспериментально оптимальные характеристики пьезогенератора, позволяющие получить его максимальную выходную мощность с высоким КПД. Приведен пример реализации малогабаритной экспериментальной модели пьезогенератора для подзарядки аккумуляторов сенсорных систем контроля параметров газа на газотрубопроводах, диагностики технического состояния высотных сооружений и маломощных устройств бытовой техники.

Ключевые слова: пьезоэлектрический генератор, конечно-элементный анализ, кантилевер, электрофизические характеристики, выходная мощность, электромеханическое преобразование

Введение

Проблема создания пьезоэлектрических генераторов (ПГ), являющихся источниками бесплатной энергии, получаемой из окружающей среды, возникла достаточно давно. Однако она пока не решена в достаточной мере из-за низкой энергоэффективности ПГ и малой выходной мощности уже

разработанных конструкций. Актуальность разрешения этой проблемы была подтверждена включением ее в числе других в Перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации. Актуальность данного исследования определяется также тем, что это научное направление входило в основные разделы программ недавних международных конференций [1-4, 10]. Краткий обзор исследований по данной проблематике приведен в работе авторов [5]. Анализ показал, что эти исследования в основном посвящены изучению характеристик ПГ, в которых используются продольные и изгибные моды колебаний, так как именно при их реализации можно получить максимальный коэффициент преобразования механической энергии окружающей среды в электрическую. В связи с этим одной из главных проблем является поиск оптимальных параметров чувствительного элемента ПГ, обеспечивающих максимальную выходную мощность. Одному из аспектов решения этой задачи и посвящена настоящая статья.

Целью исследования является конечно-элементный и экспериментальный анализ с расчетом оптимальных электрофизических и частотных характеристик ПГ кантилеверного типа, при обеспечении которых достигается максимальная выходная мощность пьезогенератора при высоком коэффициенте преобразования механической энергии в электрическую.

Исследуемые объекты: пьезоэлектрические генераторы кантилеверного типа, состоящие из двух пьезоэлементов пластинчатого типа (биморфы) на основе пьезокерамики составов ЦТС-19 с размерами $a \times b \times t$ ($10 \times 10 \times 0,5$ мм). Эти пьезоэлементы поляризованы по толщине и наклеены на поверхности подложки (кантилевера), представляющей собой тонкую пластину из стеклотекстолита Т-10-14 на связующем из эпоксидной смолы ЭДТ-10П с размерами $l_0 \times b \times t$ ($235 \times 11 \times 1$ мм). Принципиальная схема нагружающего модуля исследуемого ПГ приведена на рис. 1.

Задача решается с помощью конечно-элементного моделирования и натурного эксперимента, описывающих процесс генерирования электрического заряда при различных уровнях и типах сопротивления нагрузки и поперечных смещений подложки.

Конечно-элементное моделирование

Для поиска и выявления корреляционных соотношений и связей между электрофизическими, механическими и геометрическими параметрами исследуемой модели пьезогенератора и его выходной электрической мощности в широком диапазоне частот собственных колебаний ПГ и импеданса его чувствительного элемента было выполнено компьютерное моделирование в системе Comsol Multiphysics. Размерные и физико-механические параметры конечно-элементной модели в основ-

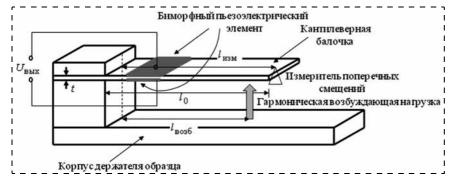


Рис. 1. Принципиальная схема нагружающего модуля пьезоэлектрического генератора кантилеверного типа

ном соответствовали физической модели, у которой состав материала пьезопластин был заменен на пьезокерамику состава ЦТС-19 (рис. 2, см. вторую сторону обложки).

Две пьезопластины размерами $10 \times 10 \times 0,5$ мм были установлены у закрепленного края балочки. Направление поляризации пластин было перпендикулярно их металлизированным плоскостям, на которых при изгибе создавался электрический потенциал. Таким образом, пьезопреобразователи работали в режиме поперечных колебаний, характеризуемых пьезомодулем d_{31} . Электрические потенциалы V_1 , V_2 , генерируемые верхней и нижней пьезопластинами, вычислялись на каждом шаге интегрирования в результате решения уравнения

$$V_i = R \int_{\Sigma} (Jds), \quad i = 1, 2, \tag{1}$$

где R — активный импеданс нагрузки, а поверхностный интеграл определяет ток в нагрузке через плотность тока J, перпендикулярного поверхности пластины ds. Вычислялись также значения электрической мощности $W_i = \sum\limits_{i=1,\,2} V_i I_i$, отдаваемой в чисто активную нагрузку. Собственным конструкционным демпфированием материала балочки пренебрегали для более четкого выделения влияния электрической нагрузки на характер диссипации энергии колебаний.

На первом этапе исследования был выполнен модальный анализ системы, который позволил определить собственные частоты первых трех мод изгибных колебаний консольной балочки в плоскости наименьшей жесткости. Исследование зависимости электрического напряжения и мощности, отдаваемой в нагрузку, проводилось при тех же значениях электрического сопротивления нагрузки, что и в натурных экспериментах, методом нестационарного анализа. Во всех численных экспериментах возбуждающая гармоническая нагрузка была приложена к нижней плоскости балочки. Характер распределения нагрузки по длине балочки, представленный на рис. 3, отвечал условиям проведения эксперимента.

Гармонические колебания возбуждались с постепенно нарастающей амплитудой (рис. 4), причем по-

стоянная времени нарастания амплитуды давления принималась равной трем периодам возбуждаемых колебаний.

