

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 5 ✧ 2005

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Издается с 1999 г.

Главный редактор
Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора
Лучинин В. В.

Редакционный совет:

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

Редакционная коллегия:

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

Отв. секретарь
Лысенко А. В.

Редакция:
Безменова М. Ю.
Григорин-Рябова Е. В.

Учредитель:
Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

- Лучинин В. В. Введение в индустрию наносистем 2
Максимов Г. А., Николичев Д. Е., Филатов Д. О. Локальный анализ нанокластеров GeSi/Si методом растровой Оже-микроскопии. 9
Дедков Г. В. О диссипации механической энергии в динамическом режиме силового зондового микроскопа в вакууме 14

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

- Якимов А. И., Двуреченский А. В., Никифоров А. И. Фотоприемники на базе гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge для волоконно-оптических линий связи 19

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

- Гайкович К. П., Дряхлушин В. Ф., Николичев Д. Е. Деконволюция изображений в сканирующей Оже-микроскопии и в сканирующей электронной микроскопии. 30

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

- Рябко М. В., Никитов С. А., Чаморовский Ю. К. Микроструктурные волокна. 33

СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

- Мальцев П. П. Системы на кристалле: терминология и новые книги 43

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

- 47

СТРАНИЧКА РФФИ

- 51

ИНФОРМАЦИЯ

- 53

Contents

- 56

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

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

ПОДПИСКА:

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

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 621.3

В. В. Лучинин, д-р техн. наук, проф.
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет

ВВЕДЕНИЕ В ИНДУСТРИЮ НАНОСИСТЕМ

Представлен системный подход к индустрии наносистем как приоритетному направлению развития науки и техники.

Дано определение основных понятий, используемых в индустрии наносистем, и определен ее научно-производственный и образовательный базис с учетом интеграции с приоритетными направлениями развития науки, техники и технологии.

Введение

В социально-экономических приоритетах государства особое место должно занимать развитие наукоемких отраслей производства с высоким уровнем добавленной стоимости. Для лидеров мировой экономики на современном этапе, таким направлением, безусловно, является **нанотехнология** [1, 2].

Целью настоящей статьи является краткое изложение системного подхода к **"индустрии наносистем"**, как приоритетному направлению развития науки и техники, фактору, определяющему повышение роли высоких технологий в экономике государства, стимулирующему решение социально-значимой для России задачи: "сохранению человеческого капитала" — носителя генетического, культурного и технологического наследий.

Методологические основы индустрии наносистем

В наших более ранних работах [3, 4] отмечалось, что в основе научно-технического прорыва на наноуровне, форсируемого промышленно развитыми странами, лежит *использование новых, ранее не известных свойств и функциональных возможностей материальных систем при переходе к наномасштабам, определяемых особенностями процессов переноса и распределения зарядов, энергии, массы и информации при наноструктурировании.*

Возьмем на себя ответственность изложить некоторые методические понятийные аспекты нового научно-технического направления.

Обратимся к важнейшему фактору — геометрическому размеру и приставке "нано", входящей в ряд основных, наиболее часто используемых в официальных документах, понятий: *нанотехнология, наноматериалы, наносистемы.*

Первоначально обратим внимание на исходные смысловые значения наиболее часто употребляемых приставок, идентифицирующих характеристические и геометрические размеры изучаемых объектов:

микро- (от греч. mikros — малый);

нано- (от греч. nannos — карлик).

Применительно к индустрии наносистем границы геометрического фактора в отношении возникновения новых нетрадиционных свойств, не присущих макро- и микросистемам, формально определены от единиц до 100 нм [5]. Однако вполне очевидно, что некоторый характеристический размер, идентифицирующий изучаемый объект по геометрическому параметру (толщина пленки, диаметр кластера или нанотрубки), должен рассматриваться не просто как абсолютная величина, а в отношении к определенным фундаментальным параметрам материалов, имеющим аналогичную метрическую размерность. Особенно сложно определить границы геометрического фактора применительно к биоорганическим объектам, обладающим многообразием связей и конформаций. Поэтому приставка "нано" скорее особое обобщенное отражение объектов исследований, прогнозируемых явлений, эффектов и способов их описания, чем просто характеристика протяженности базового структурного элемента.

Необходимость данного замечания обусловлена следующим. К сожалению, термины *"наноматериалы"* и *"нанотехнологии"* стали настолько модными и "экономически привлекательными", что многие традиционные разработки атомно-молекулярного уровня искусственно приобрели имидж *"нано"*. Наряду с определенной конъюнктурой, это безусловно связано и с тем, что, как отмечалось в предисловии редактора русского перевода к одной из первых в России иностранных книг по нанотехнологии [6], **"нигде не проводится систематизация объектов и процессов нанотехнологии"**.

Развивая и обобщая наши представления об индустрии наносистем [3, 4], а также анализируя ранее опубликованные работы [1, 2, 5, 6, 7], вынесем на обсуждение ряд базовых понятий с приставкой "нано", наиболее полно отражающих именно проявление функционально-системных свойств, а не только чисто геометрических особенностей (параметров) объектов.

Наносистема — материальный объект в виде упорядоченных или самоупорядоченных, связанных между собой элементов с нанометрическими характеристическими размерами, кооперация которых обеспечивает возникновение у объекта новых свойств, проявляющихся в виде квантово-размер-

ных, синергетически-кооперативных, "гигантских" эффектов и других явлений и процессов, связанных с проявлением наномасштабных факторов.

Наноматериалы — вещества и композиции веществ, представляющие собой искусственно или естественно упорядоченную или неупорядоченную систему базовых элементов с нанометрическими характеристическими размерами и особым проявлением физического и (или) химического взаимодействий при кооперации наноразмерных элементов, обеспечивающих возникновение у материалов и систем совокупности ранее неизвестных механических, химических, электрофизических, оптических, теплофизических и других свойств, определяемых проявлением наномасштабных факторов.

Нанотехнология — совокупность методов и способов синтеза, сборки, структуро- и формообразования, нанесения, удаления и модифицирования материалов, включая систему знаний, навыков, умений, аппаратное, материаловедческое, метрологическое, информационное обеспечение процессов и технологических операций, направленных на создание материалов и систем с новыми свойствами, обусловленными проявлением наномасштабных факторов.

Нанодиагностика — совокупность специализированных методов исследований, направленных на изучение структурных, морфолого-топологических, механических, электрофизических, оптических, биологических характеристик наноматериалов и наносистем, анализ нанокolicеств вещества, измерение метрических параметров с наноточностью.

Наносистемотехника — совокупность методов моделирования, проектирования и конструирования изделий различного функционального назначения, в том числе наноматериалов, микро- и наносистем с широким использованием квантово-размерных, кооперативно-синергетических, гигантских эффектов и других явлений и процессов, проявляющихся в условиях материальных объектов с нанометрическими характеристическими размерами элементов.

Наряду с определением ранее указанных понятий, основой которых, в первую очередь, является естественно-научный базис, сделаем попытку представить широко используемые в литературе термины [1], вызывающие неоднозначное их восприятие.

Нанонаука — система знаний, основанная на описании, объяснении и предсказании свойств материальных объектов с нанометрическими характеристическими размерами или систем более высокого метрического уровня, упорядоченных или самоупорядоченных на основе наноразмерных элементов.

Нанотехника — машины, механизмы, приборы, устройства, материалы, созданные с использова-

нием новых свойств и функциональных возможностей систем при переходе к наномасштабам и обладающие ранее недостижимыми массогабаритными и энергетическими показателями, технико-экономическими параметрами и функциональными возможностями.

Фундаментальные основы индустрии наносистем

В основе системы знаний об объекте исследований безусловно лежит анализ его вещественно-материального базиса, структурного упорядочения и устойчивости, пространственно-временной организации, а также количественное и качественное проявление традиционных и ранее неизвестных свойств в зависимости от условий синтеза и функционирования.

В качестве объекта исследований в рамках данной статьи была выбрана совокупность ранее представленных понятий (наноматериалы, нанотехно-

Таблица 1
Характеристика "Индустрии наносистем"

Направление развития	Функциональные особенности
Наноматериалы	
<ul style="list-style-type: none"> • 0-мерные: квантовые точки • 1-мерные: квантовые нити, нанотрубки, нановолокна, линейные полимеры • 2-мерные: квантовые ямы, сверхрешетки, пленки Ленгмюра—Блоджетт, биомембраны • 3-мерные: нанокомпозиты, фуллерены, фуллероиды, астралены, мицеллы, биоорганические полимеры 	<ul style="list-style-type: none"> • Легкость • Прочность • Стойкость • Эластичность • Биосовместимость • Селективность • Энергоемкость • Память
Нанотехнология	
<ul style="list-style-type: none"> • Атомно-молекулярное на- слайвание • Атомно-молекулярная сборка и самосборка • Атомно-молекулярное моди- фицирование и удаление • Атомно-молекулярная селек- ция • Неравновесный синтез 	<ul style="list-style-type: none"> • Наноточность • Нанолокализация • Нанопозиционирование • Наноизбирательность • Нанокатализ • Самоформирование • Самоорганизация
Нанодиагностика	
<ul style="list-style-type: none"> • Атомно-зондовая микроскопия • Электронная микроскопия и спектроскопия • Масс-спектрометрия • Оптическая спектроскопия • Дифрактометрия • Эллипсометрия • Электрофорез • Хроматография • Парамагнитный резонанс 	<ul style="list-style-type: none"> • Наноточность • Наночувствительность • Нанокolicество
Наносистемотехника	
<ul style="list-style-type: none"> • Кооперативность • Избирательность • Полиморфизм • Распределенность • Интеграция синтеза и функ- ционирования 	<ul style="list-style-type: none"> • Наномасштабирование • Квантовые размерные эф- фекты • Синергетические эффекты • "Гигантские" эффекты • Ассоциативные эффекты • Неравновесные процессы

логия, нанодиагностика, наносистемотехника) и предпринята попытка выделения комплекса их функциональных особенностей, отражающих облик "индустрии наносистем" (табл. 1).

Наиболее характерными проявлениями "наномира" даже по сравнению с традиционными объектами с микроскопическими характеристическими размерами следует признать:

- появление нетрадиционных видов симметрии и особых видов сопряжения границ раздела, конфигураций с динамически перестраиваемой структурой;
- доминирование над процессами искусственного упорядочения явлений самоупорядочения и самоорганизации, отражающих проявление эффектов матричного копирования и особенностей синтеза в условиях, далеких от равновесных;
- высокая "полевая" (электрическая, магнитная) активность и "каталитическая" (химическая) избирательность поверхности ансамблей на основе наночастиц, включая интегрированные композиции неорганической и органической природы;
- особый характер протекания процессов передачи энергии, заряда и конформационных изменений, отличающихся низким энергопотреблением, высокой скоростью и носящих признаки кооперативного синергетического процесса.

Следует предположить, что причиной появления вышеуказанных особенностей в условиях "наномира" является:

- изменение отношения площади поверхности к объему при переходе к наноразмерным системам;
- энергетическая, полевая и "вещественная" неравновесность поверхности, охватывающая значительные объемы наночастиц;
- усиление роли различных видов размерных эффектов вследствие значительной площади границ раздела в условиях наноконпозиций;
- проявление в условиях больших коллективов энергетически активных наночастиц нетради-

ционных механизмов упорядочения, переноса энергии и заряда;

- малые характеристические размеры частиц и особый характер их упорядочения, обеспечивающие энергетическую и пространственную доступность транспорта заряда, энергии и конформационных изменений.

Все ранее сказанное позволило предложить ряд постулатов, определяющих характерные признаки и направления развития наноматериалов, нанотехнологий и наносистем (табл. 2).

Таким образом, **фундаментальным базисом индустрии наносистем являются новые ранее неизвестные свойства материалов и композиций, возникающие при переходе к объектам, представляющим собой интеграцию искусственно или естественно упорядоченных наносистем.** Это обусловлено особым проявлением в наноконпозициях и ансамблях субмолекулярных комплексов кооперативно-синергетических явлений и процессов, квантово-размерных и "гигантских" эффектов.

В настоящее время, по нашему мнению, в качестве фундаментальных проблем наноиндустрии можно выделить следующие направления исследований:

- малые ансамбли молекул, межмолекулярные взаимодействия и молекулярная динамика;
- размерные и функциональные свойства наночастиц, конфигурации, межфазные границы;
- наномасштабирование и квантово-размерные эффекты;
- неравновесные процессы и синергетические явления в наноструктурированных материалах;
- теории матричного синтеза, сборки, самосборки и молекулярного узнавания для веществ органической и неорганической природы.

В качестве одного из возможных подходов к формированию концепции развития индустрии наносистем в России, с учетом приоритетных направлений развития науки, технологий и техники, может быть предложена матричная модель, отражающая ключевые направления развития индустрии наносистем (наноматериалы, нанотехнологии,

Таблица 2

Основные постулаты "Индустрии наносистем"

Наноматериалы <i>Макро- и микрообъекты — интеграция искусственно или естественно упорядоченных (самоупорядоченных) наносистем</i>	Нанотехнологии <i>Наноточность, наноизбирательность и самоорганизация в условиях синтеза макро- и микрообъектов</i>	Наносистемы <i>Макросистемные свойства — проявление кооперативного взаимодействия и избирательности границ раздела наносистем</i>
От макрокристаллов к композициям нанокристаллов и субмолекулярным комплексам	От микро- к наноточности (нанолокализации, нанопозиционированию, наноизбирательности)	От микро- к наномасштабированию
От искусственно упорядоченных систем к самоупорядоченным	От организации к самоформированию, самосборке (самоорганизации)	От классических размерных эффектов к квантовым
От статического упорядочения к динамическому (неравновесному)	От квазиравновесных процессов к неравновесным	От изолированных консервативных систем к открытым кооперативным

нанодиагностика, наносистемотехника) через детализацию и установление взаимовлияния уникальных специфических свойств и особенностей, проявляющихся при переходе к наномасштабам (см. рисунок).

Данная матричная форма может быть использована для прогнозирования критических направлений развития индустрии наносистем с целью повышения результативности исследований и разработок, а также интеграции и координации работ в научной и производственной сферах.

Научно-производственный базис индустрии наносистем

Индустрия наносистем — интегрированный комплекс, включающий: оборудование; материалы; программные средства; систему знаний; технологическую, метрологическую, информационную, организационно-экономическую культуру и кадровый потенциал, обеспечивающие производство наукоемкой продукции, основанной на использовании новых нетрадиционных свойств материалов и систем при переходе к наномасштабам.

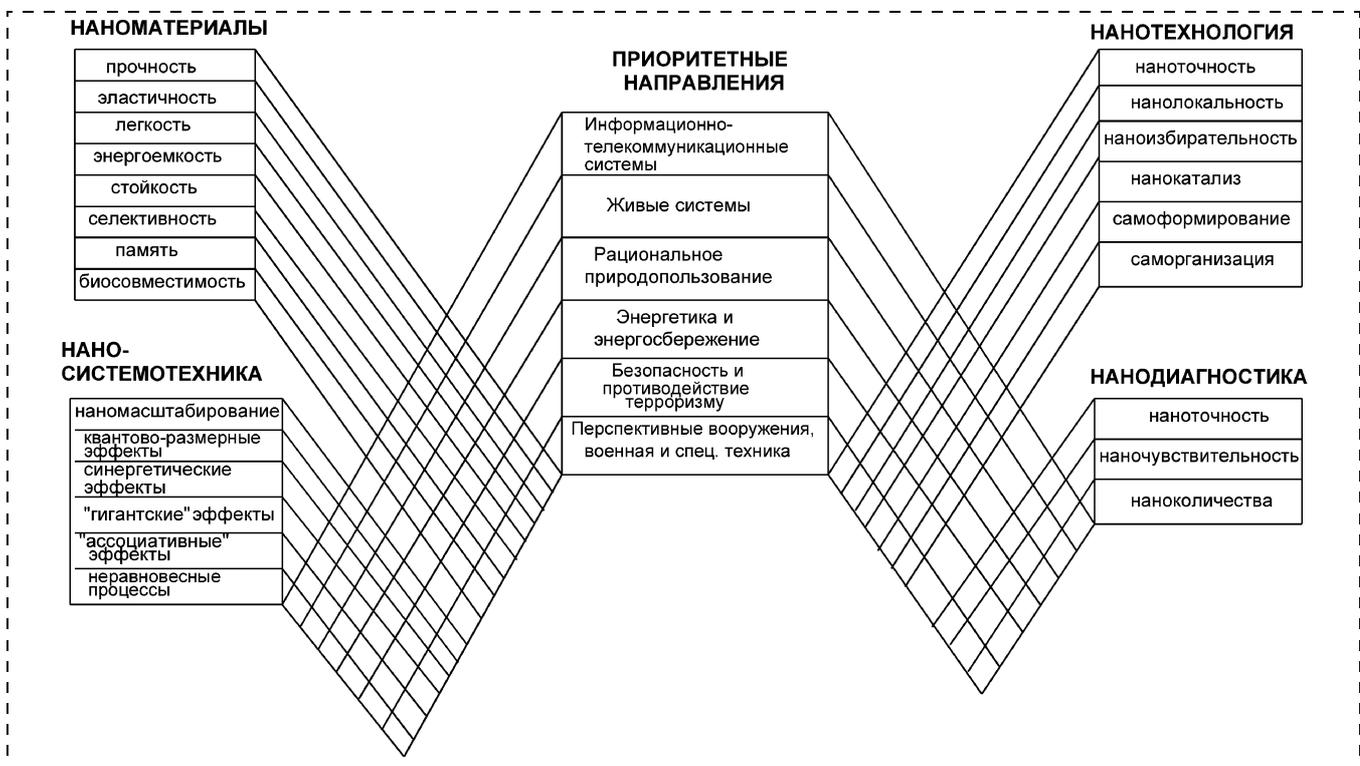
В табл. 3 представлен перечень наиболее актуальных, по нашему мнению, научно-технических проектов, определяющих среднесрочные перспективы индустрии наносистем в рамках ранее рассмотренных направлений ее развития (см. табл. 1).

Реализация представленного в табл. 3 перечня базовых научно-технических проектов по-видимому не решит проблемы широкого промышленного развития индустрии наносистем, но обеспечит для России:

- сохранение и развитие отечественного научного и промышленного потенциалов высоких технологий;
- сохранение и развитие кадрового потенциала, интеграцию и эффективное использование высококвалифицированных специалистов;
- интенсификацию междисциплинарных исследований и разработок, обеспечивающих научно-технические прорывы по ключевым направлениям научно-технического прогресса;
- сохранение паритета российской научно-образовательной культуры в области высоких технологий с ведущими зарубежными странами.

Образовательный базис индустрии наносистем

При организации и реализации работ в области индустрии наносистем, наряду с постановкой чисто экономической задачи — повышения эффективности производства на основе опережающего развития высокотехнологичных отраслей, необходимо решать и социальную задачу. Это связано с особой ролью интеллектуального фактора в долгосрочной перспективе развития России как независимого государства.



Интеграция приоритетных направлений развития науки, технологий и техники с направлением "Индустрия наносистем и материалы"

Перечень научно-технических проектов в области индустрии наносистем

Направления развития	Названия проектов
Наноматериалы	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Наноконпозиционные материалы</i> со специальными механическими свойствами для сверхпрочных, сверхэластичных, сверхлегких конструкций. • <i>Наноконпозиционные и нанодисперсные материалы</i> для высокоэффективной сепарации и избирательного катализа. • <i>Наноконпозиционные материалы</i> с особой устойчивостью к экстремальным факторам для термически-, химически- и радиационностойких конструкций. • <i>Наноконпозиционные материалы</i>, обладающие "интеллектуальными" свойствами, включая: адаптивность, ассоциативность, память. • <i>Наноструктуры и наноконпозиции</i> для электронных и фотонных информационных систем. • <i>Наноконпозиционные биоорганические материалы</i> для медицины и биотехнологии. • <i>Специальные наноконпозиционные материалы</i> с низкой эффективной отражающей или сверхвысокой поглощающей способностью в СВЧ и оптическом диапазонах длин волн. • <i>Специальные нанодисперсные материалы</i> с максимально эффективным энерговыделением, в том числе, импульсным.
Нанотехнологии	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Машиностроительные нанотехнологии</i> (механическая и корпускулярная обработка с наноточностью). • <i>Физико-химические нанотехнологии</i> (атомно-молекулярная химическая сборка неорганических и органических веществ). • <i>Атомно-зондовые нанотехнологии</i> (нанозондовый сверхлокальный синтез и модифицирование). • <i>Биомедицинские нанотехнологии</i> (биочипы и биокластеры; сверхлокальная наноизбирательная диагностика, терапия, хирургия; геновая инженерия). • <i>Аппаратно-методическое обеспечение чистоты и микроклимата в индустрии наносистем.</i>
Нанодиагностика	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Экспресс-методы контроля химического состава и геометрии нанообъектов.</i> • <i>Экспресс-методы регистрации электрических, магнитных и акустических полей нанообъектов, контроль их физических и химических свойств.</i>
Наносистемы (наноустройства)	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Нанохимические компоненты (сорбенты, катализаторы, насосы, реакторы) для высокоэффективной очистки, избирательного сверхскоростного высокопроизводительного синтеза, атомно-молекулярной инженерии.</i> • <i>Наноэлектронные компоненты (элементная база) для сверхинтегрированных сверхмощных сверхскоростных систем генерации, хранения, передачи и обработки информации.</i> • <i>Нанооптические компоненты (элементная база — излучатели, фотоприемники, преобразователи) для энергетически эффективной светотехники, систем сверхскоростной "сверхплотной" высококопозащищенной передачи и обработки информации.</i> • <i>Микро- и наноинструмент для процессов атомно-молекулярной инженерии.</i>

Представляется, что в программе работ должен быть специальный, хорошо продуманный, методически и реально экономически поддержанный блок, направленный на сохранение и развитие "человеческого капитала", как одного из важнейших факторов обеспечения экономики страны квалифицированными специалистами. Только наличие кадров, способных поддерживать научно-производственный потенциал государства в высокотехнологичных отраслях, обеспечит безопасность государства и конкурентоспособность отечественной продукции военного и гражданского назначений.

В рамках развития образовательного базиса России 04.06.03 был издан приказ № 2398 «Об эксперименте по созданию новых направлений подготовки дипломированных специалистов "Нанотехнология" и специальностей "Нанотехнология в электронике" и "Наноматериалы"». Однако существуют определенные факторы, снижающие эффективность принятых решений с учетом динамики и особенностей развития направления **индустрия наносистем**:

- значительная протяженность временного интервала, требуемого для подготовки дипломированного специалиста;

- относительная "жесткость" принятых учебных программ, ограничивающих предметные области знаний в условиях широты индустрии наносистем как направления;
- неустойчивость в определении основных промышленно значимых направлений развития индустрии наносистем.

На этапе становления индустрии наносистем, как научно-технического направления, более рациональным подходом в отношении оперативности достижения конечного результата (в условиях многообразия возможных путей развития), является реализация образовательного процесса по двухуровневой системе "бакалавр—магистр".

В апреле 2004 г. Минобразования России (Приказ № 1922 от 23.04.2004) на основании документов, подготовленных УМО по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации, действующего на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, было принято решение о создании нового направления подготовки бакалавров и магистров — 554500 "Нанотехнология".

Целесообразность введения двухуровневой системы подготовки кадров по быстро прогрессирующему направлению обусловлена:

- необходимостью гармонизации структуры отечественного образовательного процесса по базовым направлениям научно-технического прогресса с концепцией, принятой большинством промышленно развитых стран в рамках Болонской декларации;
- объективной ситуацией в развитии данного высокотехнологичного направления, характеризующейся стадией накопления знаний, т.е., в первую очередь, становлением "нанонауки";
- отсутствием не только в России, но и за рубежом, окончательной концепции развития "**индустрии наносистем**" как промышленного производства, ориентированного на вполне определенную номенклатуру наноматериалов и компонентов наносистемной техники.

Двухуровневая система подготовки по направлению "Нанотехнология", с учетом принятых на государственном уровне директивных решений, получила значительную поддержку в высших учебных заведениях России (к эксперименту подключилось более 20 вузов). В настоящее время подготовлены временные требования к минимуму содержания и уровню подготовки бакалавров и магистров по данному направлению, а также примерные учебные планы.

Существующие финансово-экономическое и кадровое обеспечения заставляют искать пути гармонизации образовательного процесса по направлению "Нанотехнология" в условиях подготовки специалистов (инженеров) и бакалавров. В то же время двухуровневая система подготовки позволяет осуществлять более целенаправленную ориентацию образовательного процесса в рамках специальных дисциплин с учетом проблемного поля направления подготовки, отраженного в магистерских программах.

Анализ возможных образовательных программ по направлению "Нанотехнология" при подготовке магистров, ориентированных на технические науки, позволил выделить следующие программы:

- физика наносистем;
- химия наносистем;
- материаловедение наносистем;
- процессы нанотехнологии;
- методы нанодиагностики;
- наноэлектроника;
- нанооптика;
- наномеханика;
- микро- и наноэнергетика;
- биомедицинские нанотехнологии.

Аннотации магистерских программ, представленные в работе [3], фактически характеризуют не

только предметную область обучения, но и направления реальной научно-практической деятельности в указанных областях.

Важнейшими элементами обеспечения научно-образовательного процесса по данным программам является наличие имеющихся или развивающихся научно-педагогических школ и современной научно-технологической базы, которая должна концентрироваться в центрах коллективного пользования.

Заключение

Индустрия наносистем — интегрированный комплекс, включающий оборудование; материалы; программные средства; систему знаний; технологическую, метрологическую, информационную, организационно-экономическую культуру и кадровый потенциал, которые обеспечивают производство наукоемкой продукции, основанной на использовании новых нетрадиционных свойств материалов и систем при переходе к наномасштабам.

Индустрия наносистем инициирует научно-технический прорыв в совокупности высокотехнологичных отраслей производства, науки, образования, военного дела и сферы обслуживания населения за счет широкого использования изделий с ранее недостижимыми массогабаритными, энергетическими показателями, технико-экономическими параметрами и функциональными возможностями.

Индустрия наносистем может быть отнесена к высокотехнологичным производствам с высокой добавленной стоимостью, которые опираются в значительной степени на инвестиции в "человеческий капитал".

Список литературы

1. **Нанотехнология** в ближайшем десятилетии / Под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса и П. Аливисатоса. М.: Мир, 2002.
2. **Алферов Ж. И., Асеев А. Л., Гапонов С. В., Коптев П. С., Панов В. И., Полгорацкий Э. А., Сибельдин Н. Н., Сурис Р. А.** Наноматериалы и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2003. № 8. С. 3—13.
3. **Лучинин В. В.** Наноиндустрия — базис новой экономики // Петербургский журнал электроники. 2003. № 3. С. 3—12.
4. **Лучинин В. В., Таиров Ю. М.** Научно-образовательный базис наноиндустрии в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2003. № 2. С. 15—20.
5. **Алфимов С. М., Быков В. А., Гребенников Е. П., Желудева С. И., Мальцев П. П., Петрунин В. Ф., Чапльгин Ю. А.** Развитие в России работ в области нанотехнологий // Микросистемная техника. 2004. № 8. С. 2—8.
6. **Пул Ч., Оуэнс Ф.** Нанотехнология. М.: Техносфера, 2004. С. 15.
7. **Шевченко В. Я.** О терминологии: наночастицы, наносистемы, нанокомпозиты, нанотехнологии // Микросистемная техника. 2004. № 9. С. 2—4.

От редакции

В настоящее время терминология в области нанотехнологий находится в стадии становления. Ниже приводятся термины, взятые из различных словарей и разрабатываемых в настоящее время документов.

Ожегов С. И. Словарь русского языка: 70 000 слов / Под ред. Н. Ю. Шведовой. — 22-е изд., стер. — М.: Рус. яз., 1990. — 921 с.

ИНДУСТРИЯ. То же, что и промышленность. *Тяжелая и. Легкая и. // прил. индустриальный.*

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ. Отрасль производства, охватывающая переработку сырья, разработку недр, создание средств производства и предметов потребления. *Добывающая п. Обработывающая п. Тяжелая п. Легкая п. Машиностроительная п. Пищевая п. // прил. промышленный. Промышленные районы. П. потенциал страны. Промышленное объединение* (комплекс производственных, технологических научно-исследовательских, конструкторских предприятий и организаций).

Большой энциклопедический словарь. — М.: АСТ: Астрель, 2003. — 1247 с. — (Соврем. энциклопедия).

ИНДУСТРИЯ, то же, что и *промышленность.*

НАНО... (от греческого *nanos* — карлик), приставка для образования наименования дольных единиц, равных одной миллиардной доли исходных единиц (10^{-9}). Обозначения: н, п.

НАНОТЕХНОЛОГИЯ, Технология объектов, размеры которых порядка 10^{-9} м (атомы, молекулы). Включает атомную сборку молекул, новые методы записи и считывания информации и др.

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ, отрасль народного хозяйства. Состоит из добывающей и обрабатывающей.

"Концепция развития в Российской Федерации работ в области нанотехнологий на период до 2010 года", одобренная в основном Правительством Российской Федерации (18 ноября 2004 г.), использует следующие термины:

НАНОТЕХНОЛОГИЯ — совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, хотя бы в одном измерении, и в результате этого получившие принципиально новые качества, позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба; в более широком смысле — этот термин охватывает также методы диагностики, характерологии и исследований таких объектов;

НАНОМАТЕРИАЛ — материал, содержащий структурные элементы, геометрические размеры которых, хотя бы в одном измерении, не превышают 100 нм, и благодаря этому, обладающий качественно новыми свойствами, в том числе заданными функциональными и эксплуатационными характеристиками;

НАНОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА — созданные полностью или частично на основе наноматериалов и нанотехнологий функционально законченные системы и устройства, характеристики которых кардинальным образом отличаются от показателей систем и устройств аналогичного назначения, созданных по традиционным технологиям;

НАНОИНДУСТРИЯ — вид деятельности по созданию продукции на основе нанотехнологий, наноматериалов и наносистемной техники.

Представляем книгу

В. Варадан, К. Виной, К. Джозе

ВЧ МЭМС и их применение

Москва: Техносфера, 2004. — 528 с.

В монографии подробно рассмотрены вопросы проектирования и применения, а также технологические аспекты производства разнообразных микроэлектромеханических устройств: переключателей, регулируемых индукторов и конденсаторов, фильтров, фазовращателей, линий передач и антенн, приведены преимущества и недостатки каждой отдельной конструкции и указаны способы их оптимизации. Целая глава посвящена такой важной теме, как монтаж микросистем, где обсуждаются методы построения корпусов микросистем и

способы их сборки. Детальное описание методов изготовления микроустройств, как традиционных, применяемых в электронной промышленности, так и современных, разработанных специально для микросистем, делает книгу особенно ценной для специалистов.

Как заказать книгу?