В натурных экспериментах была установлена существенная зависимость электрической мощности, отдаваемой пьезопреобразователями в нагрузку, от значения этой нагрузки. Причины такой зависимости были установлены в работах авторов [6, 7], где рассматривалась зависимость частотного отклика потенциала и мощности, создаваемых гармонически де-

формирующейся вследствие растяжения—сжатия одиночной пьезопластиной, работающей в режиме поперечных колебаний. Там же было показано, что генерируемое пьезопластиной электрическое напряжение в комплексной форме имеет вид

$$V = \frac{i\omega e_{31}\delta b}{Y_L + iC_{pz}} = \frac{i\omega e_{31}\delta b}{Y_L + Y_{Cpz}},$$
 (2)

где e_{31} — пьезоэлектрическая постоянная; Y_L , Y_{Cpz} — проводимости внешней нагрузки и пьезопластины (емкостного типа) соответственно; δ — амплитуда динамического смещения конца пьезоэлемента;

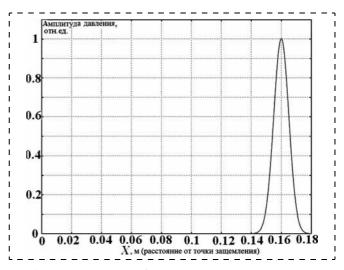


Рис. 3. Распределение возбуждающей нагрузки по нижней плоскости кантилевера

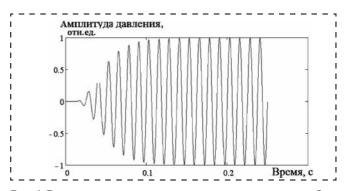


Рис. 4. Временная зависимость гармонического давления, возбуждающего колебания пьезогенератора

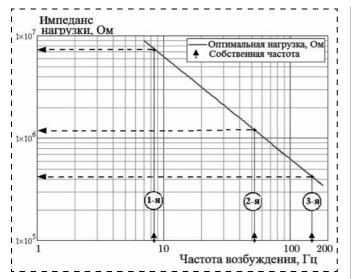


Рис. 5. Зависимость оптимального импеданса нагрузки (соответствующего максимальной мощности, отдаваемой пьезоэлементом в нагрузку) от собственной частоты первых четырех мод изгибных колебаний кантилевера

b — ширина пьезоэлемента, равная ширине подложки; ω — круговая частота; C_{pz} — емкость. При чисто активной нагрузке ($Y_L = 1/R$) модуль выражения (2) приводится к виду

$$|V| = \frac{\omega e_{31} \delta b R}{\sqrt{1 + \left(\omega R C_{pz}\right)^2}}.$$
 (3)

Из этого следует, что с ростом импеданса нагрузки R разность потенциалов на ней стремится к своему конечному пределу $e_{31}\delta b/C_{nz}$.

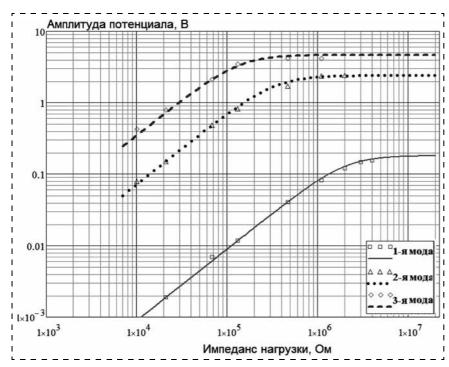


Рис. 6. Зависимость амплитуды электрического потенциала на нагрузке от ее импеданса для первых трех мод изгибных колебаний модельной балочки

Если ввести обозначения: I^* , V^* , Y_R^* — ток, напряжение и проводимость в комплексной форме соответственно, то полная электрическая мощность в комплексной форме при идеальной активной нагрузке выражается в виде

$$W_{el} = \frac{1}{2}VI^* = \frac{1}{2}VV^*Y_l^* = \frac{1}{2}\frac{\left(e_{31}\omega\delta b\right)^2}{1 + \left(R\omega C_{pz}\right)^2}R, \quad (4)$$

имеет чисто активный характер и достигает своего максимального значения

$$W_{el}^{m} = \frac{\left(e_{31}\delta b\right)^{2}}{2C_{pz}}\omega,\tag{5}$$

когда значение импеданса нагрузки равно

$$R_m = (\omega C_{pz})^{-1},\tag{6}$$

т. е. при равенстве импеданса нагрузки внутреннему импедансу пьезопластины, имеющему чисто емкостной характер. Результаты расчета оптимального импеданса нагрузки для первых четырех собственных частот изгибных колебаний исследуемого кантилевера представлены на рис. 5. Из графиков видно, что с ростом собственной частоты колебаний значение оптимального импеданса уменьшается весьма значительно. Так, при колебаниях на частоте первой моды ~15 Гц оптимальный импеданс составляет единицы мегаом, тогда как уже на второй моде при частоте ~80 Гц оптимальный импеданс имеет порядок ~500...600 кОм.

Рассмотренные соотношения были получены при исследовании пьезопластины, испытывающей деформации чистого растяжения—сжатия, поэтому выводы, полученные на основе их анализа, имеют качественный характер. Пластины, установленные на поверхности изгибаемой балочки, испытывают более сложные деформации (неоднородного растяжения — сжатия). При этом чем меньше толщина пьезопластин по сравнению с толщиной балочки и чем меньше их длина, тем более характер деформации приближается к идеальному, рассмотренному в работе [6]. Эти выводы подтвердились после обработки результатов численных экспериментов, представленных на рис. 6, 7.

Представленные на рис. 6 зависимости электрического потенциала стремятся к разным пределам при росте импеданса нагрузки, что может

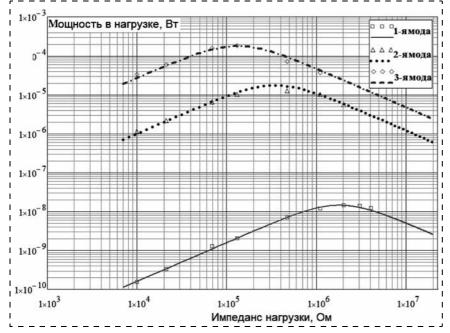


Рис. 7. Зависимость электрической мощности, отдаваемой в нагрузку, от ее импеданса для первых трех мод изгибных колебаний модельной балочки

показаться противоречащим выводу о независимости этого предела от частоты (см. формулу (3)). Однако эта разница связана с тем, что колебания в модельной балочке возбуждаются, хотя и с одинаковой амплитудой смещения свободного конца, но на разных модах колебаний. Следствием этого являются разные кривизна оси возле защемления, амплитуда колебаний и деформации в зоне установки пьезопластин.

Анализ зависимостей мощности в нагрузке, представленных на рис. 7, подтверждает их экстремальный характер, причем, как и для результата, полученного аналитически на основе упрощенной модели с одним пьезоэлементом: с ростом частоты экстремум мошности смещается в сторону меньших

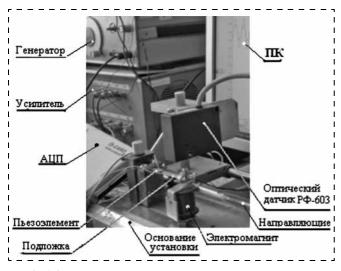


Рис. 8. Общий вид экспериментальной установки

значений импеданса нагрузки. В частности, на первой моде колебаний оптимальный импеданс, соответствующий экстремуму мощности, равен ~2 МОм, на второй 1 МОм, а на третьей около 200...400 кОм.

Так как результаты конечно-элементных расчетов получены при малых колебаниях балочки, когда выполняется линейное приближение, небольшие изменения амплитуд приложенных нагрузок и вызванных ими колебаний не могут привести к изменению характера зависимостей, представленных на рис. 7. Экспериментальные точки на графиках (рис. 6, 7) приближены кривыми, построенными с помощью соотношений (3) и (4). Их идеальное наложение на расчетные точки дополнительно подтверждает адекватность выводов, полученных в работе [6], что позволяет использовать их для

полуколичественной оценки эффективности работы создаваемого пъезогенератора.

Натурное моделирование

Натурный эксперимент по моделированию процесса генерирования электрического заряда ПГ при различных частотах возбуждения механической нагрузки и поперечных смещений кантилеверной балочки был проведен на оригинальной экспериментальной установке. Общий вид ее приведен на рис. 8, а электрическая схема измерений на рис. 9.

Установка состоит из генератора электрических сигналов 1, усилителя 2, электромагнитного возбудителя механических колебаний 3, оптического датчика механических перемещений 4, композитной пластины (подложки) 5, пьезоэлементов 6, жесткого основания 7, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и персонального компьютера (ПК). На основании закрепляются модель пьезогенератора с наклеенным на нем биморфным пьезо-

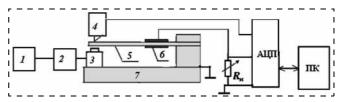


Рис. 9. Электрическая схема измерения и регистрации выходного напряжения:

I- генератор сигналов; 2- усилитель; 3- электромагнитный возбудитель колебаний; 4- оптический датчик РФ-603; 5- композитная пластина (подложка); 6- пьезоэлементы; 7- жесткое основание; АЦП - аналого-цифровой преобразователь; ПК - персональный компьютер; $R_{\rm H}-$ сопротивление нагрузки

элементом, электромагнитный возбудитель, оптический датчик и сопротивление нагрузки $R_{\rm H}$. Оптический датчик имеет возможность перемещаться вдоль образца по направляющим (см. рис. 8).

Методика натурного эксперимента

В испытуемом образце ПГ, установленном в кронштейне жесткого основания экспериментальной установки (см. рис. 8), последовательно возбуждались поперечные изгибные колебания в диапазоне частот до 144 Гц. В процессе последовательного сканирования по частоте вынужденных колебаний образца ПГ регистрировались спектры амплитудно-частотных характеристик и определялись частоты резонансов различных мод колебаний. На трех выявленных самых низких резонансах были проведены измерения поперечных смещений подложки (балочки). Одновременно с этим регистрировались значения выходного напряжения с электродов пьезоэлементов ПГ (рис. 10) при двух различных значениях сопротивления электрической нагрузки ($R_{\rm H1}=1,0~{
m MOm}$ и $R_{\rm H2}=1,13~{
m MOm}$). Было установлено, что максимальное выходное напряжение достигается на 3-й форме (моде) изгибных колебаний. Дальнейшие измерения проводились на резонансной частоте именно этой моды колебаний в точках балочки, отстоящих от защемления на расстояниях $L_{\rm изм1} = 35$ мм и $L_{\rm изм2} = 60$ мм. Эти точки совпадают с координатами форм 3-й моды колебаний с максимальными амплитудами поперечных смещений (пучностями).

Результаты измерений выходного напряжения для 3-й формы колебаний приведены в таблице.

Из данных, приведенных в таблице и на графике зависимости выходного напряжения от динамического прогиба (рис. 10), построенного по этим данным, следует, что с ростом прогиба свободного конца балочки, выходное напряжение ПГ увеличивается (при колебаниях на 3-й моде), причем его значение достигает максимального значения 4,2 В при электрическом сопротивлении нагрузки 1,0 МОм. При сопротивлении 1,13 МОм можно получить выходное напряжение с обкладок ПГ меньшее, чем в предыдущем случае, и равное 3,6 В.

Выходное напряжение с обкладок пьезогенератора кантилеверного типа при различных сопротивлениях нагрузки $R_{ m H}$

| Параметр | $R_{\rm H} = 1{,}13~{\rm MOm}$ | | | | $R_{\rm H} = 1.0 \; {\rm MOm}$ |
|--|--------------------------------|------|------|------|--------------------------------|
| Динамический прогиб кантилевера в точке $\bar{l} = 0.15 l_0$; | 0,20 | 0,30 | 0,35 | 0,90 | 0,60 |
| $\hbar = h_i/h_{ m max}$ Выходное напряжение $U_{ m Bыx}$, В | 1,00 | 1,40 | 1,45 | 3,60 | 4,20 |

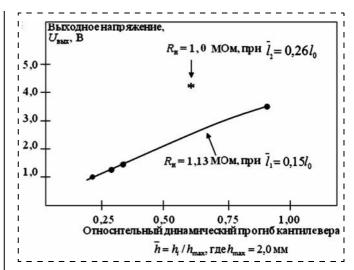


Рис. 10. Зависимость выходного напряжения ПГ (подложка $I_0=235$ мм, b=11 мм, t=0,5 мм) от динамического прогиба кантилевера на расстоянии $\overline{I}_1=0,15 I_0$ и $\overline{I}_2=0,26 I_0$ от защемления; пьезоэлементы из ЦТС-19 с размерами $10\times 10\times 0,5$ мм размещены около защемления кантилевера; электромагнитный возбудитель поперечных колебаний расположен в точке, отстоящей от защемления на расстоянии 120 мм; частота 3-й моды колебаний $f_{\rm p,3}=143,5$ $\Gamma_{\rm L}$

Это означает, что выходное напряжение ПГ зависит не только от поперечных смещений кантилеверной балочки, но и от электрической нагрузки. Из численного расчета (см. рис. 6) видно, что графики зависимостей амплитуды потенциала от импеданса нагрузки на всех трех исследованных частотах имеют ярко выраженный нелинейный характер: вначале при малых значениях нагрузки амплитуда растет, а затем при $R_{\rm H} > 3 \cdot 10^5$ Ом (для 3-й моды) рост амплитуды потенциала прекращается — кривая зависимости становится пологой. Для 1-й и 2-й мод колебаний это происходит при бо́льших значениях $R_{\rm H}$.