Почтой: 125319 Москва, а/я 594

По тел/факсу: (095)956-3346, 234-0110

E-mail: knigi@technosphera.ru; sales@technosphera.ru

Ниже приведена рецензия на эту книгу д-ра техн. наук, проф. В. В. Лучинина

Рецензия

Страны, определяющие научно-технический прогресс, при выборе своих национальных интере-

сов используют термин "критические технологии". Как правило, один лишь перечень критических технологий способен охарактеризовать уровень интеллектуального потенциала нации и, безусловно, желание и способность государства обеспечить его развитие. Бытует мнение, что с точки зрения материаловедческого базиса XIX век был веком нефти, а двадцатое столетие подарило нам кремний — основу практически всех современных информационно-управляющих, радиоэлектронных и коммуникационных систем. И все же, одним из самых замечательных научно-технических достижений конца XX века стали не очередной сверхбыстрый процессор или гигантская память, а так называемая микромеханическая миниатюра, процесс создания которой базируется на чрезвычайно высоко развитой культуре кремниевой технологии. В 1982 г. сотрудник фирмы IBM К. Петерсон поновому взглянул на кремний, увидев в нем не только полупроводниковый, но и конструкционный "механический" материал. Появление миниатюрных устройств, в которых гальванические (электрические) подсистемы интегрируются на микроуровне с механическими, породило новое направление, обозначаемое с 1987 г. аббревиатурой MEMS (МЭМС) — microelectromechanical systems (микроэлектромеханические системы). В России "Перечень критических технологий Российской Федерации" определяет это направление так: "Сверхминиатюрные механизмы, приборы, машины с ранее недостижимыми массогабаритными характеристиками, энергетическими показателями и функциональными параметрами, создаваемые интегрально-групповыми экономически эффективными процессами микро- и нанотехнологии". Несмотря на свое достаточно узкое название, ориентированное на создание и применение МЭМС в области ВЧ техники, в книге В. Варадана, К. Виноя, К. Джозе читатели найдут немало системно упорядоченного материала, который безусловно полезен при изучении и создании микросистем различного функционального назначения: это микроэлектромеханические, микрооптоэлектромеханические, микрофлюидные и микропневматические компоненты для контрольно-измерительных, информационно-управляющих и телерадиокоммуникационных систем; микромеханизмы и микромашины для генерации, преобразования и передачи энергии и движения на микро- и наноразмерах. Книгу отличает практичность и целеустремленность.

Первая книга на русском языке по технологии проектирования и изготовления МЭМС поможет, будем надеяться, отечественным специалистам в развитии этого важнейшего направления.

В. В. Лучинин

УДК 621.315.592:543.06

Г. А. Максимов, д-р хим. наук, **Д. Е. Николичев**, **Д. О. Филатов**, канд. физ.-мат. наук, Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

ЛОКАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАНОКЛАСТЕРОВ GeSi/Si МЕТОДОМ РАСТРОВОЙ ОЖЕ-МИКРОСКОПИИ

Исследуются аналитические возможности метода растровой Оже-микроскопии для изучения элементного состава полупроводниковых наноструктур. Объект исследований — нанокластеры GeSi, сформированные на кремниевой подложке методами молекулярно лучевой эпитаксии. Показана возможность проведения элементного анализа отдельных островков GeSi нанометровых масштабов. Определено пространственное разрешение прибора для различных типов структур. Разработана методика измерений и получены профили распределения концентрации Ge и Si в нанокластерах.

В настоящее время нанoeлектроника интенсивно развивается [1], уже созданы приборы, размеры элементов которых составляют единицы нанометров. Наряду с успехами технологии изготовления наноструктур происходит усовершенствование методов их исследования. Как известно, свойства твердотельных наноструктур (энергетический спектр носителей тока, электронные и оптические свойства) определяются в значительной мере размером, формой и химическим составом нанобъектов. Для геометрической характеристики наноструктур успешно применяются методы сканирующей зондовой микроскопии. Элементный состав наноструктур оценивался по результатам измерений методами рентгеновской дифракции, рамановского рассеяния [2] и электронной Оже-спектроскопии [3]. Основным недостатком этих методов — недостаточное латеральное разрешение, т.е. невозможность получить достоверную информацию о химическом составе отдельных нанобъектов.

Одним из способов решения задачи анализа объектов нанометрового масштаба может быть комбинация методов электронной Оже-спектроскопии (ЭОС) и растровой электронной микроскопии (РЭМ) — растровая Оже-микроскопия (РОМ). Диаметр электронного зонда современных РЭМ может составлять менее 3 нм. Благодаря малой длине пробега Оже-электронов в материале образца (~0,5...1 нм) возможен локальный элементный анализ в области, латеральные размеры которой лишь незначительно превышают диаметр электронного зонда. Как известно [4], локальность

по глубине для Оже-спектроскопического анализа не хуже единиц нанометров. К сожалению, нам неизвестны публикации, в которых приведены аналитические характеристики метода Оже-спектроскопии с нанометровым размером электронного зонда применительно к исследованию полупроводниковых наноструктур.

Цель данной работы — оценка аналитических возможностей метода РЭМ/РОМ с нанометровым размером зонда для изучения морфологии и локального элементного состава нанообъектов на примере анализа нанокластеров GeSi, сформированных на кремниевой подложке.

Интерес к наноструктурам на основе GeSi, получаемым методом самоорганизованного роста, объясняется потенциальными возможностями создания на их основе новых оптоэлектронных устройств с характеристиками, недоступными для объемного кремния [5]. Благодаря эффекту размерного квантования, в таких структурах можно ожидать заметного увеличения интенсивности фотолюминесценции по сравнению с объемным кремнием и создания на этой основе светодиодов в практически важной области длин волн 1,3...1,5 мкм, а в перспективе — лазерных структур [6].

Исследования методом РЭМ/РОМ проводились на базе сверхвысоковакуумной системы *MultiProbe STM* производства компании *Omicron Nanotechnology GmbH* (Германия). Для возбуждения вторичных электронов применяли электронную пушку SEG-20 (ускоряющее напряжение до 25 кВ, ток пучка до 100 нА). По паспортным данным размер электронного зонда на поверхности металлического образца должен составлять 20 нм. Оже-спектры регистрировались полусферическим энергоанализатором EA-125 с 5-канальным блоком регистрации. Режим регистрации — импульсный, электронно-счетный. РЭМ-изображение получалось с помощью детектора вторичных электронов с канальным вторичным электронным множителем (ВЭУ). Система включала в себя также ионную

пушку для очистки образцов ионным распылением (Ar^+) и для профилирования структур по глубине.

Для определения латерального разрешения РЭМ/РОМ и реального размера электронного зонда был изготовлен проводящий тестовый образец на основе Cr/Ni, размер элементов которого по данным атомно-силовой микроскопии (АСМ) менялся от 1000 до 10 нм (рис. 1, а). На кварцевую подложку наносились последовательно слой никеля и слой хрома. Затем на поверхности с использованием защитного покрытия формировались элементы. После этого плазменным травлением удалялся слой хрома, оставшийся незащищенным. Разрешение прибора в режиме РЭМ и РОМ составило 20 и 25 нм соответственно (рис. 1, з, д). Светлые области на РОМ-изображении (рис. 1, в) соответствуют никелю (линия Ni LMM 848 eV). За разрешение принимали величину "полуширина на полувысоте" (HWHM) на профиле интенсивности излучения вторичных электронов (РЭМ) и профиле интенсивности Оже-линии никеля (РОМ). Линию сканирования электронного зонда для определения профиля интенсивности выбирали вблизи острия тест-образца — там, где поперечный размер элемента был сопоставим с диаметром электронного пучка.

Исследуемые наноструктуры GeSi/Si были получены методом самоорганизованного роста по механизму Странского—Крастанова [7]. Суть эффекта заключается в переходе от двухмерного роста к трехмерному кластерообразованию вследствие рассогласования параметров решеток выращиваемых слоев кремния и германия. Исследуемые образцы были выращены двумя методами:

1. *Сублимационная молекулярно-лучевая эпитаксия кремния в среде германа (GeH₄)* [8]. На подложке высоколегированного бором кремния ($n \approx 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) ориентации (111) выращивался буферный слой кремния толщиной 500 нм, легированный бором ($n \approx 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), а затем слой Ge номинальной толщиной 20 нм. Морфология поверхности исследовалась методом атомно-силовой микроскопии. Наблюдались массивы островков с латеральными размерами 100 нм, высотой 20 нм и поверхностной плотностью $7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ и островки с большим числом дислокаций с латеральными размерами 900 нм, высотой 100 нм и поверхностной плотностью $2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ (рис. 2, а).

2. *Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ)* [9]. На подложке высоколегированного мышьяком кремния ($n \approx 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) ориентации (001) выращивался буферный слой кремния толщиной 100 нм, легированный бором ($n \approx 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), а затем слой Ge номинальной

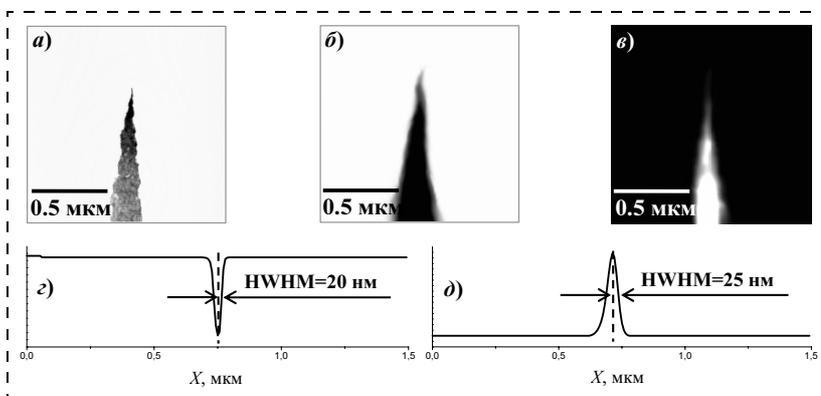


Рис. 1. АСМ (а), РЭМ (б), РОМ (в) изображения участка тестового образца, профиль интенсивности излучения вторичных электронов в режиме РЭМ (з) и профиль интенсивности Оже-линии никеля в режиме РОМ (д)

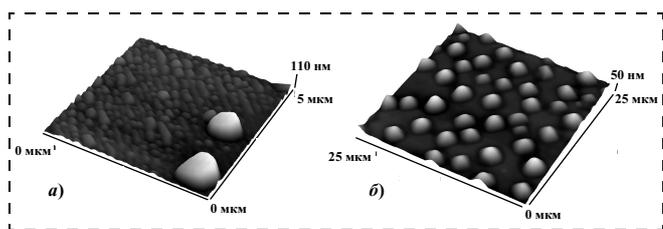


Рис. 2. АСМ-изображение GeSi/Si гетероструктур: а — сублимационная МЛЭ; б — МЛЭ

нальной толщиной 1,4 нм. По данным АСМ на поверхности присутствовали массивы однородных островков с латеральными размерами 300 нм, высотой 40 нм и поверхностной плотностью $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ (рис. 2, б).

При исследовании полупроводниковых объектов методом РЭМ/РОМ проявляется эффект зарядки поверхности образца, в результате чего происходит смещение и дефокусировка электронного зонда [10]. Как следствие наличия заряда на поверхности, пространственное разрешение в РЭМ/РОМ режимах на таких структурах в 2—3 раза хуже, нежели при анализе хорошо проводящих структур. При исследовании нанокластеров GeSi/Si разрешение в режиме РЭМ составило 50 нм (рис. 3, б), в режиме РОМ — 70 нм (рис. 3, з, д). РОМ-изображение (рис. 3, в) регистрировалось в пике германия (линия LMM $E = 1141 \text{ эВ}$). На рис. 3, а приведена полученная АСМ морфология исследуемой GeSi наноструктуры, используемой для определения латерального разрешения РЭМ/РОМ.

Основной проблемой измерения Оже-спектров в определенной точке поверхности полупроводникового образца, выбранной на РЭМ-изображении и при получении карты распределения элементов по поверхности, являлось смещение и дефокусировка электронного зонда за время записи спектра. Смещение электронного зонда при различной проводимости образцов составляло $\sim 30 \dots 150 \text{ нм}$. Это происходило вследствие изменения заряда поверхности образца при переходе из режима РЭМ в режим Оже-нанозонда. Подача положительного смещения на образец уменьшает отрицательный фактор зарядки, хотя и не полностью. Эффект проявляется тем меньше, чем выше проводимость образца. Для решения этой проблемы был применен специальный режим: электронный зонд устанавливали в выбранную точку и снимали Оже-спектр при таком малом времени развертки, при котором смещение электронного зонда было бы незначительным и он оставался на наноструктуре. Затем прибор опять переключали в режим РЭМ и проводили коррекцию положения луча, после чего процедуру повторяли. Полученные за не-

сколько (10—20) циклов Оже-спектры усредняли для увеличения отношения сигнал/шум.

Перед послойным анализом наноструктур GeSi/Si была проведена градуировка скорости ионного травления для различных параметров ионного зонда. Для калибровки скорости травления были выращены многослойные структуры GeSi с последовательным чередованием слоев $\text{Ge}_{0,4}\text{Si}_{0,6}$ и чистого кремния. При энергии ионного пучка 1 000 эВ и плотности ионного тока $1,5 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ скорость травления составила 0,25 нм/мин и толщина области перемешивания составила 4 нм, при энергии ионного пучка 600 эВ и плотности тока $1 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ скорость травления составила 0,07 нм/мин, толщина области перемешивания — 1,5 нм. При том, что глубина выхода для Ge (линия LMM $E = 1141 \text{ эВ}$) составляет 2,4 нм [11], и вследствие предположения о плавном изменении концентрации Ge и Si по глубине наноструктур, был выбран первый режим травления.

Для определения концентрации Ge и Si в наноструктурах GeSi была построена градуировочная характеристика. Для этого был проведен послойный элементный анализ специально изготовленных (тестовых) образцов твердых растворов GeSi с различным содержанием Ge. Образцы были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии германия и представляли собой поликристаллическую пленку GeSi германия толщиной 50...100 нм на высоколегированной подложке кремния. Средняя концентрация германия и кремния в пленке определялась независимо методом рентгеновской дифракции и составила для трех образцов $30,1 \pm 0,5 \%$ ат., $50,0 \pm 0,5 \%$ ат. и $70,0 \pm 0,5 \%$ ат. [12].

После изготовления тестовые образцы пленок GeSi выносили на воздух (также, как исследуемые образцы кремния с наноструктурами GeSi), а затем размещали в вакуумной камере Оже-спектрометра. После пребывания на воздухе поверхностный слой образцов окислялся. Для определения concentra-

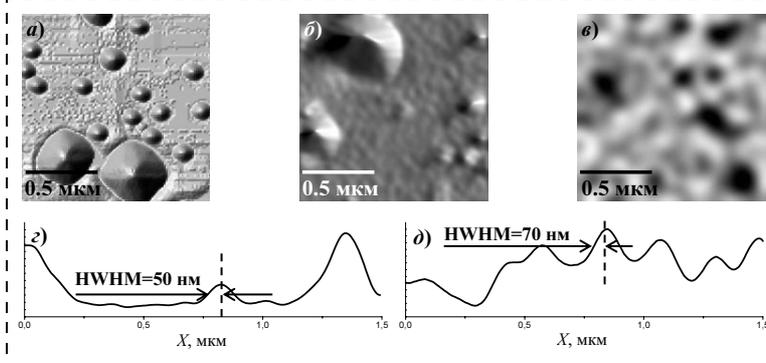


Рис. 3. АСМ (а), РЭМ (б), РОМ (в) изображения нанокластеров GeSi/Si, профиль интенсивности излучения вторичных электронов в режиме РЭМ (з) и профиль интенсивности Оже-линии германия в режиме РОМ (д)

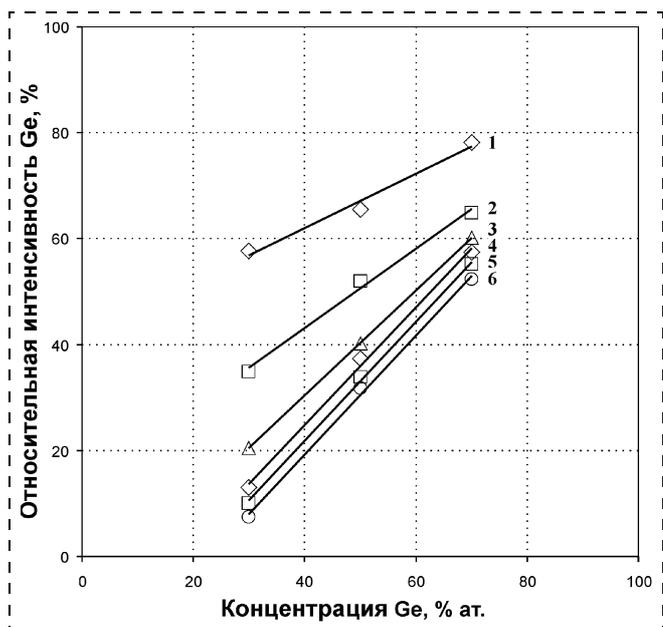


Рис. 4. Градуировочные характеристики для различной глубины оксидного слоя:

1 — 0 нм; 2 — 0,25 нм; 3 — 0,5; 4 — 0,75 нм, 5 — 1 нм и 6 — 1,25 нм

ции германия в оксиде была построена градуировочная характеристика для нескольких значений глубины травления (рис. 4). По оси ординат отложена относительная интенсивность S линии Ge ($C_{Ge}/C_{Ge} + C_{Si}$), полученная методом ЭОС. Из графика видно, что наклон градуировочных характеристик меняется в зависимости от глубины оксидного слоя до значения глубины ~ 1 нм от поверхности, после чего наступает стационарное состояние, когда на поверхности оксид практически

отсутствует. Из полученных данных можно сделать вывод о том, что соотношение содержания германия и кремния отличаются в оксидном слое и в глубине образца [13]. Для определения концентрации германия в оксидном слое нанокластеров GeSi проводили послойное травление оксидного слоя наноструктура и по градуировочной характеристике для соответствующей глубины травления определяли концентрацию. При этом предполагалось что оксидный слой нанокластеров идентичен оксидному слою твердого раствора GeSi.

На основании градуировочной характеристики можно определить минимальную обнаруживаемую концентрацию германия, экстраполировав линии на ось абсцисс, эта концентрация составляет около 20 % ат. Необходимо в дальнейшем достроить градуировочную характеристику для образцов с меньшим содержанием германия, так как из опыта минимально обнаруживаемая концентрация прибора составляет около 3—4 % ат.

Распределение концентрации германия и кремния по глубине нанокластеров и между ними приведено на рис. 5, а, б. Расчет концентрации Ge выполняли исходя из того, что остальная часть основного состава нанокластеров — кремний. При выращивании образцов методом сублимационной МЛЭ концентрация германия на поверхности велика, что объясняется наличием в ростовой камере германа после прекращения сублимации кремния. Среднее значение концентрации Ge в островках, полученное при локальных измерениях методом РОМ занижено по сравнению со значениями, полученными методами рентгеновской дифракции и рамановского рассеяния на 10—20 % [14], что можно объяснить различными режимами, в которых измерялись образцы для калибровочной кривой и

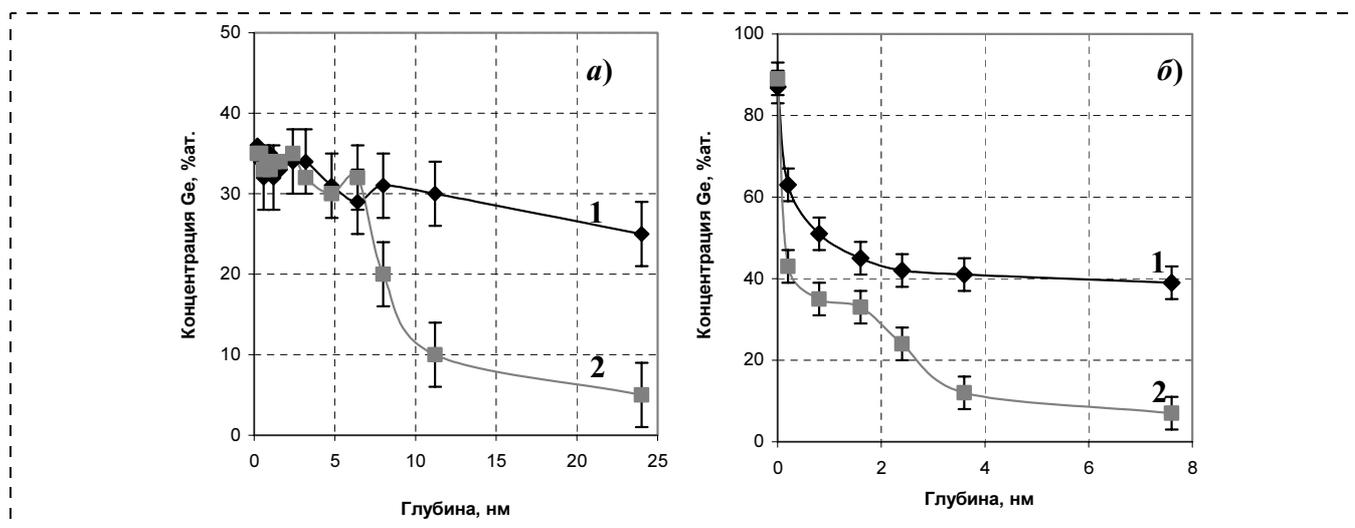


Рис. 5. Распределение концентрации Ge по глубине в нанокластере (1) и между нанокластерами (2) для образцов, полученных методом МЛЭ (а) и сублимационной МЛЭ (б)

исследуемые GeSi структуры. Так, для градуировочной кривой диаметр зонда составлял 30 мкм, при исследовании же наноструктур диаметр электронного зонда был меньше 50 нм. Факт уменьшения интенсивности линии Ge при переходе в режим нанозонда необходимо будет учитывать в дальнейшем, для получения достоверных профилей распределения концентрации германия в нанокластерах.

Для оценки правильности (систематической погрешности) результатов измерения концентрации были также проведены опыты по независимо определению состава островков GeSi методом спектроскопии фотоЭДС на барьере полупроводник/электролит (ФПЭ) в жидкостной электролитической ячейке на образцах-спутниках, в которых слой GeSi выращивался в тех же условиях, что и в образцах для РОМ-исследований (в случае сублимационной МЛЭ), но нанокластеры были зарощены сверху покровным слоем Si толщиной 40 нм. Методика измерения и анализа спектров ФПЭ изложена в работе [15]. В структуре с номинальной толщиной слоя Ge 8 монослоев, выращенной при 700 °С, энергия основного перехода из дырочных состояний в кластерах GeSi в зону проводимости материала, окружающего островки (Si), при 300 К составила $(0,71 \pm 0,02)$ эВ. Исходя из этого значения была проведена оценка состава твердого раствора в кластерах. Для оценки состава использовалась модель для расчета спектра энергий псевдоморфной прослойки твердого раствора Ge_xSi_{1-x} в кремнии с учетом упругих напряжений [16]. Поскольку островки GeSi имели достаточно большие размеры (много больше длины волны де Бройля для электронов и дырок в Ge и Si), эффектом размерного квантования в них пренебрегали. Полученное значение x составило $0,52 \pm 0,10$. Это значение близко к значению средней концентрации германия ($x = 0,53$), полученному из графика распределения концентрации Ge по глубине нанокластера в случае сублимационной МЛЭ (рис. 5, б).

В результате проделанной работы была показана возможность проведения локального (нанометрового масштаба) элементного анализа самоорганизованных структур GeSi/Si методом растровой Оже-микроскопии. Пространственное разрешение для проводящего тестового образца в режиме РЭМ составило 35 нм, в режиме РОМ — 25 нм. Пространственное разрешение для наноструктур GeSi/Si в режиме РЭМ составило 50 нм, в режиме РОМ — 75 нм. Минимальная обнаруживаемая концентрация германия составляет менее 20 % ат., погрешность определения концентрации германия, оцененная статистически с помощью распределения

Стюдента составляет ~4 % ат. Было получено качественное распределение концентрации германия по глубине наноструктур GeSi/Si.

Авторы благодарят В. Г. Шенгурова (НИФТИ ННГУ) и А. В. Новикова (ИФМ РАН) за предоставленные структуры для исследования.

Работа выполнена при поддержке совместной Российско-американской программы "Фундаментальные исследования и высшее образование" (#REC-NN-001), гранта РФФИ № 03-02-17085, гранта Минобразования РФ № Е02-3.4-238.

Список литературы

1. Драгунов В. П., Неизвестный И. Г., Гридчин В. А. Основы наноэлектроники. Новосибирск: НГТУ, 2000. 332 с.
2. Krasil'nik Z. F., Dolgov I. V., Drozdov Yu. N. and an. The elastic strain and composition of self-assembled GeSi islands on Si (001) // Thin solid films. 2001. V. 367. P. 171.
3. Дроздов Ю. Н., Байдусь Н. В., Звонков Б. Н. и др. Сегрегация индия при выращивании квантовых ям InGaAs/GaAs в условиях газофазной эпитаксии // ФТП. 2003. Т. 37. С. 203.
4. Briggs D., Seach M. P. Practical surface analysis by Auger and X-ray photoelectron spectroscopy. New-York: John Wiley & Sons, 1983. Ch. 1.
5. Пчеляков О. П., Болховитянов Ю. Б., Двуреченский А. В. и др. Кремний-германиевые наноструктуры с квантовыми точками: механизмы образования и электрические свойства // ФТП. 2000. Т. 34. С. 1281.
6. Красильник З. Ф., Новиков А. В. Оптические свойства напряженных гетероструктур на основе $Si_{1-x}Ge_x$ и $Si_{1-x-y}Ge_xC_y$ // УФН. 2000. Т. 170. № 3. С. 338.
7. Леденцов Н. Н., Устинов В. М., Щукин В. А. и др. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры // ФТП. 1998. Т. 32. № 4. С. 385.
8. Светлов С. П., Шенгуров В. Г., Чалков В. Ю. и др. Гетероэпитаксиальные структуры $Si_{1-x}Ge_x/Si(100)$, полученные методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии кремния в среде GeH_4 // Известия Академии наук. Серия физическая. 2001. Т. 65. № 2.
9. Aleshkin V. Ya., Bekin N. A., Kalugin N. G. and an. Self-organization of germanium nanoislands obtained in silicon by molecular-beam epitaxy // JETP Lett. 1998. V. 67, № 1.
10. Seach M. P., Spenser S. J. AES of bulk insulators — control and characterisation of the surface charge // Journ. of Electron Spectroscopy. 2000. V. 109. P. 291.
11. Menyhard M., Barna A., Biersack J. P. and an. Study of ion mixing during Auger depth profiling of Ge—Si multilayer system II. Low ion energy (0.2-2keV) range // J. Vac. Sci. Technol. 1995. V. 13. No. 4. P. 1999.
12. Ковба Л. М., Трунов В. К. Рентгенофазовый анализ. М.: МГУ. 1969. 160 с.
13. LeGouese F. K., Rosenberg R., Nguyen T. and an. Oxidation studies of SiGe // Journal of Applied Physics. 1989. V. 64. No 4. P. 1724.
14. Валах М. Я., Джаган В. Н., Литвин П. М. и др. Компонентный состав и упругие напряжения в многослойных структурах с наноструктурами $Si_{1-x}Ge_x$ // ФТП. 2004. Т. 46. № 1. С. 88.
15. Филатов Д. О., Круглова М. В., Исаков М. А. Фотоэлектрические свойства гетероструктур GeSi/Si с самоорганизованными нанокластерами // Известия вузов. Поволжский регион (В печати)
16. Алешкин В. Я., Бекин Н. А. Спектры электронов и дырок и правила отбора для оптических переходов в гетероструктуре $Ge_{1-x}Si_x/Ge$ // ФТП. 1997. Т. 31. С. 171.

УДК 621.372.8

Г. В. Дедков, д-р физ.-мат. наук
Кабардино-Балкарский государственный
университет, г. Нальчик
e-mail: gv_dedkov@mail.ru

О ДИССИПАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ СИЛОВОГО ЗОНДОВОГО МИКРОСКОПА В ВАКУУМЕ

Проводится критическое обсуждение недавних экспериментов по измерению консервативных и диссипативных взаимодействий в динамических контактах нанозондов сканирующих микроскопов с поверхностями (в высоковакуумных условиях). В частности, экспериментально исследовалось нормальное и латеральное осциллирующее движение зондов вблизи поверхности различных материалов, но вопрос о природе дальнедействующих бесконтактных сил демпфирования остается открытым. Впервые предлагается простое соотношение между консервативной и диссипативной силами произвольной природы, действующими на зонд, позволяющее объяснить наблюдаемое в экспериментах демпфирование. Для этого требуется единственный феноменологический параметр, характеризующий скорость или время диссипативного процесса. Показано, что несмотря на большое различие абсолютного значения диссипативных сил, геометрического размера зондов и типа консервативного взаимодействия в разных экспериментах диссипативные силы как при нормальном, так и при латеральном движении зондов удовлетворительно описываются предложенной моделью.

Введение

Одним из ключевых вопросов, связанных с природой и спектроскопией динамических сил в контактах зондов сканирующих микроскопов с поверхностью различных материалов в вакууме, является корректная физическая интерпретация консервативных и диссипативных сил. Так, в работах [1–4] диссипативные силы исследовались для контактов полупроводника с диэлектриком (кремний—слюда), между металлами (алюминий—золото, золото—золото) [2–3] и металла с полупроводником (золото—кремний [4]). В работах [1–3] исследовалось перпендикулярное к поверхности осциллирующее движение нанозонда при параллельной к поверхности ориентации кантилевера, а в работе [4] при перпендикулярной ориентации кантилевера — параллельное к поверхности движение. В отличие от измерений консервативных сил, интерпретация которых в настоящее время не вызывает больших проблем, при измерении диссипативных сил было выявлено несколько интригующих особенностей:

- неожиданно высокие абсолютные значения;

- различная зависимость от расстояния (от z^{-3} в [3] до $z^{-1,3 \pm 0,2}$ в [4]);
- сильная зависимость от температуры и типа контактирующих материалов [4].

Принципиально важный момент в интерпретации экспериментов связан с тем, что в бесконтактном вакуумном динамическом режиме с компенсацией контактной разности потенциалов консервативное взаимодействие зонда с образцом обусловлено флуктуационными силами Ван-дер-Ваальса, поэтому было вполне естественно ожидать, что возникающие диссипативные силы должны иметь ту же природу (т.е. должны быть тождественны так называемым силам "вакуумного трения" — "трения Ван-дер-Ваальса"). Однако теоретические расчеты этих сил показали, что "вакуумное трение" на много порядков величины меньше наблюдаемого, в частности, для контактов кремний—слюда — на два, три порядка величины [5, 6], а для контактов металлов — на пять, одиннадцать порядков [5–8]. Для металлов существующая теория [5–8] приводит к очень малым значениям диссипативных сил, поскольку входящие в расчетные формулы планковские температурные факторы обрезают взаимодействие на частотах, меньших частоты Вина $\omega_w = k_B T / \hbar$ (где \hbar и k_B — постоянные Планка и Больцмана), имеющей порядок 10^{14} Гц при комнатных температурах. Следовательно, эффект омической диссипации энергии в металлических наноконтактах не может объяснить наблюдаемые значения диссипативных сил. В случае контакта неметаллов ситуация несколько лучше [5, 6], но все равно расхождение теории и эксперимента достаточно велико.

В данной статье мы подходим к решению этой проблемы несколько иным путем — вводя феноменологическое соотношение между консервативной и диссипативной силами, действующими на зонд микроскопа. Независимо от природы консервативного взаимодействия между телами, обладающими внутренней структурой, возникающие между ними диссипативные силы появляются в результате отклика системы на относительное движение, в результате чего часть кинетической энергии необратимо переходит во внутреннее движение частиц. Поэтому простейшей формой связи между консервативной и диссипативной силами (при малых скоростях) является пропорциональная зависимость $F_d(z) \propto F_c(z)$, а также пропорциональная зависимость между диссипативной силой и скоростью движения $F_d(z) \propto V$. В итоге диссипативную силу можно представить как консервативную силу, умноженную на скорость и деленную на феноменологический параметр с размерностью скорости $V_d = l_d / \tau_d$, где l_d и τ_d — значения длины и времени, характеризующие диссипативный процесс. В следующем разделе статьи мы приводим

элементарную аргументацию этих эвристических соотношений, а в разделе 2 применяем их для анализа имеющихся экспериментальных данных.

1. Соотношение между консервативной и диссипативной силами

Одним из хорошо известных классических соотношений между консервативной F_d и диссипативной F_c силой является закон статического сухого трения Амонтона—Кулона

$$F_d = \mu F_c, \quad (1)$$

где μ — коэффициент трения, а F_c ассоциируется с силой нормального давления в контакте.

Для вакуумного трения двух поверхностей, скользящих друг относительно друга со скоростью V , очевидно, простейшим соотношением является (во всех формулах мы подразумеваем абсолютные значения консервативной и диссипативной сил)

$$F_d = F_c \frac{V}{V_d} = F_c \frac{V \tau_d}{l_d}, \quad (2)$$

где l_d , τ_d и V_d — феноменологические параметры. Обозначая $l_d/V = \tau_c$, где τ_c — характерное время столкновения, соотношение (2) можно записать также в альтернативной форме

$$F_d = F_c \frac{\tau_d}{\tau_c}. \quad (3)$$

Формула (3), очевидно, эквивалентна (1) при $\mu = \tau_d/\tau_c$, поэтому μ можно считать динамическим аналогом коэффициента трения.

Микроскопическая основа уравнений (2), (3) хорошо оправдывается при сопоставлении консервативных и диссипативных сил, обусловленных электромагнитными и флуктуационно-электромагнитными взаимодействиями. В простейшем (но не единственном) случае проводящей поверхности соответствующее соотношение имеет вид [5, 6] (безразмерный числовой коэффициент для простоты опущен)

$$F_d \propto F_c \frac{V}{z\sigma}, \quad (4)$$

где z — расстояние движущейся частицы от поверхности; σ — статическая проводимость; $F_c \propto \frac{(Ze)^2}{z^2}$ для

заряда Ze , $F_c \propto \frac{p^2}{z^4}$ для дипольной молекулы с по-

стоянным дипольным моментом p и $F_c \propto \frac{U_0}{z^4}$ для

нейтральной частицы (статическая сила притяжения Ван-дер-Ваальса). В случае квантовых элек-

тромагнитных флуктуаций $U_0 = \hbar\omega_0$, где ω_0 — характерная частота поглощения электромагнитного спектра, а в случае тепловых флуктуаций $U_0 = k_B T$.

При $F_c \propto k_B T/z^4$ формула (4) устанавливает связь только между температурно-зависимыми компонентами консервативной и диссипативной Ван-дер-Ваальсовой сил, в то время как между их низкотемпературными компонентами должно иметь место соотношение типа (2). Представляется естественным связать соответствующую часть диссипативной силы с механизмом фононного затухания, поскольку силы Ван-дер-Ваальса, действуя на отдельные атомы и фрагменты твердых и жидких тел, должны приводить к возбуждению их колебаний, т.е. фононов вне зависимости от температуры тел.

Зависимость $F_d \sim 1/z$ в (4) является простым следствием линейного приближения по скорости и доплеровского сдвига частоты ближнего флуктуационного электромагнитного поля, посредством которого осуществляется взаимодействие между телами ($\Delta\omega = \pm k_x V$, где k_x — проекция волнового вектора на направление скорости). Поскольку амплитуда ближнего поля вблизи плоской поверхности убывает по закону $\exp(-kz)$, то последующее интегрирование силы взаимодействия по волновым векторам приводит к появлению дополнительного множителя $1/z$. Если же взаимодействие осуществляется через поверхностные моды (например, плазмоны), обладающие пространственной дисперсией, то показатели степени в соответствующих зависимостях от расстояния могут отличаться от единицы (в большую сторону) [5, 6], либо эта зависимость более сложная.

Как зависящие, так и не зависящие от температуры консервативные Ван-дер-Ваальсовы силы "трясут" кристаллическую решетку, поэтому диссипация энергии является (в том числе) следствием демпфирования колебаний и (или) других атомных движений, а также движений наноструктурных фрагментов. Кроме того, поскольку в этом случае нет "ближнего фононного поля", результирующая зависимость диссипативной силы от расстояния до поверхности, по-видимому, должна быть близка к аналогичной зависимости консервативной силы: $F_d(z) \propto F_c(z)$. Тем не менее, следует иметь в виду, что уравнение (2), вообще говоря, может содержать дополнительный безразмерный численный фактор, зависящий от z . Поэтому в общем случае приближение $F_d(z) \propto F_c(z)$ может оказаться недостаточно корректным.

2. Обсуждение экспериментов

Теперь обсудим результаты экспериментов [2—4]. Данные, приведенные в работе [1], представляются менее надежными, поскольку использованный метод измерений диссипативных сил был более гру-

Таблица 1

Параметры экспериментов

Литературный источник	Система зонд—образец	Мода колебаний	Радиус зонда R, нм	Амплитуда колебаний A ₀ , нм	Частота f ₀ · 10 ⁵ , Гц	Добротность Q	Жесткость k, Н/м	Константа Гамакера J · 10 ⁻¹⁹
[1]	Si—слода	Перпенд.	20	32	2,97	22815	40	1,2
[2]	Al—Au(III)	Перпенд.	35	42,5	2,89	22671	50	3,5
[3]	Al—Au(III)	Перпенд.	21	21	2,67	19050	40	3,5
[4]	Au—Au(III)	Паралл.	1000	10—20	0,0386	8200—20300	3,3 · 10 ⁻⁴	?

Таблица 2

Измеренные консервативные силы и параметры затухания

Система зонд—образец	Мода колебаний	Расстояние z ₀ , нм	Консервативная сила F _c , нН	Параметр затухания γ, нН с/м
Si—слода	Перпенд.	1	0,4	11
Al—Au(III)	Перпенд.	1	2,0	48
Au—Au(III)	Паралл.	1	1,1	0,003

бым. В табл. 1 приведены экспериментальные условия экспериментов [2—4], а в табл. 2 — наиболее важные результаты измерений консервативной силы F_c(z) и параметра затухания γ(z), связанного с диссипативной силой соотношением

$$F_d(z) = \gamma(z) dz/dt.$$

В случае параллельного к поверхности движения

$$F_d(z) = \gamma(z) dx/dt,$$

где x — латеральная координата.

На рис. 1 показана консервативная сила взаимодействия зонда с поверхностью для контакта кремний (зонд) — слюда (поверхность) в зависимости от расстояния z. Сплошная линия соответствует

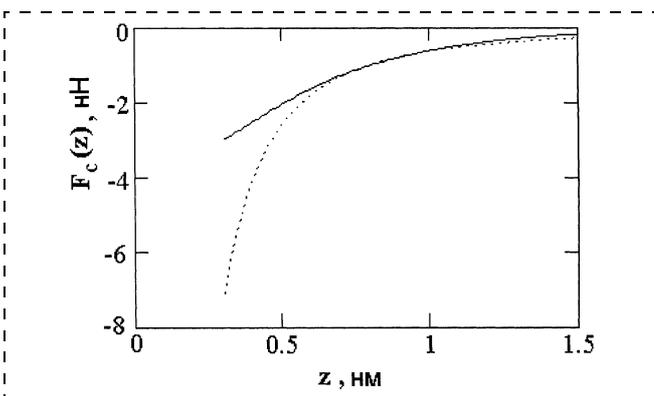


Рис. 1. Консервативная сила взаимодействия между кремниевым нанозондом и поверхностью слюды. Сплошная линия — экспериментальная зависимость, полученная на основе измерений частотного сдвига колебаний зонда вблизи поверхности [2], пунктирная линия — сила Ван-дер-Ваальса $F_c(z) = -A_H R / (6z^2)$

вует экспериментальным данным, а пунктирная — теоретической зависимости для Ван-дер-Ваальсовой силы, описываемой формулой

$$F_c(z) = -A_H R / (6z^2),$$

где $A_H = 1,2 \cdot 10^{-19}$ Дж — константа Гамакера [2]. Из рисунка видно, что при $z > 0,5$ нм Ван-дер-Ваальсова сила вносит доминирующий вклад в консервативное взаимодействие зонда с образцом.

На рис. 2 показана зависимость γ(z). Экспериментальные точки показаны кружками. Две других линии были получены по формуле (2) с подгоночным параметром $V_d = 0,055$ м/с (сплошная линия) и в соответствии с уравнением $F_d = F_c \tau_d z / z$ при $\tau_d = 1,7 \cdot 10^{-8}$ с (штриховая линия), причем обе теоретические кривые были рассчитаны с использованием экспериментальных значений консервативной силы F_c, соответствующих рис. 1. На рис. 2 видно, что зависимость (2) хорошо согласуется с экспериментом, в то время как второе использованное приближение (штриховая линия) приводит к более сильному убыванию γ(z) с расстоянием.

На рис. 3 приведены аналогичные зависимости для металлического контакта Al—Au (111). На рис. 3 видно, что Ван-дер-Ваальсова сила $F_c \propto z^{-2}$ на малых расстояниях завывает (по модулю) силу взаи-

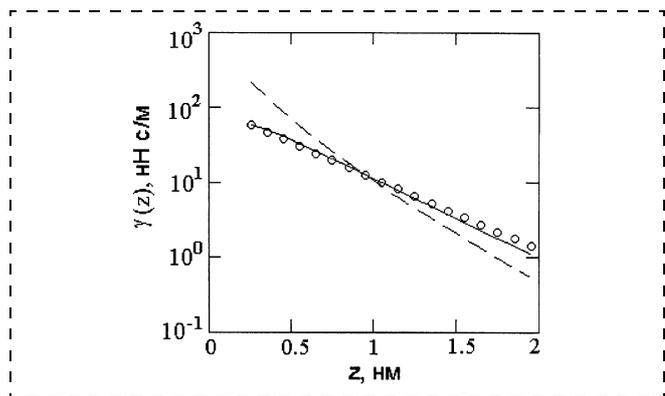


Рис. 2. Коэффициент демпфирования γ(z) для кремниевого зонда у поверхности слюды. Кружки — эксперимент [2], сплошная линия — расчет по формуле (2) с использованием экспериментальных значений консервативной силы (рис. 1) и $V_d = 0,055$ м/с. Штриховая линия — расчет в соответствии с уравнением $F_d(z) = F_c(z) \frac{\tau_d}{z} \dot{z}$ при $\tau_d = 1,7 \cdot 10^{-8}$ с

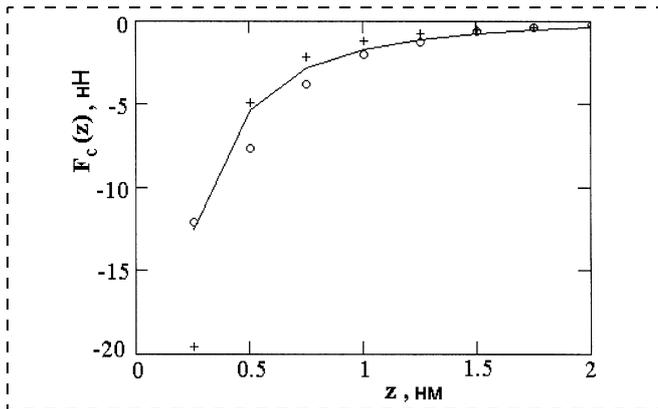


Рис. 3. Консервативная сила между алюминиевым нанозондом и поверхностью (111) золота. Кружки — экспериментальные данные, полученные пересчетом измерений сдвига частоты колебаний зонда у поверхности [3], крестики — Ван-дер-Ваальсова сила $F_c(z) = -A_H R / (6z^2)$. Сплошная линия — аппроксимация $F_c(z) = -4,1 / (0,3 + z)^2$ (F_c и z выражены в нН и нм)

модействия по сравнению с экспериментом (точки, показанные кружками). Более близкой к эксперименту аппроксимацией консервативной силы является $F_c(z) = -4,1 / (0,3 + z)^2$ со сдвигом начала отсчета расстояний (F_c и z в этом случае выражены в наноньютонах и нанометрах).

На рис. 4 кружками показаны экспериментальные значения $\gamma(z)$, а сплошная линия рассчитана в соответствии с (2) при $V_d = 0,042$ м/с, причем, как и в случае взаимодействия кремниевого зонда со слюдой, для F_c в формулу (2) подставлялись экспериментальные значения (рис. 3). Отметим, что как в работе [2], так и в [3] полученные значения параметра V_d близки между собой и согласуются с максимальными значениями скорости зонда при колебаниях $V_{max} = 2\pi A f_0$, а именно: 0,077 м/с в [2] и 0,035 м/с в [3]. Отметим также, что на рис. 4 результаты приведены только для умеренных расстояний зонда от поверхности ($z < 2$ нм), в то время как при $z > 2$ нм экспериментальная зависимость $\gamma(z)$ аппроксимируется степенным законом вида $\gamma(z) = \alpha z^{-3}$, где $\alpha \approx 8 \cdot 10^{-35}$ Дж·с·м² [3]. "Сшивая" эту зависимость с (2) при $z = 10$ нм, получим $V_d^{-1} = \tau_d / l_d = 6,5$ с/м. Эта числовая оценка нам потребуется ниже.

В случае параллельных к поверхности колебаний зонда [4] функция $\gamma(z)$ измерялась в зависимости от напряжения U , приложенного между зондом и образцом, а также в зависимости от температуры T . Экспериментальные результаты были аппроксимированы аналитической формулой $\gamma(z) = \alpha(T) \times (U^2 + U_0^2) / z^n$, $n = 1,3 \pm 0,2$, $U_0 = 0,2$ В, где $\alpha(T)$ — температурный фактор. По сравнению с предыдущими экспериментами [2, 3] первое, что бросается в глаза, — необычная зависимость демпфирующей

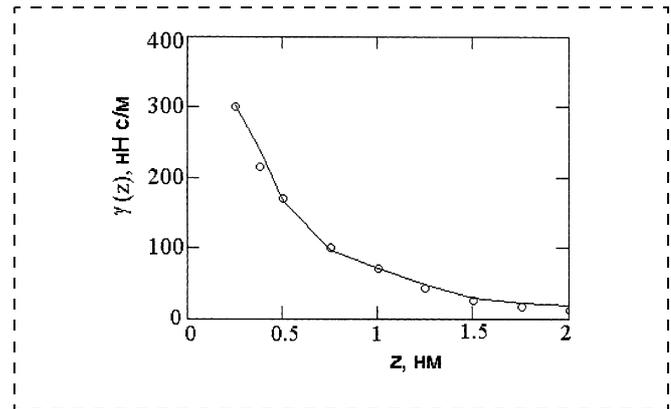


Рис. 4. Коэффициент демпфирования $\gamma(z)$ в случае контакта Al—(111) Au. Кружки — эксперимент [3], сплошная линия — расчет по уравнению (2) с экспериментальными значениями F_c (рис. 3) при $V_d = 0,042$ м/с

силы от расстояния. В данном случае нет информации о консервативных силах, но квадратичная зависимость от электрического напряжения может свидетельствовать о наличии электростатического емкостного взаимодействия. С этим согласуется и меньшее (по сравнению с экспериментами [2, 3]) значение показателя степенной зависимости от расстояния. В случае емкостного взаимодействия для контакта выпуклого зонда с плоской поверхностью консервативная сила притяжения определяется формулой

$$F_c = -\frac{\epsilon_0 \pi R U^2}{z}, \quad (5)$$

где ϵ_0 — электрическая вакуумная константа. Учитывая, что в [4] диссипативная сила имеется и при нулевой приложенной разности потенциалов (авторы [4] связывают ее с наличием на поверхностях пятен заряда), предположим, что суммарная консервативная сила при наличии электрического напряжения между зондом и образцом описывается выражением вида

$$F_c(z) = -\frac{\epsilon_0 \pi R (U^2 + U_0^2)}{z}, \quad (6)$$

а коэффициент затухания, в соответствии с (2), — выражением

$$\gamma(z) = -\frac{\epsilon_0 \pi R (U^2 + U_0^2)}{z V_d}. \quad (7)$$

Тогда при $R = 1000$ нм, $U = 0$ и $z = 10$ нм для согласования (7) с экспериментальным значением $\gamma = 1,5 \cdot 10^{-13}$ кг/с [4] мы должны принять $V_d = 730$ м/с.

Оставив пока в стороне вопрос о физическом смысле столь большой величины V_d (по сравнению

с данными, приведенными в [2, 3]), попробуем сначала объяснить расхождение z -зависимостей коэффициентов демпфирования в (7) и в [4]. Нам представляется, что это расхождение может быть обусловлено неучтенным вкладом Ван-дер-Ваальсовой силы $F_c \propto z^{-2}$. В этом случае комбинация зависимостей α_1/z и α_2/z^2 при подходящем выборе параметров α_1, α_2 может обеспечить приемлемое согласие со степенной зависимостью типа $1/z^n$ с любым значением показателя n между 1 и 2. Если отождествить консервативную силу целиком с Ван-дер-Ваальсовой силой $F_c = -A_H R / (6z^2)$, то, используя (2) и согласуя измеренное и теоретическое значения коэффициента демпфирования при $z = 10$ нм, получим оценку $A_H / V_d = 0,9 \cdot 10^{-22}$ Дж·с/м. Тогда при $V_d = 730$ м/с получим $A_H = 0,66 \cdot 10^{-19}$ Дж, что представляется достаточно реалистичным.

Теперь обсудим значение параметра V_d . Если вернуться к определению $V_d = l_d / \tau_d$, то нужно принять во внимание, что при параллельных к поверхности колебаниях зонда величина l_d , в отличие от случая перпендикулярных колебаний, должна быть значительно больше, поскольку относительный сдвиг соприкасающихся поверхностей при разрыве контакта происходит по длине всего контактного пятна, диаметр которого можно оценить как $D = 2(2Ra)^{1/2}$, где a — характерный размер атома. Поэтому $l_d \approx D$ и $R/V_d = R\tau_d/l_d = (R/8a)^{1/2}\tau_d$. В случае же вертикальных колебаний зонда реалистичной оценкой является $l_d \approx a$. С учетом этого и экспериментального значения γ при $z = 10$ нм из (7) получим (при $U = 0, U_0 = 0,2$ В и $a = 0,3$ нм):

$$\tau_d = \frac{1}{\pi \varepsilon_0} \frac{z\gamma}{U_0^2} \left(\frac{8a}{R}\right)^{1/2} = 2 \cdot 10^{-10} \text{ с.}$$

Возвращаясь к случаю нормальных колебаний зонда [3] (см. выше), будем иметь $\tau_d = 6,5l_d = 6,5a = 6,5 \cdot 0,3 \cdot 10^{-9} \approx 2 \cdot 10^{-9}$ с. Таким образом, оценки параметра τ_d в экспериментах [3, 4] сравнимы по величине, в отличие от значительно различающихся значений V_d и параметра затухания (см. табл. 2), на четыре—пять порядков величины. Это указывает на общность механизма диссипации несмотря на различный тип консервативных сил. Полученные оценки τ_d по порядку величины согласуются с типичными значениями времени затухания фононов. Если сделанные предположения правильны, то параллельное и нормальное движения зонда должны характеризоваться также различной зависимостью диссипативных сил от радиуса зонда: $\propto R^{1/2}$ и $\propto R$ при параллельном и перпендикулярном движении соответственно.

В заключение кратко коснемся температурной зависимости диссипативной силы, наблюдавшейся

авторами [4]. Так, было обнаружено, что при $T = 77$ К сила трения уменьшилась в 6 раз по сравнению с $T = 295$ К, т.е. приблизительно $\alpha(T) \propto T^{4/3}$. В то же время, как следует из рис. 4 работы [4], для того же расстояния зонда от поверхности при $T = 4,2$ К сила трения становится лишь 4 раза меньше, чем при $T = 77$ К. Это соответствует зависимости $\alpha(T) \propto T^{0,48}$. Таким образом, можно констатировать значительное насыщение температурного хода диссипативных сил при понижении температуры. Это должно стать предметом изучения для последующих экспериментальных работ. В целом же наличие температурной зависимости качественно согласуется с фоновым механизмом затухания, который, как мы полагаем, лежит в основе соотношения (2).

3. Выводы

Первым и наиболее существенным итогом работы является установление общности механизмов демпфирования нанозондов при нормальных и латеральных (к поверхности) колебаниях независимо от их размера, материалов контактов, собственных частот и типа консервативных взаимодействий с образцами. В основе механизма демпфирования, как мы полагаем, лежит затухание фононов, генерируемых при разрыве динамических контактов. Второй вывод связан с характером связи между консервативными и диссипативными силами, действующими на осциллирующий зонд: из проведенной интерпретации экспериментов вытекает наличие линейного соотношения между обеими силами, напоминающего закон статического трения Амонтона—Кулона. И, наконец, мы делаем вывод о том, что диссипативные силы, связанные с фоновым затуханием, характеризуются феноменологическим параметром τ_d , значение которого составляет 10^{-9} — 10^{-10} с и, по всей видимости, убывает с понижением температуры. Возможно, что τ_d коррелирует с временем затухания фононов.

Список литературы

1. Dorofeyev I., Fuchs H., Wenning G. and Cotsmann B. // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. P. 2402—2403.
2. Gotsmann B., Seidel C., Anczykowski B. and Fuchs H. // Phys. Rev. 1999. V. B60. P. 1051—1055.
3. Gotsmann B., Fuchs H. // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 86. P. 2597—2602.
4. Stipe B. C., Mamin H. J., Stowe T D., Kenny T. W. and Rugar D // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. Paper № 096801.
5. Dedkov G. V., Kyasov A. A. // Phys. Solids State. 2002. V. 44/10. P. 1809.
6. Dedkov G. V., Kyasov A. A. // Phys. Low.-Dim. Stuct. 2003. V. 1/2. P. 1.
7. Persson B. N. J. and Volokitin A. I. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 3504.
8. Volokitin A. I., Persson B. N. J. // Phys. Rev. 2000. V. B65. Paper № 115419.

УДК 621.315.592

А. И. Якимов, д-р физ.-мат. наук,
А. В. Двуреченский, д-р физ.-мат. наук, проф.,
А. И. Никифоров, канд. физ.-мат. наук,
Институт физики полупроводников СО РАН,
г. Новосибирск

ФОТОПРИЕМНИКИ НА БАЗЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР Ge/Si С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ Ge ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Излагаются физические основы и сообщаются результаты исследований, направленные на создание высокоэффективных фотоприемных элементов на базе гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge для применения в волоконно-оптических линиях связи (диапазон длин волн 1,3...1,55 мкм).

1. Введение

При создании систем автоматического регулирования и управления технологическими процессами, исследовании природных ресурсов Земли, в астрономии, в военной, медицинской и кинофототехнике, а также в телекоммуникационных сетях и Интернете находят широкое применение полупроводниковые фотоприемники (ФП). Если в современной микроэлектронике используется практически только кремний, то в оптоэлектронике одним только этим материалом обойтись не удастся. На каждый спектральный диапазон оптического излучения требуется полупроводник с соответствующей шириной запрещенной зоны. А стоимость большинства таких полупроводников довольно велика.

Решение проблемы "инженерии" ширины запрещенной зоны кремния может осуществляться с помощью формирования гетероструктур, например, таких как Si/Ge. Наиболее гибкими в этом смысле, по-видимому, являются гетероструктуры с германиевыми квантовыми точками (КТ), поскольку, изменяя с помощью контролируемых технологических приемов размеры КТ, их состав и форму, можно целенаправленно управлять энергетическим спектром носителей заряда в системе, и следовательно, эффективной шириной запрещенной зоны оптоэлектронных кремниевых приборов. Кроме того, при переходе от объемного материала к системам пониженной размерности в

значительной мере ослабляются существующие ограничения по правилам отбора при оптических переходах для элементарных полупроводников Si и Ge. Оба этих обстоятельства позволяют надеяться на то, что в результате применения гетероструктур с квантовыми точками при создании кремниевых оптоэлектронных устройств, станет возможным выйти за границы физических ограничений, присущих объемным слоям кремния.

В последнее время удалось достичь значительных успехов как в технологии синтеза слоев Ge/Si с квантовыми точками Ge, так и в понимании фундаментальных физических процессов, происходящих в этой системе [1]. Результаты фундаментальных исследований легли в основу создания приборных структур нового поколения, использующих в своей работе одноэлектронные и квантово-размерные эффекты. Важными для практических применений особенностями разработанных устройств являются:

- использование в качестве базового материала кремния, позволяющее легко интегрировать новые элементы в современную технологию сверхбольших интегральных схем (СБИС);
 - высокие рабочие температуры квантовых приборов (вплоть до комнатной), что является необходимым условием их приложения на практике.
- В частности, были разработаны, изготовлены и исследованы:
- туннельно-резонансные диоды, сформированные на подложках кремния с осажденными слоями фторида кальция и германия, обладающие отрицательным дифференциальным сопротивлением при комнатной температуре и необходимые для кремниевых СВЧ генераторов, работающих в области сотен гигагерц [2];
 - кремниевые нанотранзисторы со встроенными в активный канал слоями нанокристаллов германия, в которых контроль тока сток—исток зарядовым состоянием квантовых точек не требовал значительного охлаждения системы, что особенно важно для реального развития элементной базы квантовых вычислений [3];
 - неохлаждаемые кремниевые фотодиоды для ближнего и дальнего инфракрасного диапазонов спектра излучения (3...20 мкм) [4].

Цель настоящей работы заключалась в создании на базе гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками неохлаждаемых фотодетекторов для длин волн фотонов, используемых в телекоммуникационных линиях связи (1,3...1,55 мкм).

2. Физические основы и постановка задачи

2.1. Понятие о волоконно-оптических линиях связи

Разработка волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) является одним из важнейших направлений развития перспективных способов передачи информации в телекоммуникационных и телефонных сетях, Интернете, оптических компьютерах и т.д. ВОЛС представляет собой систему устройств передачи информации с помощью оптических сигналов по волоконным световодам. ВОЛС содержит передающее устройство, приемное устройство, коммутационные элементы и волоконные световоды. Волоконный световод является основой волоконно-оптической линии связи. Он представляет собой тонкую гибкую нить, изготовленную из прозрачного в заданной оптической области диэлектрического материала, причем показатель преломления центральной его части имеет более высокое значение по сравнению с периферийной областью. Перспективы развития ВОЛС связаны с освоением новых спектральных диапазонов и созданием соответствующей элементной базы. Основные усилия направлены на снижение потерь при распространении сигнала по световоду, создание новых коммутаторов, излучателей и фотоприемных устройств.

Материалом для современных световодов в ВОЛС служит преимущественно кварц. Причинами потерь оптической мощности при распространении сигнала по волокну являются различные виды поглощения, а также обусловленная рассеянием деформация углового распределения лучевого потока и уход возникающих внеапертурных лучей из сердцевины. Типичный спектр поглощения высокочистого кварца схематично представлен на рис. 1, где наглядно отражено наличие окон прозрачности вблизи длин волн 1,3 и 1,55 мкм. Примерно в этой же полосе находится и ближнее окно пропускания атмосферы. Поэтому принято, что актуальным для применения в ВОЛС диапазоном длин волн фотонов является область 1,3...1,55 мкм.

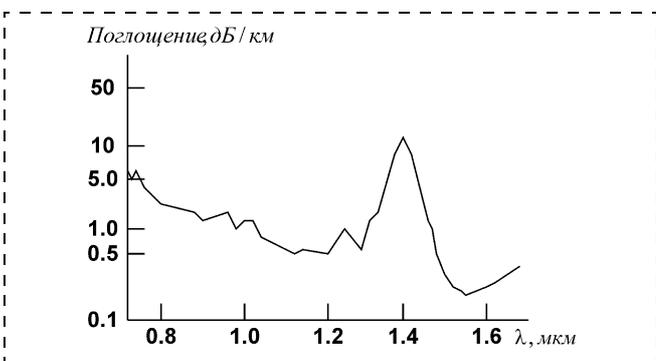


Рис. 1. Типичный спектр поглощения кварцевого световода

2.2. Проблема ИК кремниевых фотодетекторов для ВОЛС

Широкое распространение ВОЛС в настоящее время затрудняется высокой стоимостью оптических приемопередатчиков, функционирующих в ближней ИК области спектра. Ожидается, что переход на совместимую с кремнием технологию изготовления источников и детекторов будет сопровождаться значительным снижением стоимости элементов, что приведет также к монолитной интеграции всех компонентов, включающих элементы радиоусилительной и смещающей электроники, на простой, малой, надежной и легко воспроизводимой оптоэлектронной интегральной схеме. Однако сам кремний прозрачен для фотонов с длиной волны больше 1,1 мкм. Хорошей чувствительностью в области ~1,5 мкм обладают германиевые ФП. В связи с этим возникает проблема создания гетероструктур Ge/Si, фоточувствительных при комнатной температуре в диапазоне телекоммуникационных длин волн 1,3...1,55 мкм.

На начальном этапе решение этой проблемы осуществлялось либо путем осаждения объемных слоев Ge на Si, либо путем выращивания многослойных напряженных сверхрешеток Ge_xSi_{1-x}/Si . Традиционно критериями оценки качества таких ФП служат значения квантовой эффективности, темнового тока при напряжении 1 В или тока насыщения в диодных структурах. Было продемонстрировано, что при длине волны фотонов $\lambda = 1,3$ мкм квантовая эффективность таких ФП составляет $\eta = 1...4,2\%$ в условиях нормального падения света на приемник и может достигать $\eta = 11\%$ при засветке торца планарных волноводов, сформированных на той же кремниевой подложке. В последнем случае прохождение света вдоль слоев Ge/Si и многократное отражение от стенок волновода и позволяло достичь больших значений η . В работе [5] сообщается о высокоскоростном фотодетекторе на базе гетероструктуры *poly*-Ge/Si для ближней инфракрасной ИК области. Прибор демонстрирует импульсный отклик по времени меньший 200 пс, допускающий функционирование прибора на скорости 2,5 Гбит/с, и обладает чувствительностью 16 и 5 мА/Вт для длин волн 1,3 и 1,55 мкм, соответственно, и плотностью темнового тока 1 мА/см².

Несмотря на относительно высокое значение квантовой эффективности, темновые токи в объемных и многослойных Ge_xSi_{1-x}/Si гетероструктурах оказались слишком велики. Так, типичные значения плотности темнового тока при смещении 1 В и комнатной температуре составляли $10^{-4}...10^{-3}$ А/см², а плотность тока насыщения $\approx 10^{-2}$ А/см², что существенно превышало токи как в кремниевых, так и германиевых *p-n*-диодах.

Следующим шагом в решении проблемы разработки эффективных Ge/Si ФП стала замена сплошных слоев Ge/Si слоями германиевых квантовых точек. С точки зрения перспективы встраивания таких элементов в кремниевые СБИС, гетероструктуры Ge/Si с когерентно введенными нанокластерами Ge, обладают серьезным преимуществом, поскольку в них есть возможность заравливания упруго напряженных слоев Ge совершенными по структуре слоями кремния, на котором затем можно формировать другие элементы СБИС. Кроме того, именно на основе такой системы уже изготовлены светодиоды, излучающие при комнатной температуре в диапазоне длин волн 1,3...1,5 мкм и имеющие квантовую эффективность на уровне 0,015 % [6].

В работах [7, 8] сообщалось о создании волноводных структур на основе кремниевых $p-i-n$ -диодов с введенными в базу диода слоями островков Ge. Была получена квантовая эффективность $\eta = 2,3\%$ на длине волны $\lambda = 1,3$ мкм и плотность темнового тока $J = 4,2 \cdot 10^{-4}$ А/см² при обратном смещении 1 В. Авторы работы [9] сообщили о создании Ge/Si $p-i-n$ фотодиода с нанокластерами Ge, в котором при освещении со стороны плоскости $p-n$ -перехода максимальная квантовая эффективность достигала 8 % на длине волны $\lambda = 1,46$ мкм, а темновой ток имел рекордно низкое значение $J = 3 \cdot 10^{-5}$ А/см². В работе [10] было описано функционирование SiGe/Si биполярного фототранзистора с несколькими слоями германиевых КТ, встроенными в коллектор. Структура содержала 10 слоев германиевых КТ, разделенных между собой кремниевыми спейсерами. Детекторы проектировались как для нормального падения света, так и с волноводной геометрией, где освещение проникает через торец образца. Измеренный фотоотклик составлял около 100 и 5 мА/Вт на длинах волн 1,3 и 1,55 мкм соответственно.