Максимальные значения амплитуды потенциала, полученные в расчете (см. рис. 6) и в натурном эксперименте (рис. 10) мало отличаются друг от друга. В отличие от характера зависимостей потенциала, расчетные графики зависимостей выходной мощности ПГ от электрической нагрузки имеют ярко выраженные экстремумы (см. рис. 7). Для оценки степени достоверности этой важной особенности (связь максимума мощности ПГ с уровнем электрической нагрузки) в соответствии с изложенной выше методикой натурного эксперимента были проведены измерения выходного напряжения для трех различных мод изгибных колебаний ПГ, и по их значениям были рассчитаны значения выходной электрической мощности. По результатам этих расчетов построены экспериментальные графики зависимостей мощности от нагрузки $R_{\rm H}$ (рис. 11). Характер этих зависимостей в основном подтвердил результаты численного расчета.

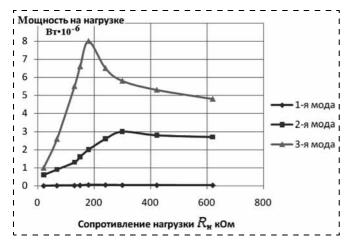


Рис. 11. Зависимость электрической мощности от сопротивления нагрузки пьезогенератора кантилеверного типа (235 × 11 × 1 мм): подложка — стеклотекстолит толщиной $\delta=1$ мм, возбуждение электромагнитом на расстоянии 70 мм от заделки, съем напряжения с одной пьезопластины ЦТС-19 размером $10 \times 10 \times 0.5$ мм, смещение свободного конца кантилевера для всех мод равно 2 мм

Сравнительный анализ результатов численного расчета и натурного эксперимента

Из графика зависимости потенциала (выходного напряжения) от электрической нагрузки, полученного из конечно-элементного (КЭ) расчета (см. рис. 6), видно, что максимальный электрический потенциал ПГ, равный 4,5 В, достигается при нагрузке (импедансе) $R_{\rm H} = 300...400$ кОм на 3-й моде колебаний. При увеличении нагрузки от 400 кОм до 1 МОм потенциал меняется слабо. В эксперименте был зарегистрирован потенциал (выходное напряжение), равный 4,2 В при $R_{\rm H} = 1,0$ МОм (см. таблицу и рис. 10). Расхождение расчетных и экспериментальных значений выходного напряжения ПГ составило 6, 7 %. Причина расхождения заключается в том, что расчет был проведен для максимального смещения балочки, равного $h_{\text{max}} = 2$ мм, а в эксперименте — для $h_{\text{max}} = 1.8$ мм (смещения регистрировались в точке, отстоящей от защемления на длине 0,26L). Кроме того, расчет и эксперимент были выполнены при разных значениях электрической нагрузки. Тем не менее, и с учетом этих отличий, в целом результаты натурного эксперимента согласуются с данными КЭ расчета. Количественное несовпадение выходной мошности $\Pi\Gamma$, полученной в КЭ расчете (10^{-4} Вт), с ее экспериментальным значением (10^{-5} Bт) обусловлено различием пьезоэлектрических характеристик материалов, использованных в расчете и в исследованной экспериментальной модели ПГ. Надежность полученных результатов была подтверждена при создании экспериментального образца малогабаритного ПГ кантилеверного типа (размеры корпуса 45×30 мм), представленного на рис. 12, максимальное выходное напряжение которого оказалось равным 5,8 В. При расчетах характеристик этого



Рис. 12. Пьезогенератор кантилеверного типа, работающий на изгибных колебаниях:

слева — вид со снятой крышкой, справа — модуль кантилевера в сборе

 $\Pi\Gamma$ были использованы методики, описанные в настоящей статье.

Из результатов КЭ анализа также следует, что выходная мощность ПГ в перспективе может быть существенно повышена благодаря уменьшению толщины пьезопластины с помощью использования в конструкции тонкопленочных пьезоэлементов. В частности, в работе [8] была выдвинута идея применения для ПГ пленочных мультиферроидных композитных структур, которые можно использовать в качестве источников энергии для сенсорных систем контроля параметров колебаний в различных объектах. Однако данные о практической реализации такого подхода пока не опубликованы. Вместе с тем ранее были опубликованы результаты исследований характеристик других тонкопленочных микрогенераторов кантилеверного типа, в которых чувствительный элемент выполнен из композитной структуры, состоящей из пленок $PZT/ZrO_2/SiO_2$ [9]. В этом устройстве удалось получить выходную электрическую мощность, равную 10^{-4} Вт при нагрузке 5,2 МОм, близкую к полученной нами мощности малогабаритного ПГ. Однако позднее [10] были опубликованы результаты конечно-элементного расчета характеристик тонкопленочного (из нитрида алюминия) микропьезогенератора (МПГ) кантилеверного типа, которые представили менее обнадеживающие результаты — выходная мощность МПГ этого типа оказалась равной 10^{-8} Вт, что на несколько порядков ниже, чем в МПГ, описанном в работе [9], а также в полученных нами результатах. Противоречивость этих сравнительных данных свидетельствует о необходимости дальнейших исследований характеристик ПГ, в том числе пьезогенераторов с тонкопленочными композитными пьезоэлементами.

Выводы

В результате компьютерного моделирования (в системе Comsol Multiphysics), дополненного данными натурного эксперимента по оценке электромеханического поведения и расчета параметров модели ПГ кантилеверного типа, было установлено следующее.

- Максимум выходной электрической мощности пьезогенератора кантилеверного типа исследованной конфигурации может быть получен при колебаниях на 3-й моде изгибных колебаний, причем в электрической схеме ПГ сопротивление электрической нагрузки должно составлять примерно 180...200 кОм.
- Описанные в статье вычислительный подход и методика конечно-элементного расчета характеристик пьезогенератора позволяют разработать его оптимальную конфигурацию и схему, которая обеспечивает получение максимальной выходной мощности ПГ малой мощности.
- ◆ Характеристики ПГ с пьезоэлементами из пьезокерамики с улучшенными свойствами (например, ПКР-78 [5]) имеют повышенную стабильность: их значения мало меняются при воздействии на ПГ больших механических напряжений, что особенно важно для их применения в эксплуатационных условиях окружающей среды. Это выгодно отличает их от ПГ с композитными чувствительными элементами.

Описанные в статье конфигурация и устройство пьезогенератора могут найти применение, в первую очередь, для автономных устройств подзарядки аккумуляторов сенсорных систем контроля параметров газа на газотрубопроводах, диагностики технического состояния высотных сооружений и в маломощных устройствах бытовой техники.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № № 10-08-00093, 10-08-00136, 10-08-13300-РТ оми, 12-08-01137-а, 12-08-01294-а).

Список литературы

- 1. **Galhardi M. A., Henrique T., Lopes V., Jr.** A review of power harvesting of mechanical vibration using piezoelectric material and applications // Proc. 7th Brasilian Conf. of Dynamics, Control and Applications. "Dincon 2008". (May 7—9, 2008, FCT-Unesp at Peesidente Prudente, SP, Brasil), 2008, P, 1—9
- Unesp at Peesidente Prudente, SP, Brasil). 2008. P. 1—9.
 2. **Antony S. R., Sadano H. A.** Review of power harvesting using piezoelectric mater // Smart Materials and Structures. 2007. Vol. 16. P. 1—21.
- 3. **Shu Y. C., Lien I. C., Wu W. J.** An improved analysis of the SSHI interface in piezoelectric energy harvesting // Smart Mater. Struct. 2007. Vol. 16. P. 2253—2264.
- 4. **Shevtsov S., AkopyanV., Rozskov E.** Damage identification in the rod-like structure on the basis of Timoshenko beam model // Proc. 5th International Symposium on Defect and Material Mechanics (ISDMM11), June 27 July 1, 2011. Seville. Spain. 2011. P. 511—530.
- 5. **Акопьян В. А., Захаров Ю. Н., Матвеев С. Ю., Панич А. А., Рожков Е. В.** Анализ стабильности электрофизических характеристик пьезокерамики различных составов, используемой для пьезоэлектрических генераторов повышенной мощности // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 1. С. 37—41.
- 6. **Shevtsov S. N., Akopyan V. A.** Piezoceramic Materials and Devices. Ch. 7. Active and passive vibration control of aircraft composite structures using power piezoelectric patch-like actuators. / Ed. I. A. Parinov. // N.-Y.: Nova Science Publishers, 2010. P. 286—323.
- 7. **Шевцов С. Н., Флек М. Б., Акопьян В. А.** и др. Технология активно-пассивного пьезоэлектрического демпфирования вибраций несущих авиационных конструкций // Наукоемкие технологии для инновационной индустрии Южного макрорегиона: Сб. научн. ст. / Ред. акад. Г. Матишов. Ростов-на-Лону: ЮНЦ РАН. 2011. С. 162—197.
- POCTOB-Ha-Дону: ЮНЦ РАН, 2011. C. 162—197. 8. **Fetisov Y. K., Kamentsev K. E., Chashin B. I.** et al. Converse magnetoelectric effect in garfenol and lead titanate zirconate bilayer // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105. N 123918. P. 1—9.
- 9. **Jeon Y. B., Sood R., Jeong J.-H., Kim S.-G.** MEMS power generator with transverse mode thin film PZT // Sensors and Actuators. A. 2005. Vol. 122. N 1. P. 16—22.
- 10. **Pallapa M., Aly M. A. S., Chen A. I. H.** et al. Modeling and Simulation of a Piezoelectric Micro-Power Generator // Proc. of the 7th Comsol Conf. October 13—15, 2010. Boston. USA. 2011. P. 334—337.

Применение МНСТ

УДК 621.3.049.77.025.5

С. М. Алфимов, нач. отдела, ОАО "ГАК "Рособоронпромкомплекс", г. Москва

МИКРОРОБОТОТЕХНИКА СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ: СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

Поступила в редакцию 12.12.2011

Анализируется состояние многокомпонентной микроробототехники и тенденции ее развития. Обосновывается состав функциональных задач, решаемых микророботами, и структура унифицированной бортовой системы управления.

Ключевые слова: микросистема, микроробот, элементы, компоненты, автономность, унификация

Перспективы применения микросистемной техники и базовые положения концепции ее развития в системах военного назначения сложились к началу века и были опубликованы в 2004 г. в журнале "Оборонная техника" № 7—8 [1]. С того момента

прошло достаточно много времени и на фоне бурного развития в мире данного направления появилась естественная необходимость введения некоторых существенных дополнений. Базой для размышлений стало, в первую очередь, активное развитие микроробототехники как одного из приоритетных направлений, интегрирующих широкий спектр достижений в области микросистемной техники. Следует подчеркнуть, что на западе проблема применения микроробототехники в задачах специального назначения давно перешла из фазы обсуждения в фазу активной реализации. Этому в значительной степени способствовали фундаментальные исследования в области микроробототехники, проводимые в Калифорнийском университете и университете Карнеги Меллон (США), Токийском университете, университетах Хельсинки и Тампере, институте микротехнологий в Майнце (Германия) и др.

Анализируя данные, которые приводит JFR — Международная федерация по робототехнике — необходимо отметить два важных аспекта. Первый аспект — бурное развитие робототехники специального назначения (рис. 1). JFR много лет успешно занималась анализом и обобщением достижений в области промышленной робототехники, а примерно с

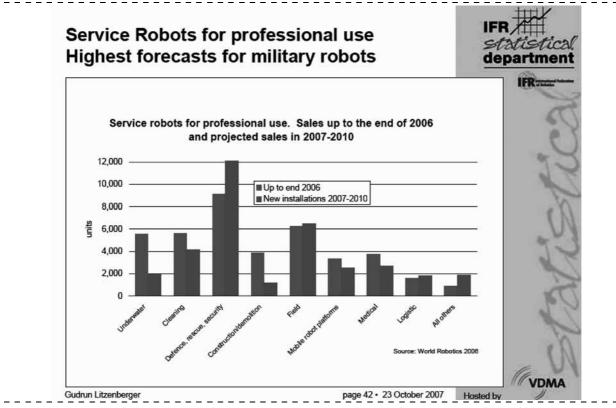


Рис. 1. Диаграмма продаж роботов (включая роботы специального назначения) на 2006 г. и прогноз на 2007—2010 гг.

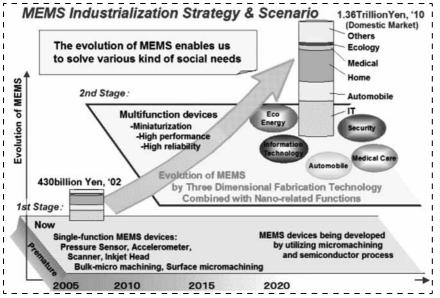


Рис. 2. Тенденции расширения областей применения MEMS-технологий (URL: http://www.mmc.or.jp/e/e)

2005 г. стала публиковать данные и по специальной робототехнике, поскольку эта отрасль стала занимать самостоятельное, важное значение, имеющее большие перспективы и большой рынок.

Второй аспект — активное внедрение MEMSтехнологий при создании средств робототехники. Причем, как видно из рис. 2, MEMS специального назначения (Security) занимают весьма существенную долю в общем объеме микросистемной продукции (наряду с автомобилестроением, медициной, экологией и т. д.).