Следует отметить, что в цитированных выше работах плотность островков Ge была равна около 100 нм, а высота ~10 нм. При таких больших размерах энергия размерного квантования в плоскости роста (~1 мэВ) много меньше тепловой энергии при комнатной температуре (26 мэВ), поэтому все преимущества ФП с квантовыми точками над системами большей размерности (например, малые темновые токи) не были реализованы в полной мере. Стало ясно, что для дальнейшего улучшения параметров ФП необходимо снижать размеры квантовых точек до значений менее 10 нм и одновременно увеличивать слоевую плотность КТ с тем, чтобы добиться минимальных значений темнового тока без потери квантовой эффективности фотопреобразования.

2.3. Слои квантовых точек Ge как фоточувствительный элемент для кремниевых ИК фотодетекторов

Движение носителей заряда в квантовых точках ограничено в пространстве по всем трем направлениям, и в этом они являются искусственными аналогами атомов. Дополнительное ограничение движения носителей заряда в плоскости структур, а также дискретный энергетический спектр носителей заряда приводит к ряду существенных преимуществ ФП с квантовыми точками по сравнению со структурами с квантовыми ямами, а также объемными слоями. Такими преимуществами для различных механизмов появления фототока являются:

- снятие запрета на оптические переходы, поляризованные в плоскости ФП, что предоставляет возможность работы прибора при нормальном падении света без применения дополнительных решеток и отражателей;
- большое значение силы осциллятора (и следовательно, коэффициента поглощения света) для внутризонных и экситонных переходов вследствие локализации волновой функции носителей заряда во всех трех измерениях пространства;
- большое время жизни фотовозбужденных носителей заряда (а значит и большой коэффициент фотоэлектрического усиления) вследствие низкой скорости захвата носителей в КТ, причиной последнего служит либо отсутствие разрешенных энергетических состояний между уровнем в КТ и зоной распространенных состояний, либо подавление рассеяния на оптических фононах в условиях, когда энергетический зазор между уровнями размерного квантования больше энергии оптического фонона;
- малые темновые токи (а значит и высокая рабочая температура фотодетектора), последнее обстоятельство является следствием равенства энергии фотоионизации КТ и энергии активации проводимости вследствие дискретного энергетического спектра носителей в КТ.

Наиболее существенные недостатки ФП со слоями КТ, которые, однако, можно преодолеть при надлежащем выборе условий синтеза КТ, следующие:

- неизбежная дисперсия размеров КТ в массиве, приводящая к неоднородному уширению спектра поглощения и уменьшению абсолютной интенсивности фотоотклика;
- низкая слоевая плотность КТ ($10^9 \dots 10^{10}$ см⁻²), которая, как правило, на 2—3 порядка меньше типичных концентраций электронов в двумерных подзонах ФП с квантовыми ямами ($10^{11} \dots 10^{12}$ см⁻²).

Формы квантовых точек, их размеры, а значит и электронные свойства можно контролировать на

стадии роста, и в этом они отличаются от реальных атомов. В настоящее время существуют несколько методов формирования квантовых точек. Одним из основных является молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) упруго напряженных гетеросистем. В гетеросистемах Ge—Si экспериментально наблюдают несколько стадий эволюции островков Ge в процессе увеличения эффективной толщины германиевой пленки. Эти стадии различны для подложек с ориентацией поверхности (001) и (111). С точки зрения создания квантовых объектов поверхность (001) является уникальной, потому что только на ней были обнаружены компактные трехмерные бездислокационные островки Ge с размерами 10...100 нм. Появление таких островков, как правило, наблюдается после образования сплошной пленки Ge, сверхструктурные домены которой хорошо различаются между островками.

Процесс упорядочения вызывает появление в системе островков предпочтительных значений их характеристик: размеров, формы, расстояний между островками и их взаимного расположения. Это является результатом минимизации суммарной свободной энергии системы. Наличие избранных характеристик должно проявляться в спектрах рассеяния и дифракции электронов и рентгеновских лучей при взаимодействии с поверхностью, содержащей наноструктуры, а также в электронных и оптических спектрах. С появлением квантовых наноструктур (особенно структур с квантовыми точками) традиционные и хорошо технологически разработанные, однако не прямозонные, полупроводники Si и Ge получили перспективу перейти в класс оптических материалов, которые могут реально использоваться в качестве активного элемента излучателей и фотодетекторов для ВОЛС. В большой мере именно с этим можно связать устойчивый рост интереса к квантовым структурам на основе Ge/Si. Физические эффекты, наблюдаемые в таких структурах, в последние годы становятся основой создания новой элементной базы для СВЧ электроники гигагерцевого и терагерцевого диапазонов, оптоэлектронных устройств и квантовой вычислительной техники.

Проявление эффекта упорядочения в массивах островков нанометровых размеров в гетеросистемах Ge—Si позволило получать бездефектные квантовые точки относительно малых размеров (10...100 нм) с плотностью $10^{10} \dots 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и привело к более четкому проявлению атомно-подобных характеристик в электронных и оптических спектрах этих объектов. Именно в этой системе для выявления одноэлектронных эффектов впервые были использованы массивы нанокластеров [11].

Минимальные размеры островков германия, получаемые при росте на чистой поверхности

кремния, составляют 15 нм. Для уменьшения размеров и увеличения плотности можно проводить рост германия на атомарно чистой окисленной поверхности, которая подготавливается непосредственно в установке МЛЭ [12]. Возможность создания оксидного слоя на поверхности кремния в условиях сверхвысокого вакуума известна достаточно давно. В работе [13] впервые было продемонстрировано, что в зависимости от давления кислорода и температуры можно подобрать режимы травления и роста оксидной пленки. Дальнейшее развитие эта методика получила совсем недавно, когда формирование сверхтонкого оксида было сопряжено с дальнейшим ростом эпитаксиального слоя кремния. Рост островков германия на предварительно окисленной поверхности кремния позволяет существенно уменьшить размеры и увеличить плотность островков, что особенно важно для увеличения квантовой эффективности фотоприемников с квантовыми точками. В работах [14, 15] было показано, что в случае роста островков на окисленной поверхности Si (111) их латеральные размеры менее 10 нм, а плотность выше 10^{12} см^{-2} . Авторы работы [14] предположили, что при этом происходит локальное раскисление оксида кремния германием (реакция диспропорционирования), сопровождающееся десорбцией монооксида германия. В этих местах зарождаются нанокластеры германия, когерентно сопряженные с кремнием.

В работе [16] сообщалось о формировании нанокластеров Ge с размерами менее 10 нм на окисленной поверхности Si (001). Окисление осуществлялось в установке молекулярно-лучевой эпитаксии при напуске кислорода до 10^{-4} Па и температуре подложки 500...600 °С. После откачки кислорода проводилось напыление германия. Процесс роста пленки Ge контролировался по картине дифракции быстрых электронов путем регистрации как качественных изменений структуры и морфологии растущей поверхности пленки, так и количественной информации об упругой деформации элементарной поверхностной ячейки [12]. Для анализа начальной стадии роста пленки германия на окисленной поверхности кремния проводилась регистрация изменения интенсивности зеркального рефлекса и рефлекса трехмерной дифракции (3D-рефлекс). Эти величины очень чувствительны к изменению шероховатости поверхности, а возникновение 3D-рефлекса указывает на наличие трехмерных объектов на исследуемой поверхности. Наличие осцилляций интенсивности зеркального рефлекса в случае роста на чистой поверхности, его гашение и появление 3D-рефлекса при толщине пленки германия более четырех монослоев указывает на послойный рост смачивающего слоя с последующим образованием трехмерных остров-

ков. В случае же роста пленки Ge на оксидированной поверхности интенсивность этих рефлексов изменяется уже после напыления одного монослоя, и осцилляции интенсивности зеркального рефлекса не наблюдается. Это свидетельствует об отсутствии такой стадии роста, как образование смачивающего слоя. Во время напыления первого монослоя на поверхности SiO_2 образуется адсорбционный слой германия, который со второго монослоя трансформируется в трехмерные островки. Таким образом, в отличие от механизма роста Странского—Крастанова, который реализуется на чистой поверхности кремния, на поверхности оксидированного кремния рост пленки германия протекает по механизму Фольмера—Вебера.

В нашей работе по созданию ИК Ge/Si фотодетекторов с квантовыми точками Ge в роли фотоактивного элемента мы использовали слои наноструктур Ge, полученные как на чистой, так и на оксидированной поверхности Si (001).

3. Технологический процесс изготовления Ge/Si фотодетекторов с квантовыми точками Ge

3.1. Ge/Si $p-i-n$ -фотодиоды

Первоначально фотодетекторы выполнялись в виде кремниевых $p-i-n$ -диодов со встроенными в базовую область 30 слоями КТ Ge, разделенными промежутками Si толщиной 20 нм (рис. 2). Для уменьшения размеров и увеличения их плотности островки германия были сформированы на предварительно оксидированной поверхности кремния [17]. Засветка таких структур осуществлялась сверху со стороны плоскости $p-n$ -перехода.

Образцы выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках n^+ -Si с ориентацией (001) и удельным сопротивлением $0,01 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, легированных мышьяком. Температура роста слоев как Si, так и Ge составляла 500°C . Скорость роста поддерживалась на уровне $0,3 \text{ нм/с}$ для Si и $0,03 \text{ нм/с}$ для Ge. Вначале после стандартной процедуры очистки поверхности кремния выращивался буферный слой Si толщиной 250 нм. Затем в камеру роста подавался кислород и при давлении кислорода 10^{-4} Па проводилась процедура оксидирования поверхности Si в течение 10 мин при температуре подложки 500°C . При этом формировался слой SiO_x толщиной несколько десятков нанометров (не показан на рис. 2). Затем проводилась откачка кислорода до давления в камере 10^{-7} Па , осаждение Ge толщиной покрытия $0,5 \text{ нм}$ и заравнивание германия слоем кремния толщиной 20 нм. Последние три процедуры (оксидирование, осаждение $0,5 \text{ нм}$ Ge, нанесение 20 нм Si) повторялись последовательно 30 раз. Многослойная структура Ge/Si закрывалась Si толщиной 220 нм. Формиро-

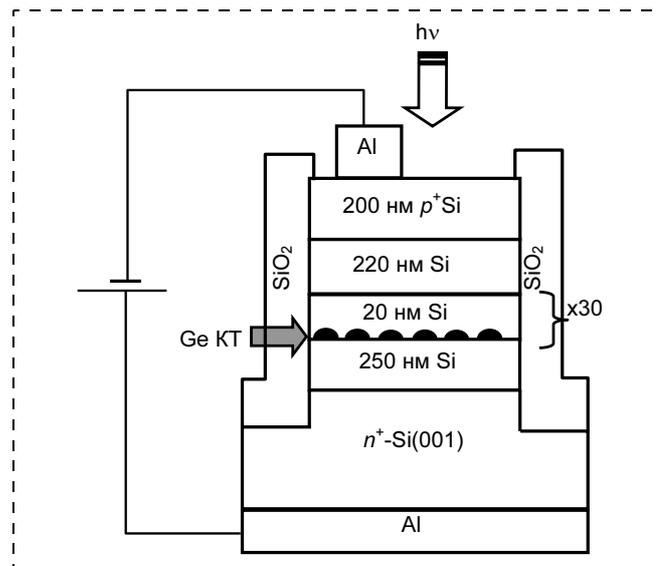


Рис. 2. Схематическое изображение поперечного сечения кремниевого $p-i-n$ -фотодиода с квантовыми точками Ge

вание $p-i-n$ -диода завершалось ростом 200 нм p^+ -Si (концентрация бора в слое $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) и 10 нм p^{++} -Si (концентрация бора 10^{19} см^{-3} , не показан на рис. 2).

Для создания омических контактов к сильнолегированному слою кремния использовались пленки Al, нанесенные в высоковакуумной установке. Формирование столбчатых диодов осуществлялось с помощью стандартной фотолитографии и плазмохимического травления структур на глубину $\sim 1,7 \text{ мкм}$. Площадь поперечного сечения мезоструктуры варьировалась от $150 \times 150 \text{ мкм}^2$ до $700 \times 700 \text{ мкм}^2$. Площади алюминиевых площадок к верхнему слою p^+ -Si составляли $80 \times 80 \text{ мкм}^2$. Поверхность диодов пассивировалась нанесением пленки SiO_2 толщиной $0,5 \text{ мкм}$ из смеси моносилана и кислорода в специальном реакторе.

3.2. Ge/Si n^+-p-n^+ -фототранзисторы

В качестве альтернативного варианта фотоприемника на ближний ИК диапазон нами были предложены и изготовлены биполярные n^+-p-n^+ -Ge/Si фототранзисторы [19], в которых роль плавающей базы выполняли 12 слоев нанокластеров Ge, встроенные в p -область Si. Концентрация легирующей примеси в n^+ -областях кремния (As или Sb) составляла около 10^{18} см^{-3} , концентрация бора в p -слое $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. В данном случае слои нанокластеров Ge выращивались по механизму Странского—Крастанова на поверхности Si (001), не подвергавшейся оксидированию. Температура роста составляла 300°C для слоев Ge и 500°C для слоев Si. Номинальное покрытие в каждом из слоев Ge выбиралось на уровне 1 нм . Это позволяло формировать

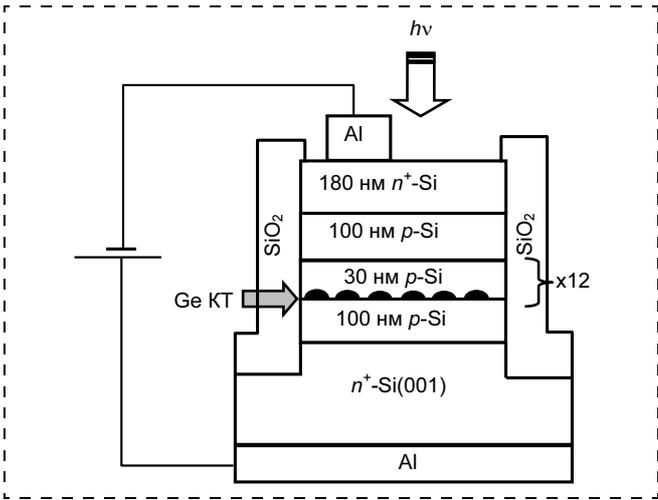


Рис. 3. Схематическое изображение поперечного сечения n^+p-n^+ -Ge/Si фототранзистора с квантовыми точками Ge

нанокластеры с латеральными размерами около 8 нм и слоевой плотностью $(4...5) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Основные технологические операции изготовления приборов были похожими на те, которые описаны в предыдущем параграфе. Более подробно структура слоев прибора показана на рис. 3.

3.3. Ge/Si $p-i-n$ -фотодиоды с волноводной геометрией

В волноводном варианте фотодетекторы представляли собой кремниевые $p-i-n$ -диоды со встроенными в базовую область 36 слоями островков Ge, разделенными промежутками Si толщиной 30 нм. Один и тот же прибор сочетал в себе и вертикальный фотодиод и латеральный волновод (рис. 4). Как и в случае $p-i-n$ -диодов, освещаемых сверху, островки германия формировались с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии в ре-

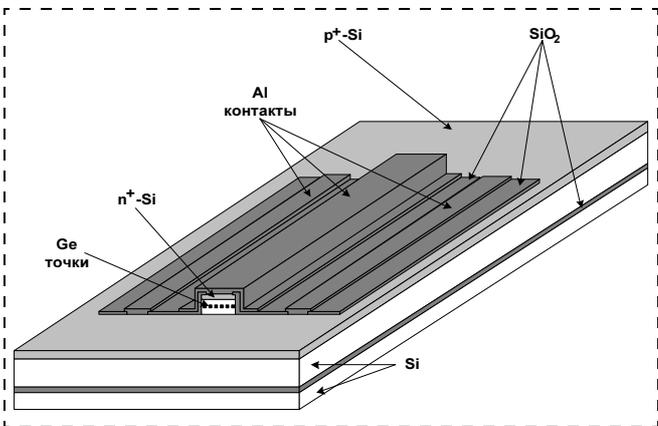


Рис. 4. Изображение волноводного фотодетектора, сформированного на подложке кремний-на-изоляторе

жиме роста Фольмера—Вебера на предварительно оксидированной поверхности кремния [18, 19].

В качестве подложек для изготовления фотодетекторов использовались пластины кремния-на-изоляторе (КНИ), приготовленные по технологии SMART CUT (производство *Wafer World, Inc*). Толщина отсеченного кремниевого слоя КНИ-структуры составляла 280 нм, толщина захороненного оксида — 380 нм. Перед процессом МЛЭ кремниевый слой утончался до 250 нм с помощью термического оксидирования и последующего удаления оксида в растворе плавиковой кислоты. Дифракционная картина, полученная от поверхности кремниевого слоя, свидетельствовала о высоком кристаллическом совершенстве рабочего слоя пластин КНИ и его пригодности для проведения эпитаксиального роста. В ближнем ИК диапазоне разница показателей преломления Si и SiO₂ достаточно велика и составляет около 2. Это обстоятельство и позволяет добиться эффективной пространственной фокусировки луча света, распространяющегося по волноводу вдоль плоскости подложки.

Температура и скорость роста как Si, так и Ge поддерживались аналогичными, как и в случае формирования Ge/Si $p-i-n$ -фотодиодов для зацветки со стороны плоскости $p-n$ -переходов. После стандартной процедуры очистки поверхности КНИ выращивался p^+ -Si слой толщиной 500 нм, легированный бором до концентрации $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, затем осаждался буферный слой намеренно нелегированного Si толщиной 100 нм. После чего в камеру подавался кислород, и при давлении 10^4 Па проводилась процедура оксидирования поверхности Si в течение 10 мин при температуре подложки 500 °С. При этом формировался слой SiO_x толщиной несколько десятков нанометров. Затем осуществлялась откачка кислорода до давления в камере 10^{-7} Па , осаждение Ge с толщиной покрытия 0,5 нм и заращивание германия слоем кремния толщиной 30 нм. Перед заращиванием германия кремнием проводилось кратковременное (на 2 мин) повышение температуры образца до 600 °С. Такой отжиг необходим для дальнейшего роста бездефектных слоев Si. Процедуры оксидирования, осаждения 0,5 нм Ge, двухминутного отжига при 600 °С и нанесения 30 нм Si повторялись последовательно 36 раз. Многослойная структура Ge/Si закрывалась Si толщиной 100 нм. Концентрация фоновой примеси бора в слоях намеренно нелегированного Si составляла $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Формирование $p-i-n$ -диода завершалось ростом 300 нм n^+ -Si (концентрация Sb в слое $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Дальнейшее изготовление фотоприемника происходило на кремниевой линейке с использованием специально разработанного комплекта фотошаблонов. Ширина волноводов составляла 50 мкм, длина варьирова-

лась от 100 мкм до 5 мм. Формирование вертикальных стенок фотодиодов осуществлялось с помощью стандартной фотолитографии и плазмохимического травления на глубину 1,6 мкм. В качестве отражающих покрытий со стороны подложки служил захороненный слой SiO_2 , а со стороны стенок волновода — пленка алюминия толщиной 70 нм, выполняющая одновременно функцию электрического контакта к верхнему слою n^+ -Si. Торец волновода, через который осуществлялась засветка, так же как и все остальные стенки был покрыт пленкой пиролитического SiO_2 толщиной 225 нм, выполняющей функцию просветляющего покрытия на длине волны 1,3 мкм.

4. Структурные характеристики слоев Ge/Si с квантовыми точками Ge

4.1. Дифракция быстрых электронов

Процесс образования островков Ge и качество слоев Si контролировалось *in situ* с помощью дифракции быстрых электронов (ДБЭ) [12]. В качестве примера на рис. 5 приведена картина ДБЭ для нескольких стадий формирования островков Ge на оксидированной поверхности Si (001). После выращивания буферного слоя Si на дифракционной картине наблюдаются рефлексы от сверхструктуры (2×1) , характерной для атомарно чистой поверхности Si (001). Оксидирование приводит к существенному изменению характера дифракции. Все сверхструктурные рефлексы исчезают, объемные рефлексы становятся менее выраженными, а диффузный фон более интенсивен. Это указывает на

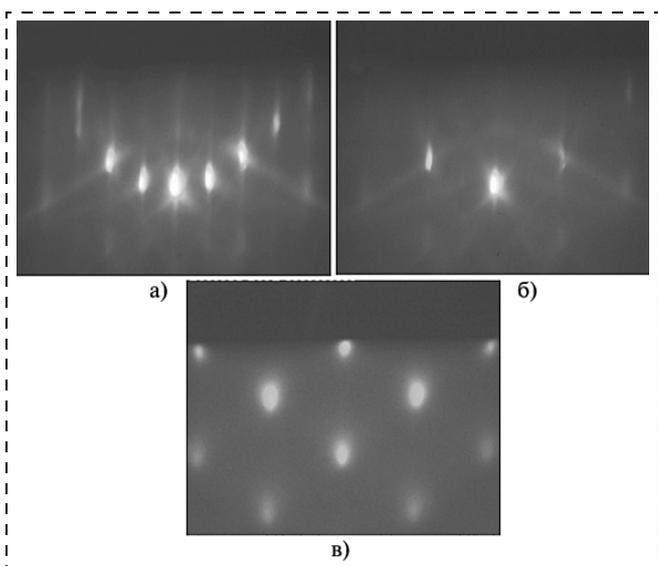


Рис. 5. Картина ДБЭ поверхности образца после различных стадий роста:

a — поверхность Si (001) — 2×1 после роста буферного слоя Si; б — поверхность Si (001) — 1×1 после оксидирования в потоке O_2 ; в — трехмерная дифракция после нанесения 0,5 нм Ge

формирование сплошной пленки SiO_x на поверхности Si. После осаждения Ge на оксидированную поверхность наблюдается дифракционная картина, характерная для трехмерных островков, причем островки имеют ту же самую кристаллографическую ориентацию, что и кремниевая подложка, это свидетельствует об эпитаксиальном характере роста. Кроме того, было обнаружено [12], что в данном случае островки Ge формируются после подачи на подложку уже одного монослоя Ge без образования подстилающего слоя (механизм Фольмера—Вебера), характерного для режима роста по механизму Странского—Крастанова. Таким образом, нанокластеры Ge в подобной системе полностью изолированы друг от друга. Это обстоятельство представляется нам важным, поскольку наличие двумерных состояний в подстилающем слое в ряде случаев может заметно изменять процессы захвата носителей в КТ и влиять на время жизни носителей [20, 21].

4.2. Микроскопические исследования структуры слоев Ge/Si

Морфология слоев Ge/Si с квантовыми точками изучалась методами сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) в плоскости поверхности, а также с помощью просвечивающей электронной микроскопии. На рис. 6 показано изображение поверхности Ge/ SiO_x /Si (001), сформированной после осаждения одного слоя Ge с толщиной покрытия 0,5 нм, полученное с помощью сканирующей туннельной микроскопии. Как видно из рисунка,

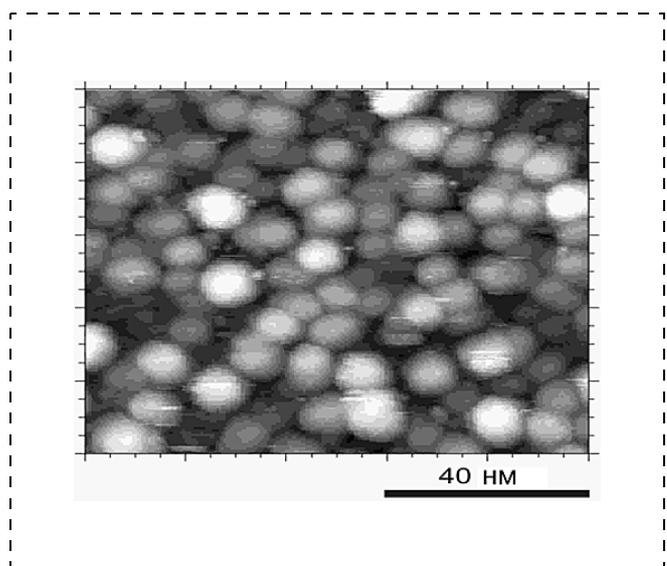


Рис. 6. Изображение массива островков Ge на оксидированной поверхности Si (001), полученное с помощью сканирующего туннельного микроскопа; температура осаждения Ge 650 °С, толщина покрытия 0,5 нм Ge

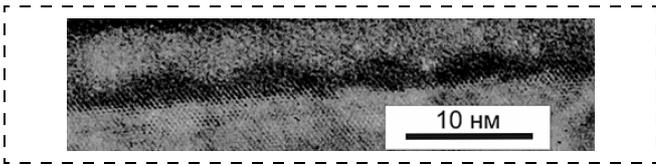


Рис. 7. Фрагмент поперечного сечения структуры Ge/Si (001). Толщина осажденного Ge 1 нм, температура роста 300 °С. Изображение получено с помощью высокоразрешающей электронной микроскопии; темная область — слой Ge

поверхность состоит из массива островков. Статистическая обработка профилей поверхности дала среднее значение размеров островков Ge в плоскости роста ~ 10 нм, плотность островков составляет около $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 7 показан фрагмент поперечного сечения структуры, в которой слой Ge был выращен при температуре 300 °С на не окислявшейся поверхности Si (001). Образование островков Ge (темные области на рисунке) проходило по механизму Странского—Крастанова. Номинальная толщина слоя Ge составляла в данном случае около 1 нм (8 монослоев). Средние размеры островков Ge в плоскости роста 8 нм, плотность островков $(4...5) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Высота островков ≈ 2 нм, толщина сплошного подстилающего слоя Ge была оценена как 0,7 нм (5 монослоев). Именно такие слои использовались при создании биполярных n^+p-n^+ фототранзисторов.

4.3. Комбинационное рассеяние света и фотолюминесценция

Структура нанокластеров Ge анализировалась из данных спектроскопии комбинационного рассеяния света [18]. Использовалась геометрия квазиобратного рассеяния. Применялась (XY) поляризационная геометрия рассеяния: вектор поляризации падающего излучения был направлен вдоль кристаллографического направления структур $\langle 001 \rangle$ (ось X), рассеянный свет регистрировался в поляризации $\langle 010 \rangle$ (ось Y). Выбор такой геометрии обусловлен тем, что она является разрешенной для рассеяния на LO фононах в германии и кремнии и запрещенной для двухфононного рассеяния на TA фононах от подложки кремния. Это позволяло избавиться от сложностей в интерпретации спектров комбинированного рассеяния, рассмотренных в работе [23]. Исходя из этих данных, было установлено [18], что относительное содержание германия x в квантовых точках, полученных при температурах роста 500–600 °С составляет примерно 65–70 %. Состав Ge в нанокластерах, полученных при более низких температурах, близок к 100 %.

В измеренных при температуре 4,2 К спектрах стационарной фотолюминесценции (ФЛ) изготовленных структур [18] наблюдается группа линий

рекомбинации экситонов в кремнии с энергиями в диапазоне 1,05...1,10 эВ и широкая полоса в области 0,8 эВ ($\lambda = 1,55$ мкм), обусловленная непрямой в реальном пространстве оптической рекомбинацией между дырками, локализованными в островках Ge, и электронами, находящимися в Si на гетерогранице 2-го типа. Наличие эффективной ФЛ в интересующем диапазоне длин волн позволяло надеяться на получение высокой квантовой эффективности фотопреобразования в волноводном фотодетекторе.

5. Фотоэлектрические характеристики фотоприемников

Зависимости плотности темнового тока от напряжения при комнатной температуре для диодов различной площади представлены на рис. 8. Значение плотности темнового тока практически не зависит от площади диода, что свидетельствует о малости поверхностных токов утечки и доминировании объемных процессов переноса заряда. Из вольт-амперных характеристик были определены фактор неидеальности $n = 1,02$ и плотность тока насыщения $J_s = 6 \cdot 10^{-6} \text{ А/см}^2$. Близость фактора неидеальности к единице свидетельствует об отсутствии существенного вклада генерационно-рекомбинационных токов, обусловленных глубокими центрами в базе диода. Значение тока насыщения на 1–2 порядка меньше таковой в Ge $p-n$ - и $p-i-n$ -диодах ($10^{-4}...10^{-3} \text{ А/см}^2$) [24], это указывает на то, что эффективная ширина запрещенной зоны в гетероструктуре Ge/Si с квантовыми точками больше, чем в объемном Ge. Причина — размерное квантование энергетического спектра дырок в нанокластерах Ge. Плотность темнового тока при обратном смещении, равном 1 В, составила $2 \cdot 10^{-5} \text{ А/см}^2$. Насколько нам известно, это значение является наименьшим из достигнутых в настоящее время для Ge/Si ФП.

Типичные спектральные зависимости амперваттной чувствительности при различном обратном смещении в условиях падения света по нормали к поверхности ФП показаны на рис. 9. Температура работы детектора — комнатная. Видно, что фоточувствительность Ge/Si $p-i-n$ -диода с квантовыми точками в ближней ИК области спектра фотонов простирается вплоть до длин волн 1,6...1,7 мкм.

На рис. 10 приведена зависимость квантовой эффективности η на длине волны $\lambda = 1,3$ мкм от обратного смещения. Значение η рассчитывалось, исходя из известного соотношения между чувствительностью R , энергией фотона $h\nu$ и зарядом электрона e : $R = (e \cdot h\nu)\eta$. При увеличении смещения квантовая эффективность растет и насыщается при $U \approx 2$ В. Измерения вольт-фарадных ($C-V$) ха-

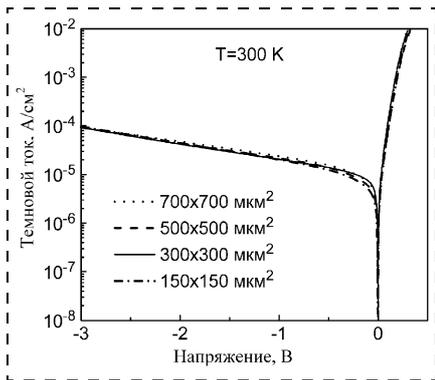


Рис. 8. Темновые вольт-амперные характеристики фотодиодов различной площади поперечного сечения

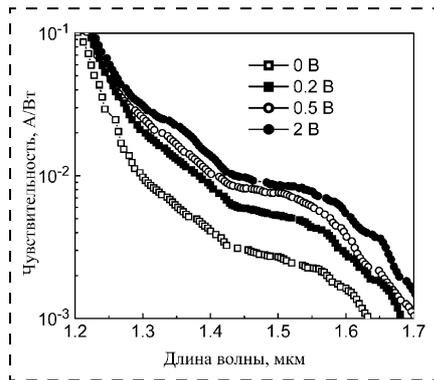


Рис. 9. Спектральные характеристики чувствительности для различных обратных смещений

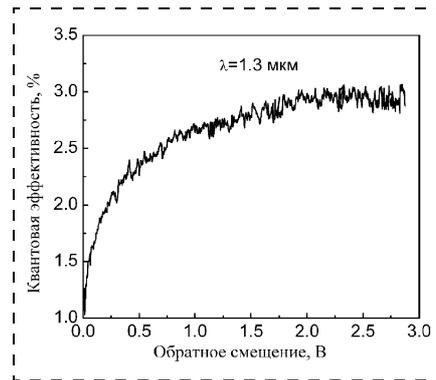


Рис. 10. Зависимость квантовой эффективности фотодиода на длине волны 1,3 мкм от обратного смещения

рактических диодов показали, что в диапазоне обратных смещений 0...5 В емкость приборов не меняется с точностью до 5 %. Это означает, что весь i -й слой находится в области пространственного заряда, и квантовые точки не заряжены (в противном случае перезарядка КТ приводила бы к появлению особенностей на C - V -характеристиках). Следовательно, все 30 слоев квантовых точек Ge могут участвовать в процессе межзонного поглощения излучения даже в несмещенном состоянии, и дальнейшее увеличение обратного смещения, казалось бы, не должно приводить к увеличению η .

Объяснить рост квантовой эффективности в электрическом поле можно на основе следующих соображений. Гетеропереход Ge/Si принадлежит ко 2-му типу, поскольку нижнее энергетическое состояние для электронов находится в зоне проводимости Si, а нижнее состояние для дырок — в Ge [25] (рис. 11). Поглощение фотонов с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны Si, приводит к переходу электронов из валентной зоны Ge в зону проводимости Si. При этом в зоне проводимости Si появляются свободные электроны, а в островках Ge — дырки (см. рис. 11). Поскольку дырки

локализованы в КТ Ge, то в слабых электрических полях основной вклад в фототок вносят только электроны. При больших напряжениях дырки могут эффективно туннелировать из локализованных в КТ состояний в валентную зону Si, увеличивая тем самым фототок. Ясно, что в достаточно сильных полях, когда все фотодырки имеют возможность оторваться от КТ, произойдет насыщение фотоотклика.

Максимальная квантовая эффективность детектора составила 3 %, что близко к значениям, полученным для фотоприемников на основе напряженных многослойных сверхрешеток Ge_x/Si_{1-x} .

Работа $n^+ - p - n^+$ -Ge/Si фототранзистора основана на уменьшении потенциального барьера для электронов между сильнолегированными областями $n^+ - Si$ вследствие фотогенерации дырок в КТ Ge в результате межзонных переходов и появления в них локализованного положительного заряда (рис. 12). Уменьшение барьера при освещении приводит к увеличению тока инжекции из эмиттера в коллектор, т.е. к появлению фототока, значение которого определяется положительным зарядом базы. Освещение фототранзисторов осуществлялось

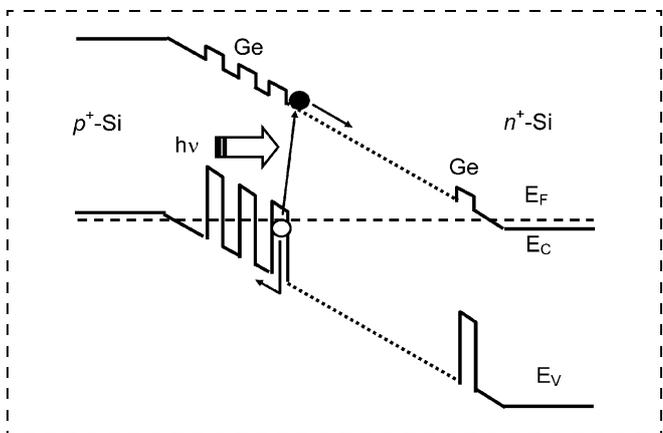


Рис. 11. Энергетическая диаграмма $p-i-n$ -диода и схема оптического перехода в равновесии

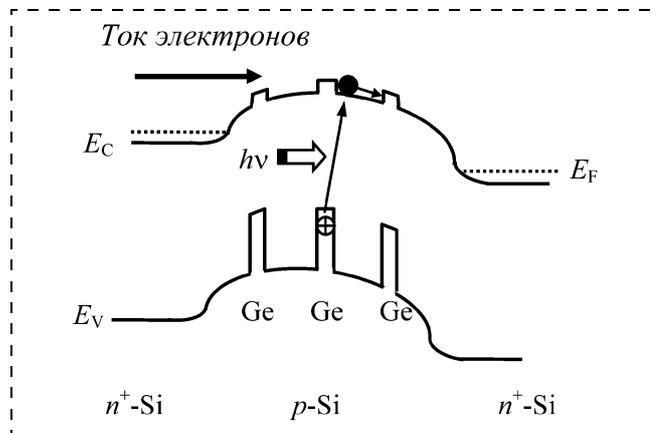


Рис. 12. Энергетическая диаграмма $n^+ - p - n^+$ -фототранзистора, в базу которого встроены слои нанокластеров Ge

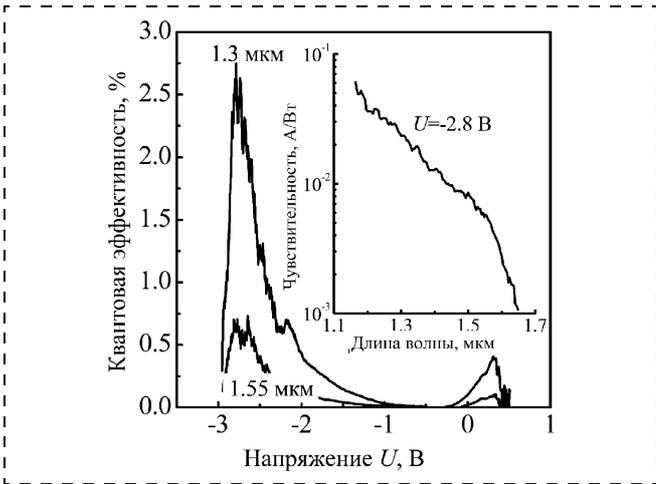


Рис. 13. Зависимость квантовой эффективности фототранзистора от приложенного напряжения. На вставке показана спектральная характеристика фотоотклика при напряжении $U = -2,8$ В

также со стороны $p-n$ -переходов. Спектральная характеристика фотоотклика и зависимость квантовой эффективности от напряжения для одного из фототранзисторов приведены на рис. 13. Асимметрия фототока относительно приложенного напряжения связана с различием в уровнях легирования эмиттера и коллектора. В данном случае, стимулированная электрическим полем эмиссия дырок из нанокластеров Ge в валентную зону Si приводит к уменьшению положительного заряда в базе фототранзистора и, как следствие, к падению квантовой эффективности фотопреобразования при больших напряжениях. Оказалось, что как и в случае p^+-i-n^+ -фотодиодов, максимальная квантовая эффективность фототранзистора находится на уровне 2,5 % для длины волны 1,3 мкм.

Типичные спектральные зависимости амперваттной чувствительности фотодетектора с волноводной геометрией в режиме тока короткого замы-

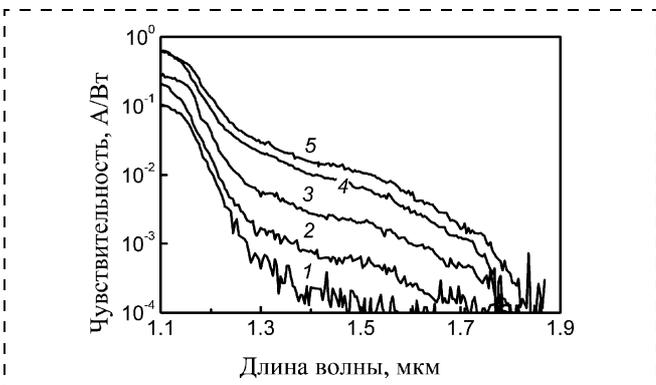


Рис. 14. Спектральные зависимости чувствительности фотодетекторов с различной длиной волновода L в режиме тока короткого замыкания:

1 — $L = 0,2$ мм; 2 — $0,5$ мм; 3 — 1 мм; 4 — 2 мм; 5 — 3 мм

кания (смещение $U = 0$ В) в условиях засветки торца волновода показаны на рис. 14. Различные кривые соответствуют различным длинам волновода L . Температура образца — комнатная. Для исключения проникновения света в исследуемый ФП через подложку, которое может привести к ошибке в расчете освещенности из-за увеличения реальной площади засветки, луч света направлялся на детектор сверху под углом $\sim 5^\circ$ по отношению к нормали, направленной к торцу детектора. Площадь фоточувствительного элемента бралась равной 50×400 мкм², где 50 мкм — ширина волновода, 400 мкм — полная толщина структуры, включая подложку. Такая процедура не учитывает оптическое связывание света в волноводе и при расчете чувствительности и квантовой эффективности дает оценку снизу.

На рис. 15 приведена зависимость квантовой эффективности η на длинах волн $\lambda = 1,3$ и $1,55$ мкм от длины волновода и значения обратного смещения. Значение η рассчитывалось как и в случае Ge/Si $p-i-n$ фотодиодов для засветки со стороны плоскости $p-n$ -переходов. Оказалось, что максимальная квантовая эффективность реализуется в структурах с длиной волновода $L > 3$ мкм (рис. 15, а), значением обратного смещения $U > 3$ В (рис. 15, б),

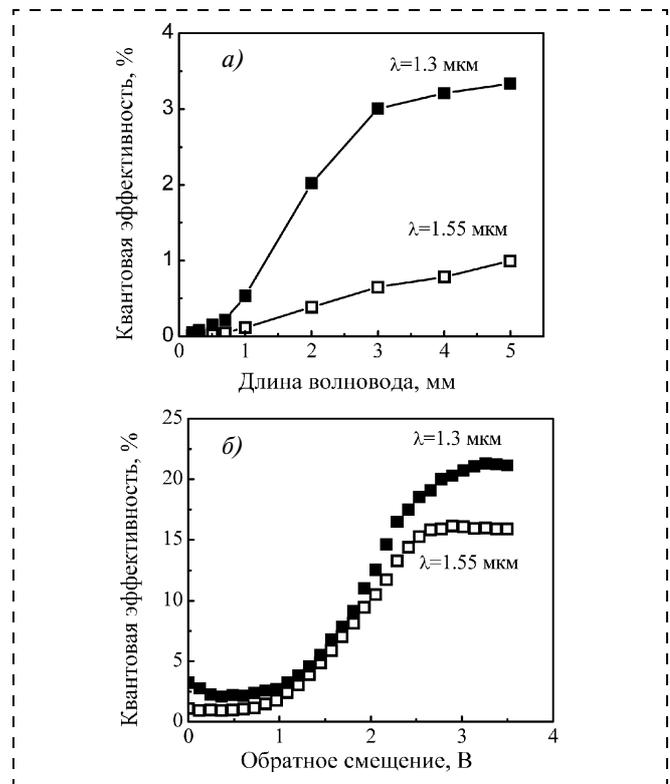


Рис. 15. Зависимость квантовой эффективности на длинах волн 1,3 мкм и 1,55 мкм:

а — от длины волновода в режиме тока короткого замыкания; б — значения обратного смещения при длине волновода $L = 4$ мкм

и достигает значений 21 и 16 % на длинах волн 1,3 и 1,55 мкм соответственно. Насыщение η в длинных волноводах, по-видимому, означает, что в этом случае происходит поглощение всего света, проникающего через торец ФП и проходящего вдоль германиевых слоев.

Заключение

Основные результаты работы состоят в следующем.

1. На основе многослойных гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge реализованы фотоприемные элементы для волоконно-оптических линий связи (диапазон длин волн 1,3...1,55 мкм), способные встраиваться в комплекс фотонных компонентов на едином кремниевом чипе. Слоевая плотность квантовых точек составляет $(0,3...1,0) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, размеры точек в плоскости роста порядка 10 нм. Структуры выращивались с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии.

2. Достигнуто наименьшее из известных в литературе для Ge/Si фотоприемников значение темнового тока при комнатной температуре ($2 \cdot 10^{-5} \text{ А/см}^2$ при обратном смещении 1В).

3. В фотодиодах и фототранзисторах с засветкой со стороны плоскости $p-n$ -переходов квантовая эффективность составила 3 % на длине волны 1,3 мкм. Показано, что максимальное значение квантовой эффективности реализуется в волноводных структурах с засветкой со стороны торца волноводов и достигает значений 21 и 16 % на длинах волн 1,3 и 1,5 мкм соответственно.

Авторы благодарны В. В. Кириенко, Н. П. Степиной, С. А. Тийсу, А. К. Гутаковскому, В. А. Володину, Т. С. Шамирзаеву за оказанную помощь в работе на различных этапах ее выполнения.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 03-02-16526, 03-02-15468), гранта Прези-

дента РФ по поддержке молодых докторов наук (МД-28.2003.02) и ИНТАС (№ 01-0615).

Список литературы

1. Пчеляков О. П., Болховитянов Ю. Б., Двуреченский А. В. и др. // ФТП. 2000. Т. 34. С. 1281—1299.
2. Yakimov A. I., Derjabin A. S., Sokolov L. V. et al. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. P. 499—501.
3. Yakimov A. I., Dvurechenskii A. V., Kirienko V. V., Nikiforov A. I. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 80. P. 4783—4785.
4. Yakimov A. I. and Dvurechenskii A. V. // In: Intersubband Infrared Photodetectors. Ed. by V. Ryzhii. Selected Topics in Electronics and Systems. V. 27. World Scientific. Singapore. 2003. P. 281—298.
5. Masini G., Colace L., Assanto G. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 2524—2526.
6. Chang W.-H., Chou A. T., Chen W. Y. et al. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. P. 2958—2960.
7. Elcurdi M., Boucaud P., Sauvage S. et al. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 80. P. 509—511.
8. Elcurdi M., Boucaud P., Sauvage S. et al. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 92. P. 1858—1861.
9. Tong S., Wan J. L., and Wang K. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 80. P. 1189—1191.
10. Elving A., Hansson G. V., Ni W.-X. // Physica E. 2003. V. 16. P. 528—532.
11. Yakimov A. I., Markov V. A., Dvurechenskii A. V., Pchelyakov O. P. // Phil. Mag. B. 1992. V. 65. P. 701—705.
12. Никифоров А. И., Ульянов В. В., Пчеляков О. П. и др. // ФТП. 2004. Т. 46. С. 80—83.
13. Lander J. J., Morrison L. // J. Appl. Phys. 1962. V. 33. P. 2089—2092.
14. Shklyayev A. A., Shibata M., Ichikawa M. // Phys. Rev. B. 2000. V. 62. P. 1540—1543.
15. Barski A., Derivaz M., Rouviere J. L., Buttard D. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. P. 3541—3543.
16. Yakimov A. I., Dvurechenskii A. V., Nikiforov A. I. et al. // Phys. Rev. B. 2003. V. 67. P. 125—318.
17. Якимов А. И., Двуреченский А. В., Никифоров А. И. и др. // ФТП. 2003. Т. 37. С. 1383—1388.
18. Якимов А. И., Двуреченский А. В., Кириенко В. В. и др. // ФТП. 2004. Т. 38. С. 1265—1269.
19. Двуреченский А. В., Якимов А. И. // В кн.: Нанотехнологии в полупроводниковой электронике: Под ред. А. Л. Асеева. Новосибирск, Издательство СО РАН, 2004. С. 308—337.
20. Morris D., Perret N., Fafard S. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75. P. 3593—3595.
21. Yoda Y., Moriwaki O., Nishioka M., Arakawa Y. // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. P. 4114—4117.
22. Kolobov A. V. // J. Appl. Phys. 2000. V. 87. P. 2926—2930.
23. Пикус Г. Е. Основы теории полупроводниковых приборов. М.: Наука, 1965. С. 448.
24. Yakimov A. I., Stepina N. P., Dvurechenskii A. V. et al. // Semicond. Sci. Technol. 2000. V. 15. P. 1125—1130.

ИНФОРМАЦИЯ

Состоялась 12-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов "МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОРМАТИКА — 2005" (МОСКВА, ЗЕЛЕНГРАД, МИЭТ, АПРЕЛЬ 2005 Г.).

Научные направления работы конференции:

- Физика и технология изделий микро- и нанoeлектроники
- Материалы и компоненты электронной техники
- Проектирование электронных компонентов и систем
- Микросистемы и микромеханика
- Биомедицинская электроника
- Опто- и акустоэлектроника
- Математические модели и алгоритмы в информатике
- Управляющие и вычислительные системы и приборы
- Автоматизированные информационные системы
- Телекоммуникационные системы и связь
- Технологическое оборудование микроэлектроники
- Экологические аспекты микро- и нанoeлектроники
- Менеджмент и маркетинг наукоемких производств
- Интегрированные системы менеджмента качества

УДК 535.82

К. П. Гайкович, д-р физ.-мат. наук,
В. Ф. Дряхлушин, канд. физ.-мат. наук,
Д. Е. Николичев,
Институт физики микроструктур РАН,
г. Нижний Новгород

ДЕКОНВОЛЮЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СКАНИРУЮЩЕЙ ОЖЕ-МИКРОСКОПИИ И В СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ¹

Статья продолжает цикл работ по улучшению разрешающей способности в сканирующей зондовой микроскопии методом деконволюции изображений с учетом передаточной функции зондов. Показаны возможности улучшения латерального разрешения в сканирующей Оже-микроскопии (СОМ), применяющейся для диагностики химического состава поверхности наноструктур, а также в сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Задачи восстановления изображений из двумерных уравнений свертки решаются методом, основанном на теории некорректных задач Тихонова.

Введение

В ряде работ выполнены исследования по коррекции влияния нелокальности взаимодействия зонда с поверхностью исследуемой среды в различных видах зондовой микроскопии. Влияние аппаратной функции зонда приводит к сглаживанию и искажению измеряемого изображения, поэтому в случаях, когда эта функция может быть определена (даже приближенно), разрешающая способность может быть существенно улучшена путем решения соответствующей обратной задачи. Эта задача, как правило, сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода типа двумерной свертки, и решение может быть получено на основе метода обобщенной невязки Тихонова, в котором параметр регуляризации определяется интегральной мерой погрешности измерений. Этот метод уже с успехом применялся для решения задачи деконволюции в сканирующей ближнепольной оптической микроскопии [1–3], в сканирующей туннельной микроскопии [4–6], при сканировании магнитного поля сверхпроводя-

щих пленок [7] и при СВЧ сканировании неоднородной подповерхностной структуры диэлектрика [8]. Разработанные алгоритмы применялись для анализа ближнепольного излучения полупроводниковых лазеров и в исследованиях поверхностной плотности электронных состояний пиролитического графита. В данной работе аналогичный подход применен в сканирующей Оже-микроскопии и в электронной микроскопии. Современные микро- и наноэлектроника требуют развития методов химической диагностики структур с нанометровым разрешением. Прогресс сканирующей зондовой микроскопии, в частности, метода сканирующей Оже-микроскопии может решить эту проблему [9, 10]. Уровень разрешающей способности данного метода по глубине уже достиг нанометрового масштаба [11], но латеральная разрешающая способность составляет пока не меньше десятков нанометров. Изображения, получаемые с помощью электронной микроскопии, также могут быть улучшены путем деконволюции с учетом аппаратной передаточной функции.

Задача восстановления изображения. Анализ передаточной функции

Если измеряется двумерное распределение некоторой физической величины, связанной с получаемым изображением, то уравнение, связывающее измеренное и истинное изображения, может быть описано (по крайней мере, приближенно) уравнением двумерной свертки:

$$z_m^\delta(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(x-s, y-t) z(s, t) ds dt, \quad (1)$$

где ядро $K(w, W)$ представляет собой передаточную функцию; $z_m^\delta(x, y)$ — распределение измеряемого сигнала; $z(s, t)$ — восстановленное изображение.

Решение (1) позволяет существенно улучшить качество и разрешение изображений.

Ширину аппаратной функции (ядра K), используемой при решении (1), определяет ширина пучка. В частности, можно определить эту функцию по форме наименьших деталей на измеренном изображении, которые могут рассматриваться как отклик на δ -функцию. Тогда из (1) мы имеем $z_m^\delta(x, y) = K(x, y)$, т.е. все эти детали должны иметь одинаковую форму. Критерий наличия таких маленьких структур на исследуемой поверхности весьма прост: все наименьшие детали изображения должны быть одинаковыми и повторять форму передаточной функции зонда $K(x, y)$. Как и

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 03-02-17321).

в большинстве ранее решаемых задач, в рассматриваемом случае ядро может быть с хорошей точностью описано двумерным гауссовым распределением:

$$K(x, y) = \frac{4}{\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-4\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right]. \quad (2)$$

Метод деконволюции

Уравнение (1) является интегральным уравнением Фредгольма 1-го рода. Известно, что решение уравнений этого типа представляет собой некорректную задачу, требующую применения методов регуляризации, основанных на использовании дополнительной (априорной) информации о точном решении. Если использовать информацию о принадлежности решения к классу интегрируемых с квадратом функций, имеющих интегрируемую с квадратом производную, приближенное решение (1) z^α может быть найдено методом обобщенной невязки Тихонова [12]. Предполагается, что известна оценка интегральной ошибки измерений δ и мера погрешности h приближенно известного оператора K_h , которые удовлетворяют условиям

$$\|z_m - z_m^\delta\|_{L_2} \leq \delta, \quad \|K - K_h\|_{W_2^2 \rightarrow L_2} \leq h, \quad (3)$$

где z_m — левая часть (1), соответствующая точному решению; z_m^δ — данные измерений с ошибкой δ . Согласно методу Тихонова приближенное решение (1) находится из условия минимума функционала обобщенной невязки:

$$M_\alpha[z^\alpha] = \|K_h z^\alpha - z_m^\delta\|_{L_2}^2 + \alpha \|z^\alpha\|_{W_2^2}^2 \quad (4)$$

при дополнительном условии, которое выражает принцип обобщенной невязки и позволяет найти значение параметра регуляризации α при заданном уровне погрешностей измерений и оператора:

$$\|K_h z^\alpha - z_m^\delta\|_{L_2}^2 = (\delta + h \|z^\alpha\|_{W_2^2})^2. \quad (5)$$

Для решения двумерных задач с большой размерностью используются свойства преобразования Фурье:

$$z^\alpha(s, t) = \frac{1}{4\pi^2} \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\tilde{K}_h^*(\omega, \Omega) \tilde{z}_m^*(\omega, \Omega) e^{i(\omega s + \Omega t)}}{L(\omega, \Omega) + \alpha [1 + (\omega^2 + \Omega^2)^2]} d\omega d\Omega, \quad (6)$$

где $\tilde{K}_h^*(\omega, \Omega) = \tilde{K}_h(-\omega, -\Omega)$;

$$L(\omega, \Omega) = |\tilde{K}_h(\omega, \Omega)|;$$

$$\tilde{z}_m^*(\omega, \Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} z_m^\delta(x, y) e^{-i(\omega x + \Omega y)} dx dy; \quad (7)$$

$$\tilde{K}_h(\omega, \Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K_h(u, w) e^{-i(\omega u + \Omega w)} du dw. \quad (8)$$

Эти формулы позволяют решить проблему быстрых вычислений на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье для размерности области анализа (256 × 256) пикселей и более.

Численное моделирование

Важным преимуществом рассматриваемого метода является сходимость получаемого приближенного решения к точному в метрике W_2^2 , и, следовательно, равномерная сходимость (т.е. по максимуму модуля) по мере уменьшения погрешности измерений в интегральной метрике [12]. Значения параметров погрешности измерений δ и h (оцененные в метрике L_2) определяют качество восстановления, неявно регулируя параметр регуляризации, от которого зависит степень заглаживания приближенного решения. При $(\delta, h) \rightarrow 0$ восстановленное распределение равномерно сходится к истинному. Поэтому нет необходимости использовать большие статистические ансамбли для получения представительных оценок точности восстановления, как это требуется в других методах, обладающих интегральной или среднеквадратичной сходимостью — достаточно выполнить численное моделирование для типичных, и еще, может быть, для экстремальных распределений.

Известно, что точность восстановления для некорректных задач может быть оценена только на основе результатов численного моделирования по замкнутой схеме: задается исходное распределение, по нему вычисляются точная левая часть (1), на нее набрасывается случайная погрешность, чтобы получить "данные измерений", уравнение (1) решается и результаты восстановления сравнива-

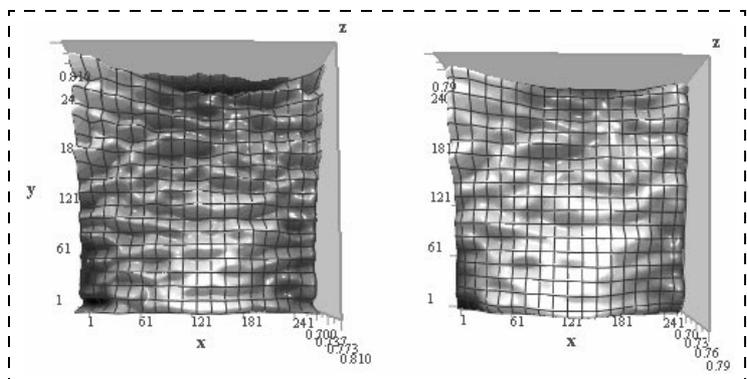


Рис. 1. Численное моделирование. Слева — исходное двумерное распределение; справа — точные "данные измерений", полученные путем свертки исходного распределения с аппаратной функцией зонда (2) с полуширинами 8 пикселей

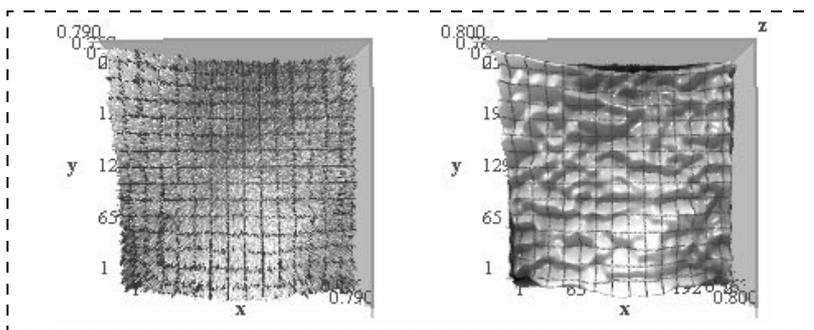


Рис. 2. Численное моделирование. Слева — "данные измерений" после набрасывания случайной ошибки; справа — результаты восстановления по этим данным исходного распределения

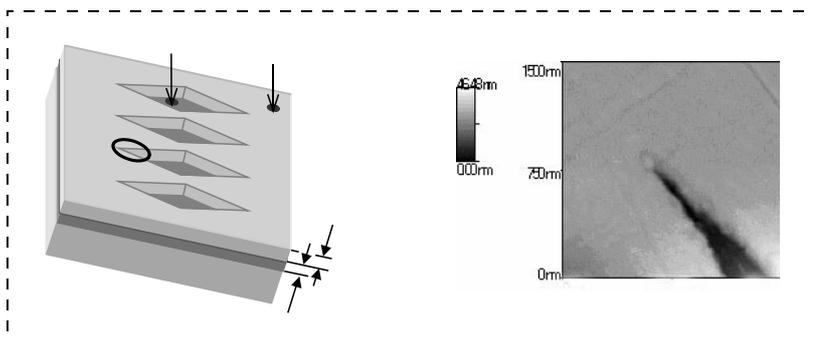


Рис. 3. Слева — образец Ni—Cr, использованный в измерениях (кружком помечена область измерений); справа — изображение измеряемой области, полученное с помощью атомно-силового микроскопа

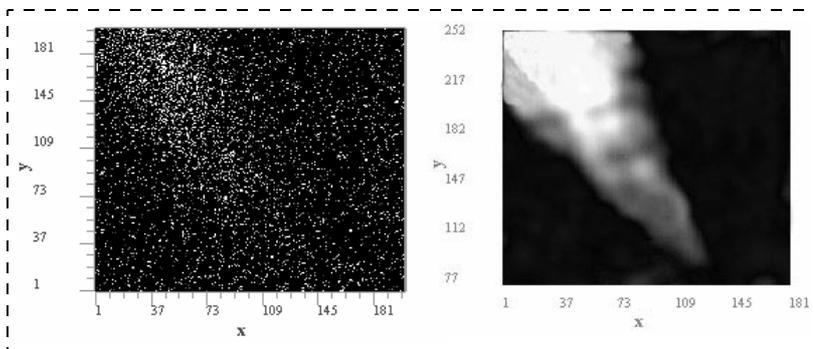


Рис. 4. Слева — измеренное Оже-изображение выделенной кружком области на рис. 3; справа — результат восстановления. Размер пикселя 7,5 нм

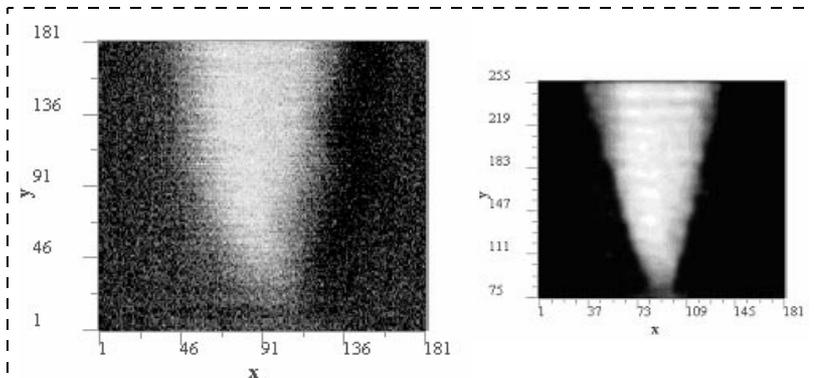


Рис. 5. Слева — измеренное изображение структуры, выделенной кружком области на рис. 3, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа; справа — результат восстановления. Размер пикселя 7,5 нм

ются с исходным распределением. Результаты такого численного моделирования для изображений, использованных в [1—2] для решения аналогичной задачи деконволюции изображений в сканирующей ближнепольной оптической микроскопии, представлены на рис. 1—2.

На рис. 2 можно видеть, что при реализуемой точности измерений разрешение на восстановленном изображении увеличивается по сравнению с тем, которое могло бы быть получено даже при абсолютно точных измерениях (см. на рис. 1 справа), несмотря на тот факт, что для восстановления использовалось сильно зашумленное изображение (рис. 2 слева). Сходимость метода для рассматриваемого примера была показана в численных экспериментах [1—2].

Измерения и обработка изображений тестовой структуры, полученных с помощью сканирующей Оже-микроскопии и сканирующей электронной микроскопии

Этот подход использовался для восстановления изображений, получаемых методами Оже- и электронной микроскопии. Эксперименты были выполнены с использованием системы Multi-Probe STM UHV фирмы Omicron® VacuumPhysik GmbH (Германия). Данные Оже-измерений определялись с помощью полусферического анализатора Omicron® EA-125 с детектором 5 ChanneltronsTM. Изображения получались с использованием линии Ni (LMM E = 848 eV). Измеряемая структура образца (Ni—Cr) показана на рис. 3.

На рис. 4 представлено измеренное Оже-изображение (внутри области измерений, отмеченной кружком на рис. 3), которое определяется наличием никеля. Можно видеть, что изображение является сильно зашумленным и, соответственно, размытым по области наблюдения. На рис. 4 показано восстановленное (на основе решения уравнения (1)) изображение. Очевидно, что резкость изображения существенно улучшается так, что форма и размеры тестового клиновидного образца хорошо соответствуют атомно-силового изображению на рис. 3. Дос-

тигнутая разрешающая способность составляет ~20 нм, что в 2—3 раза лучше, чем при применении простых методов подавления шума.

Результаты аналогичного анализа для измерений той же структуры с использованием сканирующего электронного микроскопа представлены на рис. 5. Легко убедиться, что резкость восстановленного изображения существенно возрастает, а результат восстановления хорошо согласуется с результатом, полученным путем восстановления Оже-изображения.

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что развитый метод восстановления изображений позволяет получить существенно более высокое разрешение на основе компьютерной обработки данных сканирующей Оже-микроскопии, а также сканирующей электронной микроскопии.