Для того чтобы провести обоснованный анализ сегодняшнего состояния дел и выявить основные тенденции, необходимо обратиться к основным определениям, связанным с предметом анализа [2].

Микросистема — совокупность микроэлектронных управляющих и функциональных исполнительных элементов и компонентов в едином конструктивном исполнении, принцип действия которых основан на электрофизических, электромеханических, электронно-оптических, фотохимических процессах

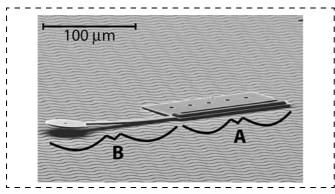


Рис. 3. Общий вид экспериментального образца мобильного микроробота. Dart-mouth College Micro-Robots (Dartmouth College, USA) под электронным микроскопом: движитель линейных перемещений (А) и поворотов (В)

и явлениях с учетом эффектов масштабирования при переходе от макро- к микро- и наноразмерным уровням и предназначенных для реализации функций приема, преобразования, хранения, передачи информации, энергии и движения для выполнения функции конечного назначения в заданных режимах эксплуатации.

Очевидно, что микроробототехника (MPT) вполне подходит под это общее определение.

В соответствии с терминологией, предложенной в работе [2], микросистемы (МС) целесообразно подразделить на следующие.

• МС многокомпонентные

Компонент микросистемы — часть микросистемы или функционального устройства, реализующая определенную функцию в составе функционального

устройства или микросистемы, которая может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации.

• МС многоэлементные

Элемент микросистемы — часть микросистемы или функционального микроустройства, реализующая определенную функцию в составе функционального устройства или микросистемы, которая не может быть выделена как самостоятельное из-

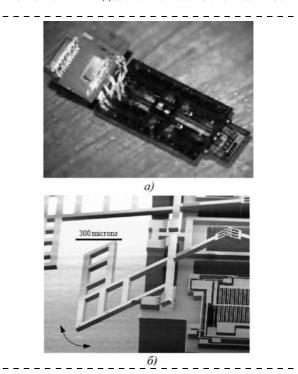


Рис. 4 Автономный шагающий микроробот Silicon Microrobot (University of California, Berkeley, USA):

общий вид (а); одностепенные движители (б)

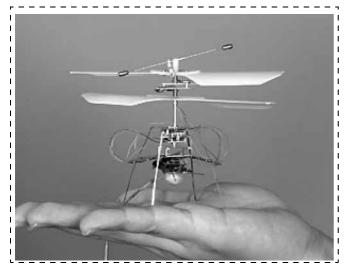


Рис. 5 FR-II (Seiko Epson Corp, Japan) — экспериментальный образец летающего микроробота

делие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации.

В качестве многоэлементных МС можно привести только единицы зарубежных примеров и то в виде сугубо исследовательских версий (рис. 3, 4). Отечественных примеров по существу нет. Поэтому данное направление подробно анализировать сейчас не будем, хотя следует сделать предположение, что развитие микроэлектроники и нанотехнологий в ближайшие несколько лет может дать очень интересные образцы принципиально новой техники.

Более пристальное внимание пока следует уделить многокомпонентным МС (или, соответственно, многокомпонентной МРТ). Примеров разработок микророботов за рубежом очень много. Характерно, что эти примеры можно найти в открытой печати, а многие из образцов (или отдельные эле-

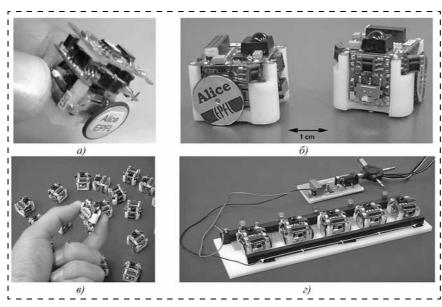
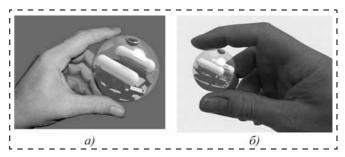


Рис. 6. Автономный мобильный мини-робот Alice (ETH-EPFL Switzerland): прототипный образец 1999 г. (а); образец 2002 г. (б); серийные образцы (в); устройство автоматической подзарядки (г)



Puc. 9. Hopping Microrobots (Massachusetts Institute of Technology, USA) — экспериментальные образцы автономного мобильного миниробота для сбора разнородной информации в экстремальных спелах

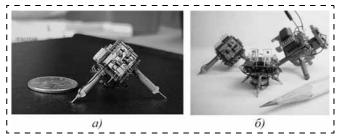


Рис. 10. Автономный шагающий миниробот NanoWalker (MIT, USA):

экспериментальный (а) и прототипный (б) образцы

менты) купить в магазине. Наиболее характерные примеры приведены на рис. 5-10 (рис. 7, 8 на второй стороне обложки).

Для развития МРТ характерны две тенденции:

- уменьшение год от года ее габаритных размеров;
- повышение степени интеллектуальности бортовых систем управления (рис. 11) и соответственно степени автономности микророботов.

Характер этих тенденций во многом объясняется успехами в области новых высоких технологий,

направленных на создание устройств микросистемной техники различных типов и назначения:

- микроэлектромеханические системы и машины;
- оптомеханические системы;
- биотехнические микросистемы;
- микросистемы энергообеспечения;
- сенсорные микросистемы;
- микроаналитические системы;
- технологические системы;
- микроробототехнические системы.

Обзор различных источников по работам над созданием микророботов, обобщение тенденций, наблюдаемых в этой области, позволяют с высокой степенью достоверности определить перечень основных угроз, связанных с целенаправленным применением подобных средств для организации различного рода нападений и террористических атак. Наибо-

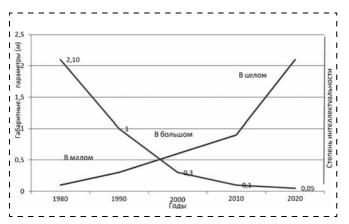


Рис. 11. Тенденции развития средств мобильной робототехники: уменьшение габаритных размеров мобильных роботов; расширение диапазона функциональных характеристик и интеллектуальных свойств систем управления (повышение степени интеллектуальности)

лее очевидные типы таких угроз, выявляемые исходя из анализа функциональных образцов микророботов, включают:

- оперативное развертывание самоформирующихся мобильных сенсорных сетей для скрытого мониторинга обстановки, распределенного сбора и обобщения разнородных данных об охраняемых объектах и прилегающих территориях, построения информационных полей;
- скрытое картографирование охраняемых объектов и территорий, несанкционированное составление планов помещений и коммуникаций;
- скрытая доставка и эвакуация спецгрузов, устройств и оборудования различного целевого назначения;
- скрытая доставка и активизация взрывных и других устройств для нарушения безопасности жизнедеятельности и проведения террористических атак;
- скрытое целенаправленное нарушение работы защитных, охранных и коммуникационных систем, компьютерных сетей, специального оборудования и т. д.;
- скрытая установка маяков целеуказания и наведения управляемых средств дистанционного поражения и др.

Следует отметить, что широкий спектр атакующих операций может осуществляться с помощью как отдельных микророботов, так и на базе их массового использования с тесным взаимодействием в составе специализированных группировок. При этом скрытность проведения атакующих операций будет обеспечиваться не только за счет соответственно предпринимаемых мер, но и во многом обусловливаться сложностями технического выявления и наблюдения микророботов, обладающих радио, визуальной и другими типами свойств малозаметности и способных функционировать в автономном режиме.

Выявленный характер возможных типов атакующих действий с применением микророботов находит свое подтверждение в рамках ряда специальных материалов. Так, в частности, в разработанной по заказу Агентства перспективных оборонных исследований США (DARPA) концепции имеется раздел, который регламентирует использование средств мини- и микроробототехники для решения задач распределенной локализации и картографирования охраняемых объектов и территорий. В частности, эта концепция предполагает скрытую заброску группы роботов на территорию представляющего интерес объекта или здания, ее последующее исследование и картографирование с выявлением элементов, требующих повышенного внимания. Содержимое данных материалов и форма их представления имеют не только самостоятельный интерес, но с учетом специфики Заказчика разработки и его принадлежности к структурам государственного уровня неявно свидетельствуют о ведении в США закрытых работ по созданию микророботов специального назначения, а также по разработке тактики и методик их применения в интересах соответствующих силовых служб для решения задач по организации атакующих действий, по несанкционированному сбору информации и т. д. С большой долей уверенности можно предположить, что аналогичные работы ведутся и в других развитых странах.

Рассмотрим положение дел в России. Что касается отдельных компонентов, то, как показывает анализ, проведенный в работе [3], в России имеется достаточно много различных исследовательских и опытно-конструкторских разработок, включая датчики, различные сенсоры, микроакселерометры и гироскопы, микродвигатели и т. д., и эти компоненты, естественно, найдут свое место в различных изделиях медицинского назначения, в автомобилестроении, аэрокосмической технике и др.

Однако если говорить о МРТ, то нет главного системы. Очевидно, что более правильным является путь "от системы к элементам", чем "от имеющихся элементов к системе". В противном случае придем к тупиковому решению, как бывало не раз, когда нарушался системный принцип. Создание перспективных образцов МРТ мини- и микроклассов связано с разработкой бортовых систем управления, которые должны отвечать целому ряду достаточно жестких и противоречивых требований по высокой степени надежности и качества, по продолжительности функционирования в экстремальных условиях боевой обстановки, по обеспечению возможностей как дистанционного, так и автономного режимов работы, по адаптации к изменению целевого состава измерительно-информационных средств и дополнительного навесного оборудования для решения широкого спектра различных прикладных задач.



Рис. 12. Функциональные задачи, решаемые мобильными микророботами

Прежде чем обосновывать общие требования к бортовой системе управления, рассмотрим основные функциональные задачи, решаемые мобильной МРТ (рис. 12).

Очевидно, что эти задачи являются общими для МРТ различного вида базирования. Отличия будут в отдельных частных вопросах, например, в принципах построения систем навигации подводных и наземных аппаратов, в исполнительных подсистемах воздушной и наземной МРТ и др. Однако это, действительно, частная проблема. Поэтому исходя из общности функциональных задач обобщенную структуру бортовой системы управления можно представить в виде, показанном на рис. 13.

Обеспечение необходимых режимов управления, основанных на отработке как уставок от ручных манипуляторов типа джойстиков, так и командных целеуказаний на электронной карте или на видеокадре изображения с бортовой телекамеры, предполагает необходимость разделения функций

Автономный Удаленный источник терминал Бортовая СУ питания 1 процессор Система ИСУ технического Телекамера поведением зрения Навигационная ИСУ Датчик движением система III процессор Привод Шаговые двигатели

Рис. 13. Обобщенная структура универсальной бортовой интеллектуальной системы управления мобильного микроробота

обработки входной информации, принятия решений и формирования воздействий на исполнительные двигатели. Для реализации подобного подхода структура бортовой системы управления предусматривает наличие трех взаимосвязанных процессоров, ориентированных соответственно на решение задач обработки сенсорной информации с навигационных и других типов датчиков, принятия решений и формирования воздействий на исполнительные двигатели.

Подобная схема построения позволяет не только повысить общую производительность и функциональные возможности системы, но и обеспечить ее высокую надежность за счет перераспределения задач в многопроцессорной структуре при выходе из строя одного из ее элементов.

Принципиальной чертой построения аппаратных средств бортового электронно-вычислительного комплекса должна явиться возможность поддержки интеллектуальных алгоритмов, построенных на основе современных технологий обработки знаний и обеспечивающих решение всего спектра задач обработки информации и управления мобильного микроробота как в дистанционном, так и в автономном режимах, т. е. возможность создания интеллектуальных систем управления (ИСУ).

Подключение бортового вычислителя к датчикам и исполнительным подсистемам можно осуществить через стандартные протоколы типа CAN, UART, USERT. Единственное требование при этом состоит в том, чтобы выходы датчиков и входы исполнительных элементов были цифровыми.

Что касается требований к процессорам бортового вычислителя, то в качестве базового варианта можно рассматривать сигнальные многоядерные процессоры типа TMS или их отечественные аналоги. Достаточно очевидно, что трехпроцессорная

система способна обеспечить (см. рис. 13) решение задач обработки разнородных сенсорных данных и построения единого информационного пространства, принятия решений (ИСУ поведением) и формирования законов управления (ИСУ движением), а также их последующей реализации на уровне исполнительных устройств (привод). Большая перспектива для использования в качестве электронно-вычислительного ядра бортовой системы имеется у ПЛИС, которые по мере их дальнейшего развития могут обладать не только характеристиками, соизмеримыми с характеристиками сигнальных процессоров, но и существенной гибкостью, обеспечивающей им универсальность применения, т. е. решение

различного рода задач на всех уровнях иерархии управления.