Список литературы

1. Gaikovich K. P., Dryakhlushin V. F., Kruglov A. V., and Zhilin A. V. Rectification of SNOM-images taking into account the probe transfer function // *Physics of Low-Dimensional Structures*. 2002. Vol. 5/6. P. 93—98.
2. Гайкович К. П., Дряхлушин В. Ф., Жилин А. В. Улучшение разрешающей способности СБОМ-изображений на основе

учета передаточной функции зонда // *Микросистемная техника*. 2003. № 7. С. 19—21.

3. Гайкович К. П., Дряхлушин В. Ф. Исследование структуры ближнепольного излучения полупроводникового лазера // *Микросистемная техника*. 2004. № 3. С. 39—43.

4. Gaikovich K. P., Gribkov B. A., Mironov V. L., Treskov S. A., and Zhilin A. V. Image retrieval in scanning probe microscopy taking into account the probe-surface interaction nonlocality // *Physics of Low-Dimensional Structures*. 2002. Vol. 5/6. P. 85—92.

5. Gaikovich K. P., Mironov V. L., Zhilin A. V. STM LDOS reconstruction of HOPG surface // *Physics of Low-Dimensional Structures*. 2003. Vol. 3/4. P. 251—256.

6. Гайкович К. П., Миронов В. Л. Восстановление поверхностной плотности электронных состояний пиролитического графита по данным сканирующей туннельной микроскопии // *Микросистемная техника*. 2004. № 2. С. 39—43.

7. Gaikovich K. P., Nozdryn Yu. N., Zhilin A. V. Magnetic field and currents in HTSC films // *Central European Journal of Physics*. 2003. No 3. P. 363—392.

8. Gaikovich K. P., Nozdryn Yu. N., Reznik A. N. and Vaks V. L. Reconstruction of the subsurface dielectric structure by microwave near-field measurements // *Physics of Low-Dimensional Structures*. 2002. Vol. 5/6. P. 99—104.

9. Purcell S. T., Vu Thien Binh, Thevenard P. Atomic-size metal ion sources: principles and use // *Nanotechnology*. 2001. Vol. 12. P. 168—172.

10. Stevie F. A., Downey S. W., Brown S. R., Shofner T. L., Decker M. A., Dingle T. Nano-scale elemental imaging of semiconductor materials using focused ion beam secondary ion mass spectrometry // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 1999. Vol. 17. No 6. P. 2476—2482.

11. Hofmann S. Sputter depth profile analysis of interfaces // *Rep. Prog. Phys.* 1998. Vol. 61. P. 827—888.

12. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983. 200 с.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

УДК 621.372.8.0297

М. В. Рябко, С. А. Никитов, д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН,
Ю. К. Чаморовский, канд. физ.-мат. наук,
Институт радиотехники и электроники РАН, г. Москва
e-mail: nikitov@cplire.ru, MAXIK@mail.ru

МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ВОЛОКНА

Представлены результаты исследований дисперсионных характеристик, линейных и нелинейных свойств, двулучепреломляющих свойств микроструктурных волокон. Рассмотрены методы и результаты моделирования микроструктурных волокон и использование активированных микроструктурных волокон. Обобщены результаты исследования свойств микроструктурных волокон для получения стройной картины современного положения этого раздела волоконной оптики.

Введение

Тематика микроструктурных волокон (рис. 1) является самой актуальной задачей в области волоконной оптики последнего времени. Огромный интерес возникает как следствие уникальных

свойств и возможностей таких волокон: широкий одномодовый диапазон, уникальные дисперсионные характеристики и их сильная зависимость от геометрических параметров волокна, большой нелинейный коэффициент

за счет сильной локализации поля, увеличенное (усиленное) двулучепреломление по сравнению с обычным, поддерживающим поляризацию (PM), волокном. Эти свойства находят широкое при-

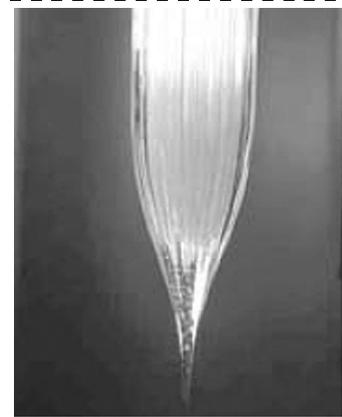


Рис. 1. Вытяжка микроструктурного волокна

менение в телекоммуникациях [1, 2], нелинейной оптике [3], метрологии [4], атомной [5] и медицинской оптике [6, 7].

Волокна, о которых пойдет речь в дальнейшем, имеют много названий, поэтому, чтобы не возникало путаницы, имеет смысл определить используемые понятия. Вследствие того, что описываемые ниже волокна стремились получить из-за наличия запрещенной зоны, которая была теоретически показана для фотонных кристаллов, то правильно называть такие волокна *фотонно-кристаллическими*. Но сначала было получено волокно, волноводный механизм которого обусловлен наличием запрещенной зоны. Поэтому такие волокна стали называть *"микроструктурными"*, так как они были получены из заготовки с определенной структурой путем вытягивания в два этапа. Позже были созданы волокна, структура которых получалась сверлением отверстий в заготовке. В результате образовывались волокна с разнообразной структурой воздушных отверстий и их расположением. К таким волокнам более применим термин *"дырчатое волокно"*. В представленном обзоре, как и в большинстве современных публикаций, не придается значения различию этих терминов. Под обычным волокном подразумевается любое волокно без микроструктурной оболочки, в том числе и волокно с несколькими оболочками. Также для удобства всегда говорится о воздушных отверстиях в оболочке, что, вообще говоря, не обязательно и не имеет принципиального значения.

Несмотря на имеющиеся к настоящему времени результаты постоянно появляется огромное число публикаций, что говорит о новых эффектах и результатах в данной области. Улучшаются параметры микроструктурных волокон — пассивные потери [8, 9], потери на сварке со стандартным

волокном [10—13], увеличение двулучепреломления [14—18].

Создаются новые структуры оболочки таких волокон, позволяющие улучшать нелинейное взаимодействие и получать нужные дисперсионные характеристики [9, 19—21]. Появляются сообщения о создании дырчатых волокон, поддерживающих распространение высших мод [22—25], что актуально для создания активных волокон. Еще одно интересное свойство микроструктурного волокна — независимость потерь от радиуса изгиба [26].

В дырчатом волокне возможны два механизма распространения света — аналог полного внутреннего отражения, как и в обычных волокнах, но с большей разницей показателя преломления сердцевины и оболочки, и эффект наличия запрещенной зоны [27—29]. В случае наличия запрещенной зоны становится возможным управление спонтанным излучением атомов [30], так как свет с определенными частотами не может распространяться в заданном направлении, как и в случае запрещенной зоны в полупроводниках. Для дырчатого волокна это эквивалентно невозможности вытекания энергии в оболочку.

История создания микроструктурных волокон и первые результаты

Интерес к микроструктурному волокну был вызван высказывающимися в 70-х годах прошлого века гипотезами о возможности получения в них запрещенной зоны и следующими из этого практическими приложениями. Такая идея высказывалась на основании уже имеющегося результата в твердом теле, где периодический потенциал атомов создает запрещенные зоны для электронов. Было предположено, что периодическая диэлектрическая структура вызовет такой же эффект для электромагнитных

волн. Гипотеза получила подтверждение в миллиметровом диапазоне волн, когда в 1991 г. Яблоневич со своими коллегами наблюдал запрещенную зону для диэлектрика с показателем преломления $n = 3,6$, в котором были просверлены дырки диаметром около миллиметра, находящимся примерно на таком же расстоянии друг от друга.

Получение того же результата в видимом диапазоне казалось невозможным в силу очевидных технологических трудностей — невозможно просверлить дырки порядка микрометра, находящихся на таком же расстоянии друг от друга! Тогда была использована уже имевшаяся волоконная технология вытяжки из заготовки. В кварцевую трубку диаметром 20 мм укладываются кварцевые капилляры диаметром около 1 мм с направляющим стержнем, расположенным между ними (рис. 2). Из такой заготовки производится вытяжка волокна. Так в 1995 г. было получено 100 м микроструктурного волокна (рис. 3) в фирме Blaze Photonics [31]. В таком волокне не возникает запрещенной зоны, а волноводный механизм назван эффективным полным внутренним отражением. И только в 1998 г. было объявлено о микроструктурном волокне с запрещенной зоной [32]. Это было волокно с полый жилой и дырчатой оболочкой в виде сот (рис. 4).

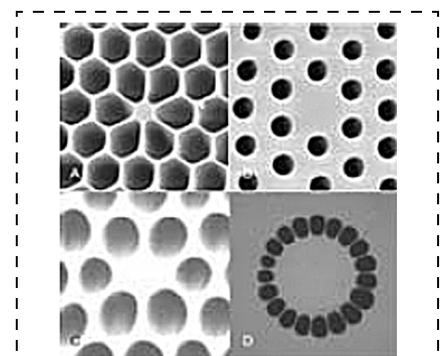


Рис. 2. Различные виды микроструктурного волокна

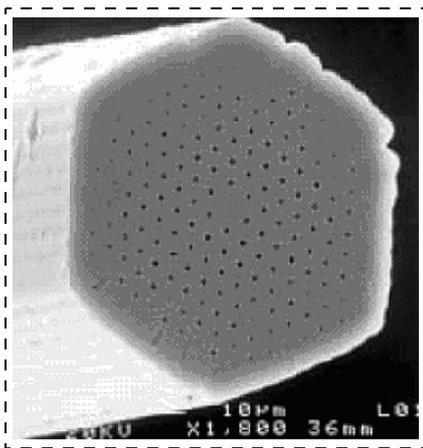


Рис. 3. Первое микроструктурное волокно

Существует второй способ создания таких волокон, реализованный, например, в Институте радиотехники и электроники РАН [33]. Изначально в заготовке сверлятся отверстия, а потом осуществляется вытяжка. Такой способ более дорогой и трудоемкий, но он позволяет создавать волокна с произвольным распределением по сечению показателя преломления — различный диаметр отверстий и несимметричное расположение отверстий, что открывает возможность получать дырчатые волокна с увеличенным двулучепреломлением и высокой нелинейностью. Двулучепреломление можно получить несимметричным расположением воздушных отверстий, эллиптическими отверстиями либо двумя способами одновременно. Увеличение нелинейного коэффициента становится возможным за счет уве-

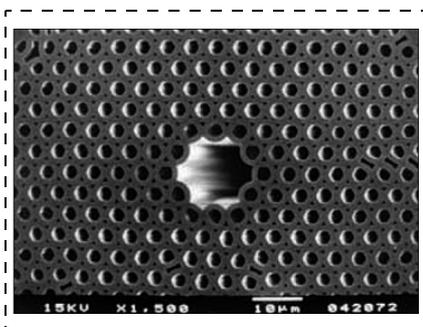


Рис. 4. Микроструктурное волокно с запрещенной зоной

личения соотношения воздух—кварц в оболочке, а следовательно, уменьшения эффективного показателя преломления оболочки и, как следствие, локализации поля.

Первые эксперименты с такими волокнами оправдали надежды и потраченное время на разработку технологии их производства. Оказалось, что одномодовый диапазон дырчатого волокна очень широкий [34]. Это можно объяснить с помощью приближенной модели эффективного показателя преломления. Представим дырчатое волокно как обычное с таким же показателем преломления сердцевины, но с показателем преломления оболочки, равным некоторому эффективному показателю преломления [35]. В случае большого соотношения воздух—кварц, эффективный показатель преломления можно представить как средневзвешенный показатель преломления стекла и воздуха. При уменьшении длины волны λ эффективный показатель преломления оболочки возрастает, так как мода все более локализуется в однородной сердцевине и все меньше чувствует воздушные неоднородности [36—38], уменьшая разницу показателей преломления Δ . Следовательно, нормированная частота

$$V_{eff} = \frac{2\pi a}{\lambda} (n_{core}^2 - n_{eff}^2), \quad (1)$$

где n_{core} — показатель преломления сердечника; n_{eff} — эффективный показатель преломления окружающей среды, может оставаться в одномодовом диапазоне $V < 2,405$ [35]. В работе [39] ставится вопрос о том, что считать радиусом жилы, так как в микроструктурном волокне тяжело обозначить четкую границу жилы и сердцевины волокна, и за отсечку основной моды, если под a в (1) понимать геометрический размер, берется $V = \pi$ (рис. 5). Параметром на рисунке является диаметр сердцевины. В общем

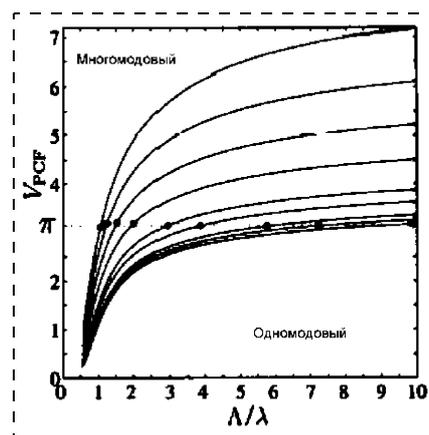


Рис. 5. Зависимость нормированной частоты от геометрии микроструктурного волокна

случае нормированная частота вычисляется по формуле [35]

$$V_{eff} = \left(\frac{2\pi\Lambda}{\lambda}\right)^2 \left\{ f(n_1^2 - 1) + \frac{|\nabla\Psi|^2 dx dy}{k|\Psi|^2 dx dy} \right\}, \quad (2)$$

где f — коэффициент заполнения оболочки воздушными отверстиями; n_1 — показатель преломления стекла, из которого изготовлено волокно; Ψ — профиль амплитуды поля; Λ — период воздушных заполнений в оболочке; ∇ — поперечная составляющая лапласиана; x и y — декартовы координаты в поперечной плоскости волокна.

Другое объяснение существования одномодового режима в широком спектральном диапазоне заключается в следующем. В одномодовом режиме форма единственной поперечной моды становится независимой от длины волны и, наклонно падая на границу стекло—воздух, отражается обратно от воздушных каналов. У высших мод эффективная поперечная длина волны достаточно мала, чтобы чувствовать промежутки между воздушными отверстиями, поэтому свет выходит в оболочку [40].

Также были измерены потери микроструктурного волокна (рис. 6). Максимум поглощения

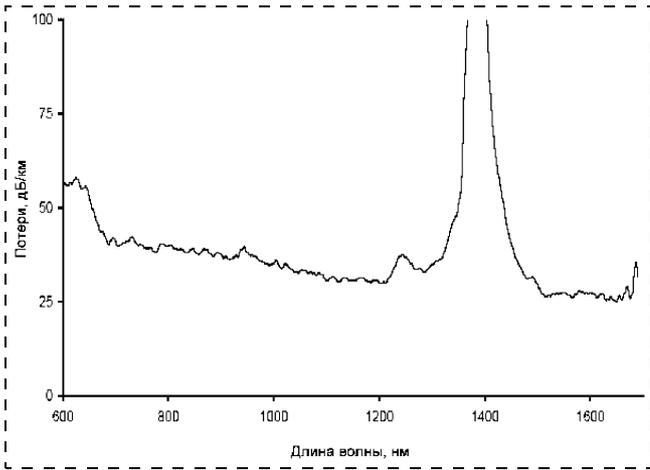


Рис. 6. Спектральная зависимость потерь в микроструктурном волокне

обусловлен наличием связей ОН, а сравнительно высокие потери во всем спектральном диапазоне — технологией изготовления. В отличие от обычного волокна, когда материал сердцевины получается осаждением чистого кварца, структура дырчатого волокна набирается из кварцевых трубок, где нельзя достичь такой чистоты, как при осаждении. Зависимость угла расхождения излучения на выходе волокна от длины волны исследована в работах [41, 42]. Расходимость излучения имеет более выраженную зависимость от длины волны в сравнении с обычным волокном. Изучению модовой структуры излучения в дырчатом волокне посвящены работы [42, 43]. Малый диаметр моды обусловил перспективность использования таких волокон в нелинейной оптике [3].

Дисперсионные характеристики

Уникальным свойством микроструктурных волокон является сильная зависимость дисперсионных свойств от геометрических параметров волокна (рис. 7), что находит широкое практическое применение. В дырчатом волокне достигаются абсолютные значения хроматической дисперсии, превосходящие те, что возможны в обычном одномодовом волокне с сохранением волноводных свойств [19, 44, 45]. Волокно, используемое для ком-

пенсации дисперсии в современных линиях связи, имеет дисперсию около -90 пс/(нм·км) и потери порядка 1 дБ/км. Имеющееся в настоящее время микроструктурное волокно превосходит его по обоим параметрам и в будущем сможет его заменить [8, 44].

Другим важным параметром в волоконно-оптических линиях связи является наклон дисперсионной кривой, который приводит к различному уширению импульсов для различных длин волн. Это критично в многоканальных линиях связи. Дырчатое волокно эффективно позволяет как компенсировать наклон дисперсионной кривой путем подбора соответствующих геометрических параметров, так и обеспечить значение хроматической дисперсии

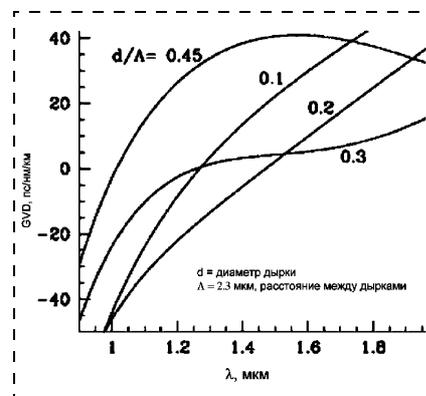


Рис. 7. Зависимость дисперсии микроструктурного волокна от геометрических параметров

в широком диапазоне длин волн в пределах 1 пс/(нм·км) (рис. 8) [46—48].

Хотя микроструктурное волокно и может быть успешно использовано для передачи информации, этого не произойдет по экономическим соображениям, так как неэффективно прокладывать новые линии связи, даже если это даст выигрыш в несколько раз. Но основные применения оно имеет для распространения солитонов, формирования коротких импульсов, генерации суперконтинуума. В микроструктурных волноводах удается перестраивать нуль хроматической дисперсии в широком диапазоне [49—52], что дает возможность перенести имеющиеся практические достижения в области нелинейной оптики в другой спектральный диапазон, в том числе и видимый.

Наряду с хроматической дисперсией в волокнах наблюдается поляризационная модовая дисперсия (ПМД). Она возникает за счет разной скорости распространения электромагнитных волн разной поляризации [53]. Например, в волокне для поддержания состояния поляризации наводится двулучепреломление — разное значение коэффициентов преломления для разных состояний поляризации, поэтому свет с разными состояниями поляризации имеет разные групповые скоро-

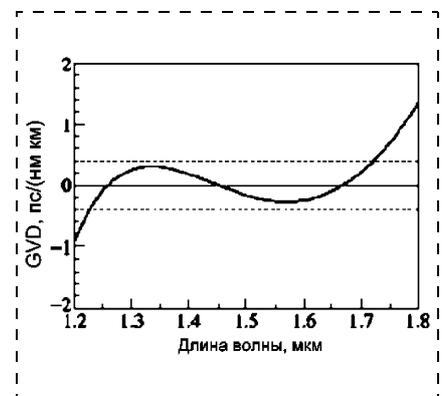


Рис. 8. Нулевое значение дисперсии в широком спектральном диапазоне

сти. Значения двулучепреломления в обычном волокне типа Panda составляет $5 \cdot 10^{-4}$, что на порядок меньше значений, полученных в микроструктурном волокне [18, 54–56]. Как оказалось, поляризационные свойства фотонно-кристаллического волокна можно использовать, например, в нелинейной оптике для улучшения спектральных свойств генерации суперконтинуума [57].

Нелинейные свойства микроструктурных волокон

Возможность менять в больших пределах диаметр поля моды дырчатого волокна, а также возможность перестройки нуля дисперсии в значительном спектральном диапазоне вместе с большим спектральным одномодовым диапазоном определили широкое применение микроструктурных волокон в нелинейной оптике. Удивительно, но фотонно-кристаллические волокна позволяют как существенно увеличить нелинейный коэффициент γ путем уменьшения диаметра сердцевины и, следовательно, увеличения интенсивности световой волны [58], так и уменьшить его путем увеличения диаметра поля моды или использованием дырчатых волокон с полой сердцевиной [59, 60]. Как и в обычном волокне, в микроструктурном волокне можно увеличить нелинейность путем добавления примесей. В работе [61] продемонстрировано волокно, легированное свинцом с нелинейным коэффициентом $640 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$. Поэтому для получения тех же результатов, что и в обычном волокне, становится возможным использовать низкие пиковые мощности и короткие длины микроструктурного волокна.

Самым ярким нелинейным эффектом является генерация суперконтинуума [3, 62–72]. Этот эффект наблюдается, когда в нелинейную среду запускается короткий импульс и за счет взаим-

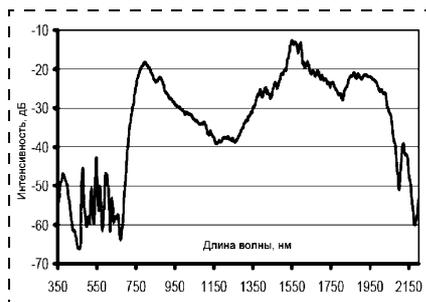


Рис. 9. Спектральная зависимость мощности суперконтинуума

ного влияния различных нелинейных эффектов на выходе получается яркий свет в широком спектральном диапазоне (рис. 9). В области аномальной дисперсии распад солитонов происходит за счет многократного рамановского рассеяния, а в области нормальной — фазовая самомодуляция ответственна за образование суперконтинуума. Рамановские процессы и четырехволновое смешение ответственны за дальнейшее уширение спектра суперконтинуума [73]. В работе [73] последовательно рассмотрено влияние каждого нелинейного эффекта и их комбинации на генерацию суперконтинуума. Спектр континуума очень чувствителен к параметрам входного импульса, в том числе к шумам, так как они усиливаются вследствие модуляционной неустойчивости [74]. В работе [65] экспериментально и теоретически продемонстрировано, что в случае двух близко расположенных нулей дисперсии получается стабильная генерация суперконтинуума, слабо зависящая от параметров импульса.

Исследуется зависимость свойств суперконтинуума от различных параметров волокна — двулучепреломление, положение нуля хроматической дисперсии, профиль дисперсионной кривой. В работе [57] была исследована зависимость спектральных свойств суперконтинуума в двулучепреломляющем волокне от состояния входной поляризации. Зависимость обусловлена различием

дисперсионных кривых для вертикального и горизонтального состояний поляризации. Зависимость свойств суперконтинуума от длины волны накачки исследуется в работе [75] (накачка находится в области нормальной дисперсии). Интересна работа по генерации континуума в волокне с двумя нулями дисперсии [65]. В этом случае видимый диапазон также находится в области аномальной дисперсии, где импульс уширяется сильнее.

Значительное внимание к этому эффекту вызвано сравнительной простотой и красотой его получения, а также его широким применением в метрологии [76], спектроскопии [77] и томографии [77]. В настоящее время с помощью суперконтинуума можно перекрыть спектральный диапазон от 350 до 2200 нм [67, 78–79].

Другим интересным применением дырчатых волокон является возможность перестройки излучения в новом спектральном диапазоне. Перестройка по длине волны основана на явлении четырехволнового смешения. Ширина усиления, т.е. диапазон, где могут появиться новые длины волн, зависит от фазового синхронизма [80]. И если сделать волокно с маленьким значением дисперсии, то получим широкий спектр усиления. Дырчатые волокна позволяют создавать маленький наклон дисперсионной кривой вблизи нуля дисперсии, который можно перестраивать в широком диапазоне, и, следовательно, создавать перестраиваемые источники в новом спектральном диапазоне [81, 82].

С появлением микроструктурных волокон стало возможным получать солитоны в видимом диапазоне. Этот режим возможен в области аномальной дисперсии, которая в обычном одномодовом волокне находится в области больше 1,3 мкм. В работе [83] фотонный кристалл использовался в качестве компенсации дисперсии в солитонном лазере.

Активные волокна с фотонно-кристаллической оболочкой

Спустя некоторое время после получения дырчатых волокон стали появляться публикации на тему активных микроструктурных волокон. В работе [84] рассматривается волокно с легированной сердцевиной и двумя оболочками. Внутренняя фотонно-кристаллическая оболочка обеспечивает волноводный режим для сигнала. Отверстия внешней оболочки находятся ближе друг к другу, чтобы обеспечить волноводный режим для накачки (рис. 10). Такой тип волокна перспективен в отношении использования доступных и более мощных полупроводниковых многомодовых лазеров в качестве накачки. В случае такой двухоболочечной структуры важным понятием является апертура. В работе [85] опубликовано полученное значение апертуры 0,8 на длине волокна 1 м и 0,75 на длине свыше 20 м для длины волны 1 мкм. Зависимость апертуры от длины волокна обусловлена потерями высших мод, которые и обеспечивают высокое значение апертуры.

Перспективность использования активных микроструктурных волокон связана с уникальными свойствами дырчатых волокон. В высокомошных приложениях эффективны волокна с полый сердцевиной для исключения нелинейных эффектов и сохранения качества пучка [59, 60, 86, 87]. При

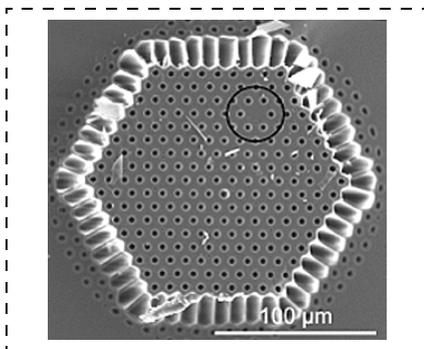


Рис. 10. Двухоболочечная структура дырчатого волокна

использовании обычных волокон для этих целей приходится использовать маломодовое волокно, что снижает интенсивность излучения, но ухудшает параметр качества пучка. Возможность получения одномодового режима с большим радиусом моды позволяет усиливать короткие импульсы без существенного уширения за счет фазовой самомодуляции, что невозможно в обычных волокнах [60]. При усилении слабых сигналов важным параметром является эффективность усиления. Для его увеличения необходимы как можно большие интенсивности накачки при фиксированной мощности накачки и маленький размер моды, т.е. высокое значение NA [85, 88]. Большое число слоев воздушных отверстий делает возможным помещать сердцевину в любое место внутренней оболочки для оптимизации поглощения накачки [85].

При добавлении активных ионов и необходимых примесей для избежания образования кластеров возникает проблема избыточного увеличения показателя преломления и формирования волновода, свойства которого определяются разностью показателей преломления активированной и неактивированной областей, а не микроструктурной оболочкой. В этом случае добавляются примеси фтора для уменьшения показателя преломления [60]. Другой способ исключить этот нежелательный эффект был предложен в работе [85], где активированная область сформирована в виде нитей с поперечным размером менее 250 нм, что слишком мало для формирования волновода (рис. 11).

В работе [89] продемонстрирован поляризованный лазер на основе активного микроструктурного волокна. Двухлучепреломление наводилось путем увеличения диаметра двух воздушных отверстий. В результате было получено излучение на длине волны 1100 нм со значением экстинкции 23 дБ.

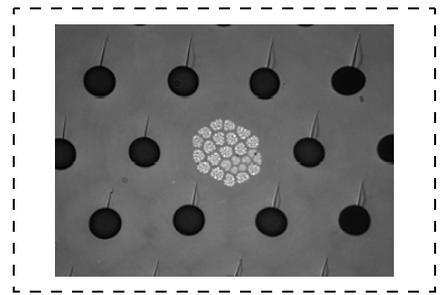


Рис. 11. Микроструктурное волокно, легированное тонкими нитями

В отличие от ранних работ по генерации импульсов с комбинированным использованием пассивного микроструктурного волокна для компенсации дисперсии и обычного активированного волокна [90, 91], в работе [92] продемонстрирован импульсный Nd-лазер с использованием только активированного дырчатого волокна и полупроводникового зеркала для пассивной синхронизацией мод. В работе [93] представлен Eг-лазер, с брэгговскими решетками в качестве обратной связи, записанными в самом микроструктурном волокне.

Методы моделирования оптических свойств дырчатых волокон

Среди волоконных световодов только волокно со ступенчатым распределением показателя преломления можно рассчитать аналитически. Также возможно аналитическое решение для волокна в случае неограниченного параболического распределения показателя преломления. Микроструктурное волокно отличается от обычного волокна отсутствием радиальной симметрии и наличием дополнительных степеней свободы, что позволяет широко менять свойства волокна, но при этом приходится решать дифференциальное уравнение второго порядка. К тому же процесс изготовления такого волокна сложен и расчет приблизительных свойств волокна до его изготовления крайне желателен. К на-

стоящему моменту в литературе появилось много различных способов численного моделирования, сочетающих в себе в различной степени простоту и точность получаемых результатов. Ниже приводятся краткие характеристики самых распространенных из них.

Наиболее простым способом описания свойств микроструктурного волокна является *метод эффективного индекса показателя преломления* (EIM) [35, 94], когда сложный диэлектрический профиль оболочки заменяется эффективным показателем преломления либо несколькими слоями с эффективным показателем преломления. После такой замены к волокну можно применить обычную скалярную теорию, описанную в классических книгах по волоконной оптике [95, 96]. Этим способом можно качественно определить поведение таких характеристик волокна, как потери или дисперсия в зависимости от геометрии. Но такая модель принципиально не может дать распределение поля моды и рассчитать двулучепреломление.

Метод плоских волн (PWM) [97, 98] решает уравнения Максвелла с помощью разложения магнитного и электрического полей, а также профиля показателя преломления по плоским волнам. Это достаточно простой метод для записи его алгоритма на компьютере и дает ответ на вопросы о распределении поля моды. Этим методом, в отличие от EIM, можно рассчитать структуры с запрещенной зоной и все параметры запрещенных зон. Но сравнительная простота метода влечет большие трудности при расчетах, так как требуется большое число членов при разложении в ряд Фурье, что увеличивает размерность матриц, возникающих при решении уравнения, а следовательно, требуются большие вычислительные ресурсы.

Некоторой модификаций этого метода является *метод ячеек*

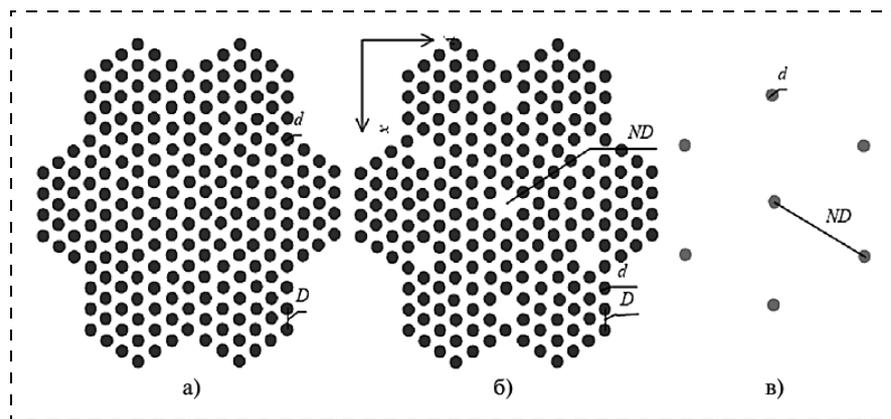


Рис. 12. Иллюстрация к методу ячеек

решетки (SLM) [99]. В этом методе структура показателя преломления описывается суммой двух решеток. Первая (рис. 12, а) — двумерная периодическая структура с показателем преломления сердцевин, равным показателю преломления периодической структуры оболочки, т. е. двумерный фотонный кристалл без дефектов. Вторая (рис. 12, б) — тоже двумерный фотонный кристалл, но с периодом, большим периода структуры оболочки, и равным показателем преломления. Тогда, вычитая из первой решетки вторую, получим периодическую структуру (рис. 12, в).