Обращаясь к обобщенной схеме, приведенной на рис. 13, важно подчеркнуть, что она обеспечивает унифицированный подход к построению бортовых систем управления МРТ различного вида базирования. При этом отмеченные выше важные различия не являются помехой для развития такого унифицированного подхода, применение которого обеспечит:

- возможность использования в роботах любого класса:
- реализацию режимов автономного, полуавтономного и дистанционного управления;
- использование единой технологии программирования миссий;
- высокую ремонтопригодность;
- единую технологию подготовки бойцов-операторов;
- возможность реализации мультиагентного взаимодействия;
- единую технологию взаимодействия с АСУ войсками.

Следует подчеркнуть, что развитие унифицированного подхода является крайне важным при создании мультиагентных робототехнических систем. При этом на бортовую систему управления ложится дополнительная задача — обработки информации от других агентов системы. Однако мощности трех процессоров должно хватить и на решение этой задачи, особенно если ограничиться передачей метаданных от одних роботов к другим. Но это отдельная научная проблема, которая уже решается за пределами данной статьи. Важно отметить другое: по мере появления новых практических результатов в области самообучения и прогнозирования можно наращивать программно-алгоритмическое обеспечение бортовой системы и тем самым повышать степень интеллектуальности и автономности МРТ, не изменяя состава аппаратной части.

Обобщая основные положения данной статьи, можно констатировать следующее:

- микроробототехника активно развивается как перспективная область МСТ военного назначения, интегрирующая широкий спектр достижений в области МСТ;
- состояние отечественных научных исследований находится на уровне мировых результатов, хотя этап перехода к практическим разработкам неоправданно затягивается;

- своевременная и сбалансированная постановка НИР и ОКР может обеспечить создание в России конкурентоспособной МРТ военного и специального назначения;
- в основу создания отечественной МРТ должен быть положен принцип "от системы в целом к отдельным элементам, унификация и стандартизация";
- использование стандартных протоколов типа CAN, UART, USERT позволит создать гибкую информационную подсистему за счет подключения любых датчиков с цифровым выходом;
- повышение степени автономности МРТ должно осуществляться за счет повышения степени интеллектуальности системы; последнее должно обеспечиваться на основе наращивания только программно-алгоритмического обеспечения без усложнения аппаратных средств.

Кроме того, можно сформулировать и приоритетные направления фундаментальных, поисковых и прикладных НИР по созданию микроробототехники:

- фундаментальные и поисковые исследования путей создания многоэлементной микроробототехники;
- развитие технологии ПЛИС и сигнальных многоядерных процессоров для создания многопроцессорных бортовых систем управления многокомпонентными микророботами;
- совершенствование и разработка новых типов систем навигации;
- комплексная обработка разнородной информации на основе интеллектуальных технологий;
- методы и алгоритмы планирования поведения, включая самообучение и прогнозирование развития событий;
- человеко-машинный интерфейс, включая интерфейс для постановки задачи отдельным микророботам или их группировкам и интерфейс для обмена информацией между микророботами.

Список литературы

- 1. Алфимов С. М., Мальцев П. П., Золотов И. Ю., Иванов А. А. Перспективы применения микросистемной техники в военном деле // Оборонная техника, 2004. № 7—8. С. 23—29.
- 2. Алфимов С. М. О введении стандартов по микросистемной технике // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 11.
- 3. **Климов Д. М., Васильев А. А., Лучинин В. В., Мальцев П. П.** Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. 1999. № 1.
- 4. **Макаров И. М.** От интеллектуальных агентов к мультиагентным робототехническим системам // Мат. 5-й Всероссийской конференции "Перспективные системы и задачи управления". Домбай, 2010.

CONTENTS

| Maltsev P. P., Bocharov L. Yu. The Characteristic of a Condition and Course of Realization of the US Program Research and Development in Area Nanotechnology (National Nanotechnology Initiative) |
|---|
| Ageev O. A., Ilin O. I., Kolomiytsev A. S., Konoplev B. G., Rubashkina M. V., Smirnov V. A., Fedotov A. A Determination of Geometrical Parameters of Vertically Aligned Carbon Nanotube Forest by Atomic Force Microscopy |
| Ichkitidze L. P., Ryndina T. S., Selichshev S. V., Ponomareva O. V., Tabulina L. V., Shulitsky B. G., Galperin V. A., Shaman Yu. P., Blagov E. V. Bulk Composite Nanomaterial Based on Protein and Multiwall Carbon Nanotubes |
| Mustafaev A. G., Savinova A. M., Mirzaeva P. M. Integral Element Structures Forming Process Management |

Keywords: microelectromechanical systems, MEMS, space researchers, wireless autonomous battery-free sensors, communication technics, microoptoelectrostatic switchers, government support, academician mobility, multichannel module for pressure measuring

Keywords: terahertz radiation, detector, direct detection, heterodyne detection, frequency band, sensitivity

Matyushkin I. V. The Estimation of Charge Retention Time for Si Nanocrystals Flash Memory Cell. 34 In the framework of (2n + 1)-levels (n = 4) band structure model of the Si-nanocrystal, as a carrier of charge, the Fermi level value is considered. It is shown that the typical time charge leakage to the bulk Si is: for conduction band electrons — less than 10 s (up to microseconds, depending on the tunnel SiO₂ layer thickness), for electrons in a trap — more than 10 years.

Keywords: silicon nanocrystals (nc-Si), non-volatile memory, retention time, Fermi level

Akopyan V. A., Zakharov Yu. N., Panich A. E., Parinov I. A., Rozhkov E. V., Shevtsov S. N. Effectiveness of Piezoelectric Generators of Cantilever Type: Theoretical Estimates and Experimental Results 42 As a result of computational and test analysis of electric physical parameters of the cantilever type piezoelectric generator (PG), the PG optimal parameters have been calculated and confirmed allowing one to obtain maximal output power with high useful action factor. It has been presented an example of realizing small-size experimental model of PG for accumulator charging sensor control systems of gas parameters in gastubing, diagnostics of technical state of high-height buildings and low-power devices of household appliances. **Keywords:** piezoelectric generator, finite-element analysis, cantilever, electric physical characteristics, output power, electric mechanical transformation

Keywords: microsystem, microrobot, elements, components, autonomy, unification

For foreign subscribers:

Journal of "NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE" (Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, ISSN 1813-8586)

The journal bought since november 1999. Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev

ISSN 1813-8586.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(499) 269-5510.

E-mail: nmst@novtex.ru; http://novtex.ru/nmst/

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@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 T. H. Погорелова. Технический редактор E. M. Патрушева. Корректор T. B. Пчелкина

Сдано в набор 18.01.2012. Подписано в печать 21.02.2012. Формат 60×88 1/8. Заказ МС312.

Цена договорная

Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнз».

Отпечатано в ООО «Адвансед солюшнз». 105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 5/7, стр. 2, офис 2.