Некоторым улучшением PWM модели является *метод локализованных функций* (LFM) [100, 101], когда решение уравнений Максвелла сводится к решению системы путем представления полей и показателя преломления суммой локализованных функций, например, полиномов Гаусса—Эрмита. Этот метод физичен с точки зрения того, что поля моды описываются локализованными функциями, и логично их представлять суммой локализованных функций. Эффективна комбинация двух методов PWM и LFM, когда показатель преломления представляется разностью структуры фотонного кристалла, разложенного в двумерный ряд Фурье, и дефекта, разложенного по локализованным функциям. Недостаток LFM заключается в том,

что иногда заранее не представляется возможным определить параметр локализации, необходимый при разложении полей. Другим недостатком методов с использованием разложения в ряд Фурье является невозможность оценки потери. В таких структурах потери зависят от числа слоев воздушных отверстий вокруг сердцевин — чем больше слоев, тем меньше потери. Следовательно, при использовании бесконечного числа слоев, что эквивалентно граничному условию, затухающему на бесконечности, оценка реальных потерь становится невозможной.

Для вышеприведенных методов, за исключением метода эффективного индекса показателя преломления, можно использовать скалярное либо векторное приближение. Приближение заключается в том что, записывая поле в виде

$$E_j(x, y, z) = (e_j^t(x, y) + e_j^z(x, y)\hat{z}) \exp(i\beta_j z), \quad (3)$$

где β_j — константа распространения j -й моды; $e_j^t(x, y) = e_x \hat{x} + e_y \hat{y}$ и $e_j^z(x, y)$ — поперечная и продольные составляющие поля; \hat{x} , \hat{y} и \hat{z} — единичные векторы соответствующего направления. Если подставить (3) в векторное волновое уравнение, получим

систему уравнений для $e_x(x, y)$ и $e_y(x, y)$:

$$\left[\frac{\nabla^2}{k^2} - \frac{\beta^2}{k^2} + n^2 \right] e_x = -\frac{1}{k^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(e_x \frac{\partial \ln n^2}{\partial x} + e_y \frac{\partial \ln n^2}{\partial y} \right); \quad (4)$$

$$\left[\frac{\nabla^2}{k^2} - \frac{\beta^2}{k^2} + n^2 \right] e_y = -\frac{1}{k^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(e_x \frac{\partial \ln n^2}{\partial x} + e_y \frac{\partial \ln n^2}{\partial y} \right), \quad (5)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновой вектор;

$n = n(x, y)$ — показатель преломления в плоскости, перпендикулярной оси волокна; индекс моды j опущен для краткости.

Векторный расчет состоит в решении системы (4)–(5), а при скалярном приближении решается та же система, но с нулевыми правыми частями, т.е. обычное уравнение Гельмгольца, так как при этом оба уравнения системы совпадают. В методе конечных элементов (FEM) волокно разбивается в общем случае на элементы с произвольной границей [19, 102, 103]. На этом элементе выбираются краевые и центральные точки, в которых обозначаются поля, по которым раскладывается искомое поле. Метод позволяет рассчитывать произвольные дырчатые волокна, т.е. волокна с произвольной формой воздушных отверстий. Достоинством метода является возможность выбора естественной границы элементов — границы воздушных дырок.

Еще одним методом расчета свойств микроструктурного волокна является *метод конечных*

разностей, который имеет две модификации: метод конечных разностей в частотной (FDFD) [104] или временной (FDTD) [105] областях. В обоих случаях строится сетка, по узлам которой записываются уравнения Максвелла. Различие состоит в том, записываются компоненты поля во временном или частотном (Фурье образ) пространстве. Таким методом выполняется непосредственное решение уравнений Максвелла в общем виде, что отличает его от остальных приближенных методов, поэтому его можно применить и к трехмерным фотонным кристаллам. Но, вместе с тем, это требует огромных вычислительных ресурсов. Сложность реализации состоит в выборе сетки для удобного разложения по ней сложного профиля диэлектрической проницаемости. Различные сетки приводятся в работах [106–108].

Одним из самых мощных методов является *мультипольный метод*, который позволяет рассчитывать любые характеристики волокна, в том числе и потери, для любых воздушных включений. В работе [109] рассматривается мультипольный метод применительно к фотонно-кристаллическому волокну с круглым сечением дырок, но возможно и обобщение метода на непериодическую структуру оболочки с произвольной формой воздушных отверстий, так что все отверстия могут быть разными. Расчет состоит в определении при разложении в ряд по компонентам Фурье–Бесселя поля в каждом цилиндре. Далее поле в каждой точке находится в виде суммы полей от каждого цилиндра. Но так как поле от каждого цилиндра записывается в локальных координатах этого цилиндра, то получается сумма выражений, записанных в разных координатах. Поэтому делается переход от одних координат к другим, чтобы все выражение было записано в одном представлении — главных

цилиндрических координатах волокна.

Другим способом учета некруглой формы отверстий является метод возмущений. В этом методе каким-либо из вышеперечисленных способов находится необходимый результат, а потом добавляется возмущение показателя преломления. Запись возмущений специфична для каждого метода. Все методы сводятся к матричному уравнению, характерному только для этого метода, а методом возмущений находится добавка к этой матрице. В работе [110] рассматривается метод возмущений применительно к мультипольному методу.

В отличие от большинства предыдущих методов, использующих метод мод для решения уравнений Максвелла, *метод функций Грина* записывает решение в виде свертки правой части уравнения

$$\{\nabla_t^2 + k^2 n^2 - \beta^2\} \Psi = \chi$$

с функцией Грина G

$$\Psi(r) = \int_{\psi'} G(r, r') \chi(r') d\psi'$$

Для вычисления функции Грина получается уравнение

$$\{\nabla_t^2 + k^2 n^2 - \beta^2\} G = \delta(r - r').$$

В приведенных формулах ∇_t^2 — поперечная координата Лапласиана; $n = n(r)$ — профиль показателя преломления; δ — дельта-функция Дирака; r' — фиксированная точка пространства; ψ' — объем, в котором χ отлична от нуля.

Метод функции Грина может быть использован для решения неоднородных скалярных задач, которые возникают при использовании теории возмущения, но неудобен в случае сложной геометрии показателя преломления. В случае одномодовых световодов неразумно использовать разложение по модам, что делается в методе мод. Иными словами, в

различных случаях более удобным может оказаться как один, так и другой метод.

Выводы

Благодаря своим уникальным свойствам микроструктурные волокна могут найти широкое применение как в технических приложениях, так и в фундаментальной науке. Первое удивительное свойство таких волокон — это возможность одномодового режима распространения света в широком спектральном диапазоне. Это может найти применение в передаче информации. Но широкий одномодовый диапазон является важным в сочетании с другими свойствами. Например, возможность сильной локализации поля открывает широкие применения дырчатых волокон в нелинейной оптике. Становится возможным получение солитонов в видимой области, генерация суперконтинуума, создание перестраиваемых источников в видимом диапазоне. Благодаря такой структуре оболочки в дырчатом волокне появляются дополнительные степени свободы, позволяющие в широком диапазоне менять дисперсионные характеристики, что важно в нелинейной оптике, а также позволяет использовать их в телекоммуникационных приложениях для компенсации дисперсии и восстановления формы импульса. Так как распространение света в волокне чувствительно к параметрам дырок, то открываются широкие возможности по созданию различных датчиков. Одномодовые микроструктурные волокна с большим размером воздушной жилы позволяют решить проблемы с передачей больших мощностей и с сохранением качества пучка. Многомодовые фотонно-кристаллические волокна эффективны при создании лазеров и усилителей, так как становятся возможным использование многомодового излучения в ка-

честве накачки. В микроструктурных волокнах удается получить значения двулучепреломления, на порядок превосходящие те, что получаются в обычном волокне, поддерживающем состояние поляризации. Дырчатые волокна с запрещенной зоной находят применение в атомной и квантовой оптике.

Список литературы

1. **Petropoulos P., Monro T. M., Belardi W.** et al. 2 R —regenerative all-optical switch based on a highly nonlinear holey fiber // *Optics Letters*. 2001. Vol. 26. Issue 16. P. 1233—1235.
2. **Yusoff Z., Lee J. H., Belardi W.** et al. Raman effects in a highly nonlinear holey fiber: Amplification and modulation // *Optics Letters*. 2002. Vol. 27. Issue 6. P. 424—426.
3. **Russell P. S. J.** Photonic Crystal Fibers // *Science*. 2003. Vol. 299. P. 358—362.
4. **Nasilowski T., Lesiak P., Kotynski R.** et al. Birefringent photonic crystal fiber as a multi parameter sensor // *Proceedings Symposium IEEE / LEOS Benelux Chapter*. 2003. P. 29—32.
5. **Tarasishin A. V., Magnitskii S. A., Shuvaev V. A., Zheltikov A. M.** Constructing a light-field distribution for the laser guiding of atoms in photonic crystals // *Optics Communications*. 2000. Vol. 184. Issue 5—6. P. 391.
6. **Ivanov A. A., Alifimov M. V., Fedotov A. B.** et al. An All-Solid-State Sub-40-fs Self-Starting Cr⁴⁺ Forsterite Laser With Holey-Fiber Beam Delivery and Chirp Control for Coherence-Domain and Nonlinear-Optical Biomedical Applications // *Laser Physics*. 2001. Vol. 11. Number 1. P. 158—164.
7. **Sun Ju, Shilagard T., Bell B.** et al. In vivo multimodal nonlinear optical imaging of mucosal tissue // *Optics Express*. 2004. Vol. 12. Issue 11. P. 2478—2486.
8. **Ferrarini D., Vincetti L., Zoboli M.** Leakage properties of photonic crystal fibers // *Optics Express*. 2002. Vol. 10. Issue 23. P. 1314—1319.
9. **Hasegawa T., Sasaoka E., Onishi M.** et al. Hole-assisted lightguide fiber for large anomalous dispersion and low optical loss // *Optics Express*. 2001. Vol. 9. Issue 13. P. 681—687.
10. **Chong J. H. and Rao M. K.** Development of a system for laser splicing photonic crystal fiber // *Optics Express*. 2003. Vol. 11. Issue 12. P. 1365—1370.
11. **Bourliaguet B., Paré C., Émond F.** Microstructured fiber splicing // *Optics Express*. 2003. Vol. 11. Issue 25. P. 3412—3417.
12. **de Matos C. J. S., Popov S. V., Rulkov A. B.** et al. All-Fiber Format Compression of Frequency Chirped Pulses in Air-Guiding Photonic Crystal Fibers // *Physical Review Letters*. 2004. Vol. 93. Number 10. P. 1—4.
13. **Ohsono K., Nishio T., Bing Y.** et al. High Performance Optical Fibers for Next Generation Transmission Systems // *Hitachi Cable Review*. 2003. N. 22, P. 1—5.
14. **Wang X. and Wang L. V.** Propagation of polarized light in birefringent turbid media:

time-resolved simulations fibers // *Optics Express*. 2001. Vol. 9. Issue 5. P. 254—259.

15. **Fuochi M., Hayes J. R., Furusawa K.** et al. Polarization mode dispersion reduction in spun large mode area silica holey fibres // *Optics Express*. 2004. Vol. 12. Issue 9. P. 1972—1977.
16. **Li B., Chen M.** Highly birefringent plastic holey fibers // *Optical Fibers and Passive Components*. 2004. Proceedings of SPIE. Vol. 5279. P. 632—635.
17. **Chen X., Li M., Venkataraman N.** et al. Highly birefringent hollow-core photonic bandgap fiber // *Optics Express*. 2004. Vol. 12. Issue. 16. P. 3888—3893.
18. **Ortigosa-Blanch A., Knight J. C., Wadsworth W. J.** et al. Highly birefringent photonic crystal fibres // *Optics Letters*. 2000. Vol. 25. Issue 18. P. 1325—1327.
19. **Fujisawa T., Koshiha M.** Finite element characterization of chromatic dispersion in nonlinear holey fibers // *Optics Express*. 2003. Vol. 11. Issue. 13. P. 1481—1489.
20. **Hansen K. P., Jensen J. R., Jacobsen C.** et al. Highly Nonlinear Photonic Crystal Fiber with Zero-Dispersion at 1.55 μm // *Conference on Optical Fiber Communication — Post Deadline* (Anaheim, California, USA. 2002).
21. **Hu E. S., Hsueh Y.-L., Marhic M. E. and Kazovsky L. G.** Design of Highly-Nonlinear Tellurite Fibers with Zero Dispersion Near 1550 nm // *European Conference on Optical Communications (ECOC 2002)*. Copenhagen, Denmark. P. 3.2.3, September, 2002.
22. **Mohammed W. S., Vaissie L., Johnson E. G.** Hybrid mode calculations for novel photonic crystal fibers // *Optical Engineering*. 2003. Vol. 42. N 8. P. 2311—2317.
23. **Issa N. A. and Padden W. E.** Light acceptance properties of multimode microstructured optical fibers: Impact of multiple layers // *Optics Express*. 2004. Vol. 12. Issue. 14. P. 3224—3235.
24. **Issa N. A.** High numerical aperture in multimode microstructured optical fibers // *Applied Optics*. 2004. Vol. 43. November 33. P. 6191—6197.
25. **Mortensen N. A., Stach M., Broeng J.** et al. Multi-mode photonic crystal fibers for VCSEL based data transmission // *Optics Express*. 2003. Vol. 11. Issue. 17. P. 1953—1959.
26. **Nishioka D., Hasegawa T., Saito T.** et al. Development of Holey Fiber Supporting Extra Small Diameter Bending // *SEI Technical Review*. 2004. Number 58. P. 42—47.
27. **Cregan R. F., Mangan B. J., Knight J. C.** et al. Single-Mode Photonic Band Gap Guidance of Light in Air // *Science*. 1999. Vol. 285. P. 1537—1539.
28. **Lægsgaard J., Mortensen N. A., Riisshede J. and Bjarklev A.** Material effects in air-guiding photonic bandgap fibers // *Journal of Optic Society of America B*. 2003. Vol. 20. Number 10. P. 2046—2051.
29. **Zheltikov A. M., Alifimov M. V., Fedotov A. B.** et al. Controlled Light Localization and Nonlinear-Optical Interactions of Ultrashort Laser Pulses in Microand Nanostructured Fibers with a Tunable Photonic Band Gap // *Journal of experimental and theoretical physics*. 2001. Vol. 93. N 3. P. 409—509.
30. **Soljacic M., Lidorikis E., Ibanescu M.** et al. Optical bistability and cutoff solitons in photonic bandgap fibers // *Optics Express*. 2004. Vol. 12. Number. 8. P. 1518—1527.
31. **Knight J. C., Birks T. A., Russell P. St. J. and Atkin D. M.** All-silica sin-

- gle-mode fibre with photonic crystal cladding // *Optics Letters*. 1997. Vol. 22. Issue. 7. P. 484–485.
32. **Knight J. C., Broeng J., Birks T. A. and Russell P. St. J.** Photonic band gap guidance in optical fibers // *Science*. 1998. Vol. 282. P. 1476–1478.
33. **Nikitov S. A., Korshunova E. N., Chamorovskii Yu. K., Shatrov A. D.** Microstructured Optical fibers: basic characteristics and prospects // *The Physics and Technology Applications of Wave Processes*. Volgograd, September. 2004. P. 8–18.
34. **Birks T. A.** et al. Endlessly single-mode photonic crystal fibre // *Optics Letters*. 1997. Vol. 22. Issue. 13. P. 961–963.
35. **Baggett J. C., Monro T. M., Furu-sawa K. and Richardson D. J.** Comparative Study of large-mode holey and conventional fibers // *Optics Letters*. 2001. Vol. 26. Number 26. P. 1045–1050.
36. **Russell P. St. J., Birks T. A., Knight J. C.** et al. Silica/air photonic crystal fibres // *Journal of Applied Physics*. 1998. Vol. 37. Suppl. 37–1. P. 45–48.
37. **Knight J. C., Birks T. A., Cre-gan R. F.** et al. Photonic crystals as optical fibres — physics and applications // *Optical Materials*. 1999. Vol. 11. Issues 2–3. P. 143–151.
38. **Knight J. C., Birks T. A., Russell P. St. J. and de Sandro J.-P.** Properties of photonic crystal fiber and the effective index model // *Journal of Optic Society of America A*. 1998. Vol. 15. Number 3. P. 748–752.
39. **Mortensen N. A. and Folken-berg J. R.** Modal cutoff and the V parameter in photonic crystal fibers // *Optics Letters*. 2003. Vol. 28. Number 20. P. 1879–81.
40. **Wadsworth W. J., Knight J. C., Birks T. A. and Russell P. S. J.** Recent progress in photonic crystal fibers // *Proceedings of SPIE*. 2003. Vol. 5246. P. 362–365.
41. **Gander M. J., McBride R., Jones J. D. C.** et al. Measurement of the wavelength dependence of beam divergence for photonic crystal fiber // *Optical Letters*. 1999. Vol. 24. Issue. 15. P. 1017–1019.
42. **Koshiba M. and Saitoh K.** Structural dependence of effective area and mode field diameter for holey fibers // *Optics Express*. 2003. Vol. 11. Number 15. P. 1746–1756.
43. **Knight T. J. C., Birks A., Crega R. F.** et al. Photonic crystals as optical fibres — physics and applications // *Optical Materials*. 1999. Vol. 5. Issues 2–3. P. 143–151.
44. **Bouk A. H., Cucinotta A., Poli F., Selleri S.** Dispersion properties of square-lattice photonic crystal fibers // *OPTICS EXPRESS*. 2004. Vol. 12. Number 5. P. 941–946.
45. **Knight J. C.** Photonic crystal fibres // *Nature*. 2003. Vol. 424. P. 847–851.
46. **Hansen K. P.** Dispersion flattened hybrid-core nonlinear photonic crystal fiber // *Optics Express*. 2003. Vol. 11. Number 13. P. 1503–1509.
47. **Saitoh K. Koshiba and M.** Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion // *Optics Express*. 2003. Vol. 11. Number 8. P. 843–852.
48. **Reeves W. H., Knight J. C., Rus-sell P. St. J. and Roberts P. J.** Demonstration of ultra-flattened dispersion in photonic crystal fibers // *Optics Express*. 2002. Vol. 10. Number 14. P. 609–613.
49. **Knight J. C., Birks T., Mangan B. and Russell P. St. J.** New Solutions in Fiber Optics // *Optics & Photonics News*. 2002. P. 26–30.
50. **Mechels S. E., Schlager J. B., Franzen D. L.** Accurate Measurements of the Zero-Dispersion Wavelength in Optical Fibers // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 1997. Vol. 102. Number 3. P. 333–347.
51. **Ferrando A., Zacares M., Binosi D.** et al. Spatial soliton formation in photonic crystal fibers // *Optics Express*. 2003. Vol. 11. Number 5. P. 452–459.
52. **Engeness T. D., Ibanescu M., John-son S. G.** et al. Dispersion tailoring and compensation by modal interactions in OmniGuide fibers // *Optics Express*. 2003. Vol. 11. Number 10. P. 1175–1196.
53. **Poole C. D. and Wagner R. E.** Phenomenological approach to polarization dispersion in long single-mode fibers // *Electro-nic Letters*. 1986. Vol. 22. Number 19. P. 1029–1030.
54. **Barclay P. E., Srinivasan K. and Painter O.** Nonlinear response of silicon photonic crystal micresonators excited via an integrated waveguide and fiber taper // *Optics Express*. 2005. Vol. 13. Number 3. P. 801–820.
55. **Suzuki K., Kubota H., Kawanishi S.** et al. Optical properties of a low-loss polarization-maintaining photonic crystal fiber // *Optics Express*. Vol. 9. Number 13. P. 676–680.
56. **Nasilowski T., Kotynski R., Antkowiak M.** et al. Mode analysis of birefringent doped-core holey fibers // *Proceedings Symposium IEEE / LEOS Benelux Chapter*. 2003. P. 217–220.
57. **Lehtonen M., Genty G., Ludvig-sen H., Kaivola M.** Supercontinuum generation in a highly birefringent microstruc-tured fiber // *Applied Physics Letters*. 2003. Vol. 82. Number 14. P. 2197–2199.
58. **Saitoh K. and Koshiba M.** Highly nonlinear dispersion-flattened photonic crystal fibers for supercontinuum generation in a telecommunication window // *Optics Express*. 2004. Vol. 12. Number 10. P. 2027–2032.
59. **Luan F., Knight J. C., Russell P. St. J.** et al. Femtosecond soliton pulse delivery at 800 nm wavelength in hollow-core photonic bandgap fibers // *Optics Express*. 2004. Vol. 12. Number 5. P. 835–840.
60. **Limpert J., Liem A., Reich M.** et al. Low-nonlinearity single-transverse-mode yt-terbium-doped photonic crystal fiber amplifier // *Optics Express*. 2004. Vol. 12. N. 7. P. 1313–1319.
61. **Petropoulos P., Ebendorff-Heide-priem H., Finazzi V.** et al. Highly nonlinear and anomalously dispersive lead silicate glass holey fibers // *Optics Express*. 2003. Vol. 11. Number 26. P. 3568–3573.
62. **Yamamoto T., Kubota H., Kawa-nishi S.** et al. Supercontinuum generation at 1,55 μm in a dispersion-flattened polarization-maintaining photonic crystal fiber // *Optics Express*. 2003. Vol. 11. Number 13. P. 1537–1540.
63. **Champert P.-A., Couderc V., Lep-roux P.** et al. White-light supercontinuum generation in normally dispersive optical fiber using original multi-wavelength pumping system // *Optics Express*. 2004. Vol. 12. Number 19. P. 4366–4371.
64. **Hilligsoe K. M., Andersen T. V., Paulsen H. N.** et al. Supercontinuum generation in a photonic crystal fiber with two zero dispersion wavelengths // *Optics Express*. 2004. Vol. 12. Number 6. P. 1045–1054.
65. **Haverkamp N. and Telle H. R.** Complex intensity modulation transfer func-tion for supercontinuum generation in micro-structure fibers // *Optics Express*. 2004. Vol. 12. Number 4. P. 582–587.
66. **Proulx A., Ménard J., Hô N.** et al. Intensity and polarization dependences of the supercontinuum generation in birefringent and highly nonlinear microstructured fibers // *Optics Express*. 2003. Vol. 11. Number 25. P. 3338–3345.
67. **Genty G., Lehtonen M., Ludvigsen H.** Effect of cross-phase modulation on super-continuum generated in microstructured fibers with sub-30 fs pulses // *Optics Express*. 2004. Vol. 12. Number 19. P. 4614–4624.
68. **Zhu Z. and Brown T. G.** Experiment-al studies of polarization properties of super-continua generated in a birefringent photonic crystal fiber // *Optics Express*. 2004. Vol. 12. Number 5. P. 791–796.
69. **Zhu Z. and Brown T. G.** Effect of fre-quency chirping on supercontinuum genera-tion in photonic crystal fibers // *Optics Express*. 2004. Vol. 12. Number 4. P. 689–694.
70. **Genty G., Lehtonen M., Ludvig-sen H., Kaivola M.** Enhanced bandwidth of supercontinuum generated in microstruc-tured fibers // *Optics Express*. 2004. Vol. 12. Number 15. P. 3471–3480.
71. **Nicholson J. W., Yablon A. D., Westbrook P. S.** et al. High power, single mode, all-fiber source of femtosecond pulses at 1550 nm and its use in supercontinuum generation // *Optics Express*. 2004. Vol. 12. Number 13. P. 3025–3034.
72. **Gu X., Kimmel M., Shreenath A. P.** et al. Experimental studies of the coherence of microstructure-fiber supercontinuum // *Optics Express*. 2003. Vol. 11. Number 21. P. 2697–2703.
73. **Genty G., Lehtonen M., Ludvigsen H.** et al. Spectral broadening of femtosecond pulses into continuum radiation in micro-structured fibers // *Optics Express*. 2002. Vol. 10. Number 20. P. 1083–1098.
74. **Dudley J. M. and Coen S.** Funda-mental limits to few-cycle pulse generation from compression of supercontinuum spectra generated in photonic crystal fiber // *Optics Express*. 2004. Vol. 12. Number 11. P. 2423–2428.
75. **Hansen K. P., Jensen J. R., Birkedal D.** et al. Pumping wavelength de-pendence of super continuum generation in photonic crystal fibers // *Conference on Op-tical Fiber Communication OFC'02* (Ana-heim, California, 2002).
76. **Udem Th., Holzwarth R., Hänsch T. W.** Optical frequency metrology // *Nature*. 2002. Vol. 416. P. 233–237.
77. **Hartl I., Li X. D., Chudoba C.** et al. Ultrahigh-resolution optical coherence tom-ography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber // *Optical Letters*. 2001. Vol. 26. Issue 9. P. 608–610.
78. **Kumar V. R. K., George A. K., Reeves W. H.** et al. Extruded soft glass pho-tonic crystal fiber for ultrabroad supercontin-uum generation // *Optics Express*. 2002. Vol. 10. Number 25. P. 1520–1525.
79. **Hori T., Takayanagi J., Nishiza-wa N. and Goto. T.** Flatly broadened, wide-band and low noise supercontinuum generation in highly nonlinear hybrid fiber // *OPTICS EXPRESS*. 2004. Vol. 12. Number 2. P. 317–322.
80. **Agraval G. P.** *Nonlinear Fiber Op-tics*. London: Acad. Press., 1989.
81. **Lasri J., Devgan P., Tang R.** et al. A Microstructure-Fiber-Based 10-GHz Syn-chronized Tunable Optical Parametric Oscil-lator in the 1550-nm Regime // *IEEE Pho-*

tonics technology letters. 2003. Vol. 15. Number 8. P. 1058—1060.

82. **Lee J. H., Yusoff Z, Belardi W.** et al. A tunable WDM wavelength converter based on cross-phase modulation effects in normal dispersion holey fiber // Photonics Technology Letters. 2003. Vol. 15. Issue 3. P. 437—439.

83. **Lim H., Ilday F. O., Wise F. W.** Femtosecond ytterbium fiber laser with photonic crystal fiber for dispersion control // Optics Express. 2002. Vol. 10. Number 25. P. 1497—1502

84. **Furusawa K., Malinowski A. N., Price J. H.** et al. Cladding pumped Ytterbium-doped fiber laser with holey inner and outer cladding // Optics Express. 2001. Vol. 9. Number 13. P. 714—717.

85. **Wadsworth W. J., Percival R. M., Bouwmans G.** et al. High power air-clad photonic crystal fibre laser // Optics Express. 2003. Vol. 11. Number 1. P. 48—52.

86. **Konorov S. O., Mitrokhin V. P., Fedotov A. B.** et al. Hollow-core photonic-crystal fibres for laser dentistry // Physics Medical Biology. 2004. Vol. 49. Number 49. P. 1359—1368.

87. **Limpert J., Schreiber T., Liem A.** et al. Thermo-optical properties of air-clad photonic crystal fiber lasers in high power operation // Optics Express. 2003. Vol. 11. Number 22. P. 2982—2986.

88. **Furusawa K., Kogure T., Monro T. M. and Richardson D. J.** High gain efficiency amplifier based on an erbium doped aluminosilicate holey fiber // Optics Express. 2004. Vol. 12. Number 15. P. 3452—3457.

89. **McNeillie F. C., Riis E., Broeng J.** et al. Highly polarized photonic crystal fiber laser // Optics Express. 2004. Vol. 12. Number 17. P. 3981—3988.

90. **Avdokhin A. V., Popov S. V. and Taylor J. R.** Totally fiber integrated, figure-of-eight, femtosecond source at 1065 nm // Optics Express. 2003. Vol. 11. Number 11. P. 265—269.

91. **Lim H., Ilday F. O., Wise F. W.** Control of dispersion in a femtosecond ytterbium laser by use of hollow-core photonic bandgap fiber // Optics Express. 2004. Vol. 12. Number 12. P. 2231—2235.

92. **Moenster M., Glas P., Steinmeyer G.** Mode-locked Nd-doped microstructured fiber laser // Optics Express. 2004. Vol. 12. Number 19. P. 4523—4528.

93. **Canning J., Groothoff N., Buckley E.** et al. All-fibre photonic crystal distributed Braggreflector (PC-DBR) fibre laser // Optics Express. 2003., Vol. 11. Number 17. P. 1995—1999.

94. **Birks T. A., Mogilevtsev D., Knight J. C.** et al. The analogy between photonic crystal fibres and step index fibres // Optical Fiber Communication Conference. (Optical Society of America, Washington, D. C., 1998), FG4. P. 114—116.

95. **Snyder A. W. and Love J. D.** Optical Waveguide Theory. London: Chapman & Hall. 1983.

96. **Unger H. G.** Planar Optical Waveguides and Fibers (Clarendon, Oxford, 1997).

97. **Guo S. and Albin S.** Simple plane wave implementation for photonic crystal calculations // Optics Express. 2003. Vol. 11. Number 11. P. 167—175.

98. **Barkou S. E., Broeng J. and Bjarklev A.** Dispersion properties of photonic bandgap guiding fibers // Optical Fiber Communication Conference (Optical Society of America, Washington, D. C., 1998), FG5. P. 117—119.

99. **Zhi W., Guobin R., Shuqin L. and Shuisheng J.** Supercell lattice method for photonic crystal fibers // Optics Express. 2004. Vol. 11. Number 9. P. 980—987.

100. **Monro T. M., Richardson D. J., Broderick N. G. R., Bennett P. J.** Holey optical fibers: an efficient modal model // Journal of Lightwave Technology. 1999. Vol. 17. Number 17. P. 1093—1102

101. **Monro T. M., Richardson D. J., Broderick N. G. R., Bennett P. J.** Modeling

large air fraction holey optical fibers // Journal of Lightwave Technology. 2000. Vol. 18. Number 18. P. 50—56.

102. **Koshiba M., Saitoh K.** Structural dependence of effective area and mode field diameter for holey fibers // Optics Express. 2003. Vol. 11. Number 15. P. 1746—1756.

103. **Lee J. H., Kim S. and Kim Y. T.** Finite element method for diffusive light propagations in index-mismatched media // Optics Express. 2004. Vol. 12. Number 8. P. 1727—1740.

104. **Yu C-P. and Chang H.-C.** Compact finite-difference frequency-domain method for the analysis of two-dimensional photonic crystals // Optics Express. 2004. Vol. 12. Number 7. P. 1397—1408.

105. **Baba T., Matsumoto T. and Echi-zen M.** Finite difference time domain study of high efficiency photonic crystal superprisms // Optics Express. 2004. Vol. 12. Number 19. P. 4608—4613.

106. **Yang H. Y. D.** Finite difference analysis of 2-D photonic crystals // IEEE transactions on microwave theory and techniques. 1996. Vol. 34. Number 34. P. 2688—2695.

107. **Shen L., He S. and Xiao A.** A finite-difference eigenvalue algorithm for calculating the band structure of a photonic crystal // Computer Physics Communications. 2002. Vol. 143. Number 23. P. 213—221.

108. **Yefet A. and Turkel E.** Fourth order compact implicit method for the Maxwell equations with discontinuous coefficients // Applied Numerical Mathematics. 2000. Vol. 33. Number 33. P. 125—134.

109. **White T. P., Kuhlmeier B. T., McPhedran R. C.** et al. Multipole method for microstructured optical fibers. I. Formulation // Journal of Optical Society of America B. 2002. Vol. 19. Number 10. P. 157—161.

110. **John M. F.** Perturbative numerical modeling of microstructure fibers // Optics Express. 2004. Vol. 12. Number 19. P. 4535—4545.

СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

УДК 621.3

П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф., МИРЭА

СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ: ТЕРМИНОЛОГИЯ И НОВЫЕ КНИГИ

В настоящее время происходят революционные изменения в сфере высоких технологий — электронике, информационных технологиях, микромеханике, — связанных с фундаментальными и прикладными исследованиями, конструированием и практическим использованием структур, материалов и устройств, элементы которых имеют размеры менее 100 нм, а также с развитием технологий их изготовления (нанотехнологии) и методов диагно-

стики. За рубежом работы в этой области стремительно развиваются в течение последних лет в рамках ряда приоритетных программ правительств Японии, США, России, Франции, ФРГ, Китая и других стран.

В последние годы ряд технологий создания электронной компонентной базы (ЭКБ) нового поколения вышли на качественно новый рубеж своего развития, связанный с разработкой материалов и интегральных приборов на их основе с характерными размерами функциональных элементов порядка нескольких нанометров. При таких масштабах, сравнимых с длиной волны электрона и близких к размерам атомов, свойства объектов определяются законами квантовой механики и могут существенно отличаться от свойств макроскопических систем, что требует разработки принци-

пильно новых схемотехнических принципов и технологических методов создания электронных компонентов. Фактически на стыке физики, химии, биологии, материаловедения сформировались новые научно-технические направления — наноэлектроника (НЭ) и нанотехнология (НТ).

Полученные результаты уже находят широкое применение в разнообразных областях науки и техники, например, они реализованы при освоении субмикронных транзисторов для элементов сверхбольших интегральных схем. Актуальность прогнозных исследований и разработки технологий изготовления освоения, освоения субмикронных транзисторов для интегральных схем определяется, прежде всего, тем, что в обозримом будущем прогнозируются создание и использование новейших интеллектуальных систем.

По мнению зарубежных и отечественных специалистов, развитие микроэлектроники будет происходить в направлении дальнейшего уменьшения топологических норм до 30—50 нм к 2010 г. В настоящее время зарубежные фирмы освоили промышленное производство сверхбольших интегральных схем с топологическими размерами элементов 0,09—0,13 мкм для КМОП транзисторов, используемых в персональных компьютерах, а размер элементов 0,18 мкм является основным для производства цифровых интегральных схем.

Переход от микроэлектроники к субмикро- и наноэлектронике привел к необходимости перехода к другим методам проектирования СБИС. Например, за рубежом на пластине диаметром 300 мм размещается 5—7 тыс. кристаллов размером 3×3 мм и с 1—3 млн транзисторов на каждом кристалле при минимальных размерах 0,13 мкм, а при запуске четырех партий по 25 пластин в сутки возможно изготавливать до 0,5 млн СБИС в день (при выходе годных 86—96 %). Следовательно, для удержания рынка сбыта кристаллов целесообразно каждые 1—3 дня выпускать новую микросхему, и для этого требуется развернуть такую систему проектирования СБИС, которая позволяла бы выдавать новые проекты за 1—6 мес. Для решения этой проблемы за рубежом применяется проектирование "систем на кристалле" ("System on chip" — SoC) с использованием ранее созданной интеллектуальной собственности (Intellectual property — IP), которые обеспечивали бы "настраиваемость" проекта на языках высокого уровня и технологическую независимость. В России часто используется термин "сложные функциональные блоки" (СФ-блоки) вместо IP-блоки, а SoC заменяют на СнК. Практически производитель СБИС превращается из изготовителя универсальных схем в "охотника за приложениями" ("application hunter"), что приводит к формированию нового подхода проектирования

для эффективного создания нового поколения средств вычислительной техники (СВТ) и радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

В связи с этим одним из перспективных направлений в микроэлектронике и наноэлектронике является создание систем на больших заказных и полужаказных кристаллах и пластинах для повышения функциональных возможностей РЭА, в том числе СВТ. Основой построения таких систем является использование технологии создания СФ-блоков и проектирования на их основе СБИС с функциональной специализацией под конкретного заказчика (заказчиков).

Разработка широкого набора СФ-блоков (в том числе алгоритмов, программ и документации, сведенных в библиотеки) позволит перейти к созданию РЭА по принципу "комплекс—аппаратура—электронные компоненты". Тем самым обеспечивается возможность разработки с помощью унифицированной номенклатуры СФ-блоков электронных модулей, оптимальных для данного типа аппаратуры. Переход к СФ-блокам позволит также с минимальными финансовыми затратами и в ускоренные сроки решить проблему воспроизводства электронных компонентов, технология изготовления которых была потеряна в 90-х годах.

Следует отметить, что в 2004 г. издательство "Техносфера" выпустило первую книгу на русском языке по данной тематике: "Системы-на-кристалле. Проектирование и развитие" (авторы В. Немудров, Г. Мартин). В книге рассмотрены различные аспекты проектирования SoC и приведен конкретный пример для прикладной области беспроводной связи. Кроме того, в приложении к книге приведен "Список сокращений и определений" для проектирования SoC (см. на с. 45—46 в Приложении). Этот материал может быть полезен для студентов и специалистов.

XXI век обещает быть веком высоких технологий. Одним из наиболее ярких примеров высоких технологий стала интегральная электроника. С одной стороны, в ней используются предельные возможности современной техники, а с другой, она оказывает определяющее влияние на весь научно-технический прогресс.

Всего 50 лет тому назад в электронике безраздельно господствовала электронная лампа, объемы промышленного выпуска электронных ламп составляли около 6 млн шт., т.е. по лампе на душу населения в год. При этом около половины радиоламп выпускались для замены вышедших из строя.

Сегодня в составе интегральных схем (ИС) за год на душу населения выпускается более полу-миллиона транзисторов. Высокая надежность приводит к "накоплению" числа находящихся в эксплуатации ИС. Фактически электронная аппаратура-

ра на ИС морально стареет или выходит из моды раньше, чем из строя. Интегральной электронике недавно исполнилось 40 лет, и все это время она быстро продвигалась по пути роста степени интеграции. Известный американский разработчик, основатель фирмы Intel Гордон Е. Мур сформулировал в 60-е годы закон о том, что "число транзисторов на полупроводниковом кристалле удваивается примерно каждые 24 месяца". И этот закон действует и поныне. Конечно, ничто не бесконечно, но предел можно отодвинуть! В этом заложен принцип развития микроэлектроники, эволюционный переход от микроэлектроники к наноэлектронике и т.д.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Список сокращений и определений

3G	Third Generation Wireless Standards	Стандарты беспроводной связи третьего поколения
ABD	Assertion-Based Design	Проектирование на основе утверждений
A/D	Analogue-Digital or	Аналого-цифровой
AHDL	Analogue Hardware Description Language	Язык описания аналоговых аппаратных средств
AHB	AMBA High-performance Bus	Высокопроизводительная шина AMBA
AMBA	ARM bus architecture	Архитектура шины от компании ARM (не сокращение)
AMS	Analogue/Mixed-Signal	Аналоговый/смешанный сигнал
APB	AMBA Peripheral Bus	Периферийная шина AMBA
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit	Специализированная интегральная схема
ASSP	Application-Specific Standard Part	Специализированная стандартная интегральная схема
ATPG	Automatic Test Pattern Generation	Автоматическая генерация тестовых последовательностей
BBD	Block-Based Design	Блочное проектирование
BER	Bit Error Rate	Частота ошибок по битам
BIST	Built-In Self-Test	Встроенное самотестирование
CDMA	Code-Division Multiple Access	Множественный доступ с кодовым разделением каналов
COT	Customer-Owned Tooling	Средства производства, принадлежащие заказчику
CPU	Central Processing Unit	Центральный процессор
D/A	Digital-Analogue	Цифроаналоговый
DFT	Design for Test	Тестовое проектирование
DFV	Design for verification	Верификационное проектирование
DMA	Direct Memory Access	Прямой доступ к памяти
DRC	Design Rule Checking	Контроль проектных норм

DSM DSP	Deep Sub-Micron Digital Signal Processor	Глубокий субмикрон Цифровой процессор сигналов
DUT DUV	Device Under Test Design Under Verification	Тестируемое устройство Верифицируемый проект
ECSI	European Chips and System design Initiative	Европейская Инициатива по чипам и системному проектированию
EDA	Electronic Design Automation	Автоматизация проектирования электроники (САПР электроники)
EDAC	Electronic Design Automation Companies	Компании по автоматизации проектирования электроники
EDGE	Enhanced Data Rate GSM	Стандарт GSM с расширенным потоком данных
EMEA	Europe, Middle East and Africa	Европа, Ближний Восток и Африка
ESL	Electronic System Level	Электронный системный уровень
ESW	Embedded Software	Встроенное программное обеспечение
FIFO	First-In, First-Out communication channel	Коммуникационный канал по принципу "первый вошел — первый вышел"
FPGA	Field-Programmable Gate Array	Программируемая пользователем вентильная матрица
FSM	Finite-State Machine	Конечный автомат
FVP	Functional Virtual Prototype	Виртуальный функциональный прототип
GDS II	Graphic Data System II — standard format for physical IC design	Система обработки графических данных II-стандартный формат для физического проектирования ИС
GPIO	General Purpose IO	IO — общего назначения
GSM	Group Special Mobile; Global System for Mobile Communications	Стандарт сотовой связи в Европе
GUI	Graphical User Interface	Графический интерфейс пользователя
HDL	Hardware Description Language	Язык описания аппаратной части
HdS, HDS	Hardware-dependent Software	Аппаратно-зависимое программное обеспечение
HDVL	Hardware Design and Verification Language	Язык аппаратного проектирования и верификации
HVL	Hardware Verification Language	Язык верификации аппаратной части
HW	Hardware	Аппаратная часть
IBS	International Business Strategies	Международные бизнес-стратегии
IC	Integrated Circuit	Интегральная схема
IDE	Integrated Development Environment	Интегрированная среда разработки
IDM	Integrated Device Manufacturer	Производитель интегрированных устройств
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers	Институт инженеров по электротехнике и электронике
IF	Intermediate Frequency	Промежуточная частота
IO, I/O	Input-Output	Ввод-вывод

IP	Intellectual Property	Интеллектуальная собственность	QoS	Quality of Service	Качество услуг
ISA	Instruction-Set Architecture	Архитектура системы команд	RF	Radio Frequency	Радиочастота
ISLI	Institute for System Level Integration	Институт интеграции на системном уровне	RISC	Reduced Instruction-Set Computer	ЭВМ с сокращенной системой команд
ISS	Instruction-Set Simulator	Симулятор системы команд	RMM	Reuse Methodology Manual	Руководство по методологии повторного использования
JTAG	Joint Test Action Group	Объединенная рабочая группа по автоматизации тестирования	RTL	Register-Transfer Level	Уровень регистровых передач
LAN	Local Area Network	Локальная сеть	RTOS	Real-Time Operating System	Операционная система реального времени
LCD	Liquid Crystal Display	Жидкокристаллический дисплей	SCV	SystemC Verification Library	Библиотека верификации SystemC
MAC	Media Access Control; Also, Multiply-Accumulator	Протокол управления доступом к (передающей) среде, также умножитель-аккумулятор	SDF	Statically-Scheduled DataFlow (Synchronous Dataflow)	Синхронный поток данных
MEMS	Micro Electronic Mechanical Systems	Микроэлектронные механические системы	SDL	Specification and Description Language	Язык спецификаций и описаний
MoC	Model of Computation	Модель вычислений	SERDES	Serializer-Deserializer (High speed serial interface)	Высокоскоростной последовательный интерфейс
MPSoC	Multi-Processor System on Chip	Многoproцессорная система на чипе (кристалле)	SiP, SIP	System in Package	Система в корпусе
MPU	Microprocessor Unit	Блок микропроцессора	SLD	System-Level Design	Проектирование на системном уровне
NoC	Network on Chip	Сеть на чипе (кристалле)	SLI	System-Level Integration	Интеграция на системном уровне
OCB	On-Chip Bus	Шина на чипе (кристалле)	SoC	System on Chip	Система на кристалле (чипе)
OCP	Open Core Protocol	Открытый протокол процессоров	SoP	System on Package	Система в корпусе
OCPIP	Open Core Protocol International Partnership	Международное партнерство OCP	SOPC	System on Programmable Chip	Система на программируемом кристалле (чипе)
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Ортогональное мультиплексирование деления частоты	SPW	Signal Processing Work-system	Система обработки сигналов
OMAPI	Open Mobile Application Processor Interface	Открытый интерфейс процессора мобильной системы	SW	Software	Программное обеспечение
OMG	Object Management Group	Рабочая группа по развитию стандартов объектно-программирования	TBD	Transaction-Based Design	Проектирование на основе транзакций
Open-MORE	MORE = Measure of Reuse Excellence	Степень качества повторного использования	TDD	Tod-Down Desian; also, Timing-Driven Design	Проектирование сверху-вниз или проектирование на основе задержек
OS	Operating System	Операционная система	TLM	Transaction-Level Model or Modelling	Модель или моделирование на уровне транзакций
OSC	Open SystemC Initiative	Открытая инициатива по SystemC	UML	Unified Modelling Language	Унифицированный язык моделирования
OVA	Open Vera Assertions	Утверждения Open Vera	UMTS	Universal Mobile Telecommunication System	Универсальная система мобильных телекоммуникаций
OVL	Open Verification Library	Открытая библиотека верификации	USB	Universal Serial Bus	Универсальная последовательная шина
PBD	Platform-Based Design	Проектирование на основе платформ	VC	Virtual Component	Виртуальный компонент
PCB	Printed Circuit Board	Печатная плата	VCC	Virtual Component CoDesign	Совместимо проектирование виртуальных компонентов
PCI	Personal Computer Interface	32-разрядная системная шина с возможностью расширения до 64 разрядов, взаимодействие через которую происходит без участия CPU	VCI	Virtual Component Interface	Интерфейс виртуальных компонентов
PCS	Personal Communication System (U. S. version of GSM)	Американская версия стандарта GSM	VCX	Virtual Component Exchange	Биржа виртуальных компонентов
PLD	Programmable Logic Device	Программируемое логическое устройство	VHDL	VHSIC Hardware Description Language	Язык описания аппаратной части
PSL	Property Specification Language (Accellera)	Язык описания свойств (Accellera)	VHSIC	Very High-Speed Integrated Circuit	Сверхбыстродействующая интегральная схема
QAM	Quad Adaptive Multiplexing	Квадратурная адаптивная модуляция	VSI	Virtual Socket Interface	Интерфейс виртуального "Гнезда"
			WLAN	Wireless Local Area Network	Локальная радиосеть (сеть с беспроводной связью)

FDA берет нано под учет

Американская администрация пищевых продуктов и лекарств (FDA) занимается лицензированием широкого спектра товаров (пищевые продукты, косметика, лекарства, аппаратура и ветеринария), а теперь займется и наноматериалами.

FDA определило нанотехнологии как отрасль разработок и исследований, регулируемую по следующим причинам:

- существующие материалы имеют атомный, молекулярный и макромолекулярный уровни, которые размером и функцией лекарств/устройств укладываются в шкалу от 1 до 100 нм;
- изобретения и используемые устройства, аппараты и системы обладают новыми свойствами ввиду их малых размеров;
- наносистемы и наноматериалы обладают способностью контролировать и манипулировать материей на атомарном уровне.

С улучшением терапевтических средств с помощью нанотехнологии станет возможной, например, доставка лекарственных средств к отдельным клеткам организма. В этой ситуации ответственность за надзор над такими продуктами берет на себя *Office of Combination Products*. Содействовать регуляции продуктов нанотехнологии будет агентство, сформированное из *NanoTechnology Interest Group (NTIG)*. Ежеквартальные конференции NTIG станут эффективным средством общения между Центрами.

Большинство Центров также имеют рабочие группы, которые укрепляют связи между различными подразделениями. Они расширяют круг продукции, связанной с нанотехнологиями, которые регулируют федеральные агентства. Широту спектра данной продукции, которую собирается регулировать FDA, покажет будущее.

Для того чтобы понять, как собирается FDA регулировать рынок нанопродуктов, прочтите этот документ: FDA regulation of Nanotechnology Products.

Источник

1. National Nanotechnology Initiative: FDA regulation of Nanotechnology Products

Открытые микрожидкостные и наножидкостные системы

Уже не секрет, что химические и биохимические экспресс-лаборатории будущего уменьшатся до размеров компьютерного чипа (речь идет о так

называемых лабораториях-на-чипе). Это позволит сделать анализы химических и биологических объектов более быстрыми и точными. Принцип действия лаборатории-на-чипе состоит в том, что она сортирует вещества с помощью ряда каналов, диаметром в несколько десятков нанометров. На основе лабораторий-на-чипе можно создать простые, эффективные и быстродействующие анализаторы крови. Если сегодня процедура анализа крови занимает около трех дней, то с использованием наножидкостных устройств этот срок может сократиться до получаса. При этом анализ будет выполнен с высокой степенью точности.

Однако массовое изготовление закрытых микрожидкостных систем сопряжено с определенными трудностями. Открытые микро- и наножидкостные системы, позволяющие осуществлять транспорт веществ, до сих пор не могли сконструировать из-за того, что оптимальная геометрия каналов таких устройств не была разработана.

Основа открытых микрожидкостных систем — сеть каналов, вытравленных на подложке (как правило, это кремний). Матрицы с открытыми каналами достаточно просто производить в больших количествах с помощью хорошо развитой на сегодняшний день фотолитографии. Недавно совместными усилиями ученых из института им. Макса Планка (Германия) и их коллег из Калифорнийского университета была разработана теория открытых нано- и микрожидкостных структур. Применение этой теории в изготовлении лабораторий-на-чипе позволит наладить их массовый выпуск.

Основа теории расчета капилляров заключается в определении их геометрии в зависимости от смачиваемости транспортируемой по ним жидкости. Простейший вид геометрии капиллярных каналов микрожидкостных систем — прямоугольный. На первый взгляд кажется нелепостью делать такие устройства с открытыми каналами для транспорта жидкости. Однако на микро- и наноуровне жидкости ведут себя не так, как все мы привыкли считать. Дело в том, что в микро- и наножидкостных системах важную роль играют капиллярные силы и силы поверхностного натяжения.

Исследователи попытались изучить морфологию протекания жидкости через открытые каналы с различной геометрией. Для этого они использовали быстро замерзающую полимерную жидкость. На рис. 1 (см. третью сторону обложки) можно видеть микрофотографии и 3D структуры, полученные с помощью атомно-силовой микроскопии.

Как мы видим, морфология достаточно разнообразна — жидкость то вытягивается вдоль канала, то собирается каплями.

На рис. 1 (см. третью сторону обложки) справа можно увидеть канал шириной 1 мкм, заполненный жидкостью. А в канале большей ширины, который представлен слева, жидкость образовала каплю. Также в процессе исследований было установлено, что наиболее сильные капиллярные силы образуются в канале, который имеет поперечное сечение в виде равнобедренной трапеции. Ученые также определили, что зависимость капиллярных сил от угла наклона контактных поверхностей не согласовывается с классическим уравнением Юнга. Поэтому исследователи разработали собственную теорию смачивания в наноразмерном диапазоне. Одним из интересных следствий новой теории является то, что давление жидкости в открытом канале шириной 100 нм может достигать 15 атмосфер! Если же расширить канал до 1 мм, то вступят в силу классические законы и давление упадет до тысячной доли атмосферы.

Одним из практических применений новой теории будет изготовление открытых микрожидкостных систем с изменяющейся геометрией каналов. Таким образом, можно будет управлять их смачиваемостью и, даже, регулировать проток жидкости через них. Также каналы можно сделать смачиваемыми только для определенного типа жидкости (выбрав нужный тип геометрии), что позволит сделать простые селекторные чипы.

Источник

Eurek Alert: Open microfluidic and nanofluidic systems

В Технионе создан институт нанотехнологий

В Хайфском Технионе создан Научно-исследовательский институт нанотехнологий. В этот проект вложено 78 млн долл., из которых 26 млн пожертвовано Фондом Рассела Бери (Нью-Джерси, США). В качестве соучредителей института выступают также Министерство промышленности и торговли, а также министерства финансов и обороны, которые внесли две трети требуемой суммы — 52 млн долл. Деньги будут переводиться Техниону на протяжении 5 лет.

Из Управления главного ученого Министерства промышленности и торговли сообщают, что решение основать институт было принято в связи с тем, что нанотехнологии являются на сегодняшний день одним из наиболее перспективных научных направлений.

Анжелика Бери, председатель Фонда, прибывшая в Израиль на открытие института, сказала, что

Технион является одним из наиболее известных в мире научных учреждений, занимающихся вопросами нанотехнологий и это обстоятельство оказалось решающим, когда обсуждались перспективы открытия в Израиле нового института.

Источник

Israland Новости

HP избавит мир от транзисторов

В лаборатории квантовых исследований (*Quantum Science Research, QSR*) компании *Hewlett-Packard* (HP) разработана новая технология производства нанoeлектронных устройств. Они, по утверждению авторов, в недалеком будущем могут прийти на смену современным кремниевым чипам.

Новые наноустройства, названные их разработчиком, ведущим сотрудником QSR Филом Кьюксом, *crossbar latches* ("поперечные триггеры" или "задвиги-перемычки"), уже сегодня могут использоваться для вычислительных операций в микропроцессорах, т.е. выполнять функции традиционных кремниевых транзисторов. Важнейшее же их отличие от последних — размер, который у узлов-спаек в "перемычках" составляет всего 2—3 нм, тогда как у лучших кремниевых аналогов он не меньше 60 нм.

"Поперечные триггеры" представляют собой решетку из микроскопических платиновых проволок, соединенных друг с другом в местах пересечения с помощью молекулярного слоя обычных углеводородных кислот. Подобно стандартному транзистору, новая наноструктура способна двояким образом реагировать на электрический сигнал, проходящий через узловые точки.

Вот что сказал один из ведущих британских экспертов в сфере нанотехнологии профессор Ноттингемского университета Филип Мориарт: "Предложенная HP схема — самая перспективная из имеющихся к настоящему времени разработок в молекулярной электронике. Если американские технологи смогут найти эффективные методы ее комбинирования с диодами или резисторами, итоговый продукт может стать базовой составляющей универсальных компьютеров будущего".

Две другие важнейшие задачи, которые еще предстоит решить исследователям из QSR, — резкое увеличение среднего срока службы новых устройств (пока "задвигек-перемычек" хватает только на несколько сотен компьютерных циклов) и увеличение их тактовой частоты (по скорости включения-выключения платиново-кислотные триггеры проигрывают силиконовым собратьям в несколько тысяч раз).

По словам директора QSR Стэна Уильямса, компания планирует коммерциализовать новую технологию к 2012 г. Впрочем, независимо от того, удастся или нет американским изобретателям справиться с этими проблемами в заявленные сроки, скорое пришествие принципиально новых субмикрометровых компьютеров неизбежно. Физические пределы миниатюризации кремниевых чипов практически достигнуты — по оценкам специалистов, пресловутый "силиконовый дедлайн" наступит в 2020—2021 гг.

Активный поиск альтернатив кремниевым технологиям сегодня идет во многих исследовательских лабораториях. По всей видимости, уже в первой половине следующего десятилетия должны появиться так называемые гибридные чипы, сочетающие в своей структуре как традиционные кремниевые элементы, так и новые материалы (вполне возможно, что ими станут как раз платиново-кислотные триггеры НР). А уже к началу 2020-х гг. может наступить долгожданная несиликоновая эра.

Источник

Журнал Эксперт

Квантовый выключатель — основа будущей наноэлектроники

Исследователям из японского Национального института материаловедения удалось перенести старую технологию механоэлектрических выключателей на квантовый уровень. Они создали миниатюрный механический выключатель, подобный тем, которые по сей день используются во многих бытовых приборах.

Принцип работы выключателя прост — при подаче напряжения на устройство между двумя нанопроводниками возникает или распадается мостик из серебра, который выполняет роль проводника.

Длина мостика, по которому протекает ток, — всего 1 нм. На отрезке длиной 1 нм можно расположить 10 атомов водорода, поэтому сообщение о создании нового квантового устройства претендует на сенсацию.

Исследователи говорят, что наноэлектроника на основе новых квантовых переключателей может вытеснить современную уже через 10 лет. Именно за такой срок, как они полагают, удастся коммерциализовать открытие Тсуоши Хасегава и его команды. Хасегава — директор Национального института материаловедения Японии.

В отличие от обычных механоэлектрических переключателей, у нанопроводника нет движущихся механических частей. "Переключатель из серебра возникает между шинами просто от подачи на них напряжения," — говорит Хасегава.

Мостик, состоящий из атомов серебра, формируется, когда между шинами возникает небольшая положительная разность потенциалов. А когда это напряжение меняет знак, мостик разрушается. Квантовое устройство работает при комнатной температуре и обычном окружении (давление, влажность воздуха и пр.).

Прототип, изготовленный учеными, переключается с частотой около 1 МГц (или миллион раз в секунду) при разнице потенциалов между шинами ± 600 мВ. Частота переключений устройства связана с толщиной шин. Как говорит Хасегава, если их еще уменьшить, то можно достичь частоты в 1 ГГц. Этот частотный предел использует современная электроника (рис. 2, см. третью сторону обложки).

Расскажем, как происходит формирование серебряного мостика. Весь секрет состоит в составе нанопроводников — шин. Один проводник выполнен из чистого серебра, покрытого тонким слоем сульфида серебра, второй — из платины, тоже покрытой чистым серебром. При возникновении положительной разности потенциалов между шинами, атомы серебра выделяются из сульфида в мостик длиной 1 нм, и соответственно, при изменении знака напряжения мостик разрушается, и атомы возвращаются в сульфид.

Преимущество нового ключа состоит в том, что благодаря конструкции устройства, емкость памяти на его основе будет выше той, которая существует сейчас. Если же использовать каждый ключ в качестве элемента памяти, то емкость одного слоя составит 2,5 Гбит/см², в то время как самые "сверхплотные" чипы памяти характеризуются емкостью в 1 Гбит/см².

То, что новое устройство работает по законам квантовой физики, позволяет создавать на его основе многобитную память. Как известно, в квантовой физике различные энергетические состояния квантуются, принимая определенные дискретные состояния. Поэтому один (!) ключ может представлять 16 состояний или 4 бита — так утверждает Хасегава.

Исследователи смогли сконструировать логические ячейки И, ИЛИ и ИЛИ-НЕ на основе нового ключа. Все логические устройства показали хорошие рабочие характеристики. Теперь ученые разрабатывают методы серийного производства матрицы квантовых ключей. Как говорит Хасегава: "Если нам удастся разработать многослойные чипы на основе этих переключателей, то произойдет еще одна революция в микроэлектронике".

Работа Хасегава впервые появилась в январском выпуске журнала Nature.

Источник

TRN: Nano bridge builds logic

Дендромерные ДНК-наночастицы помогут бороться с раком и другими заболеваниями

Исследователи из Мичиганского университета разработали быстрый и эффективный метод производства лекарств с использованием наночастиц и молекул ДНК.

Ученые взяли за основу молекулы дендромеров — крошечных разветвленных полимеров, концы которых могут присоединять различные молекулы. Таким образом, молекулы дендромеров образуют различные конструкции, которые могут служить "емкостями" для лекарств.

В ходе экспериментов с соединениями из дендромеров ученые установили, что они хорошо соединяются с молекулами ДНК. При этом молекулы ДНК выступают в качестве "скелета" сложной молекулы, доставляющей лекарство.

Главные активные компоненты этой наносистемы — дендромеры — могут нести на себе различные молекулы: от лекарства и белковых маркеров до флуоресцентных агентов. В принципе, можно создать дендромер, который бы нес одновременно и маркер, и лекарство, но процесс синтеза такой молекулы очень трудоемок (рис. 3, см. четвертую сторону обложки).

"Благодаря дендромерам мы можем доставить практически любое лекарство или диагностическое средство в любую клетку", — сказал Джеймс Бэйкер, профессор нанотехнологий и директор Центра Бионанотехнологий, образованного при Мичиганском университете.

Наночастицы — идеальное средство для доставки лекарств внутрь клетки. Но до сих пор ученые не могли разместить на них маркеры, позволяющие доставить лечебный груз наночастицы точно в цель — внутрь больной клетки. Да и само производство наночастиц дорого стоит и занимает много времени. Благодаря новой технологии наночастицы смогут стать одним из самых распространенных препаратов для лечения различных заболеваний (рис. 4, см. четвертую сторону обложки).

В статье, опубликованной 21 января в институтском журнале "Химия и биология", студент Янгсон Чой описал, как ему удалось синтезировать наночастицу-кластер, состоящую из двух разных дендромеров. Причем одна молекула дендромера предназначалась для поиска больных клеток, а другая содержала лекарство для них. Обе молекулы были связаны цепочкой ДНК, которая играла роль "скелета".

Как утверждают коллеги Чой и Джеймс Бэйкер, полученные наночастицы могут успешно использоваться как при диагностике раковых заболеваний,

так и при их последующем лечении. Простой синтез наночастиц и их универсальность позволят сделать этот вид лекарства эффективным и доступным.

В статье Чой рассказал, как он получил наночастицу-кластер. В раствор с двумя различными типами дендромеров он добавил цепочку ДНК длиной 34—66 нуклеотидов. Оказалось, что дендромеры имеют участки, комплементарные нуклеотидам ДНК. Через некоторое время в растворе "собрались" структуры из двух дендромеров, связанных между собой цепочкой ДНК. Один тип молекул дендромеров был флуоресцентный, а другой содержал комплекс маркеров раковых клеток. Полученный раствор кластерных наночастиц представлял собой средство для диагностики раковых опухолей. ДНК-наночастицы прилипали маркерным концом к больной клетке, а по флуоресцирующему концу эти клетки можно было увидеть.

С помощью самых современных средств цитологического анализа исследователи проверили, действительно ли дендромеры прикрепляются маркерным концом к раковым клеткам. Для проверки использовали 3D-микроскопы. Результат оказался положительным — большинство наночастиц достигло цели.

"Этот эксперимент подтверждает правильность наших исследований," — сказал Чой. — "Сейчас мы работаем над разработкой других наночастиц, другой конец которых будет содержать лекарство, а не флуоресцентный агент". А группа Бэйкера составляет библиотеку дендромеров, которые можно будет синтезировать и компоновать с молекулой ДНК, используя новую технологию. "Мы сейчас готовим склад кирпичиков ЛЕГО, из которых потом будем составлять лекарства от различных заболеваний", — сказал Бэйкер.

Бэйкер предвидит создание нанокластеров, состоящих из трех цепочек ДНК. Эти "базовые блоки", помещенные в раствор с дендромерами, вызовут самосборку наночастиц, состоящих уже из четырех дендромеров, которые будут выполнять различные функции. Один комплекс наночастицы может нести диагностический агент, другой — маркерный, а третий — лечащий. Такие терапевтические дендромеры могли бы избирательно поставлять пять отдельных лекарств пяти видам клеток. При этом синтез такой супермолекулы по методике Чоя занимает 10 шагов вместо 25, которые необходимо было проделать при использовании прежних технологий.

Источник

Nanotechnology-Now: DNA Molecules Used To Assemble Nanoparticles

Составил Ю. Г. Свидиенко

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

В этом номере мы начинаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области физики, математики, информатики, механики, химии и биологии и поддержанных Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) по итогам конкурса 1999 г. Эти отчеты представляют определенный интерес для специалистов в области микро- и наносистемной техники. Общий список работ опубликован в "Информационном бюллетене РФФИ", № 7, 1999 г. (<http://www.rfbr.ru>).

Акустические и акустоэлектронные свойства углеродных нанотрубных структур

Номер проекта: 99-02-17602
Год представления отчета: 2002

Впервые методом электронно-лучевого испарения чистого графита в вакууме на поверхности алюмоиттриевого граната (АИГ) и на поверхности сильного пьезоэлектрика — ниобата лития — синтезированы углеродные пленки, состоящие из хорошо ориентированных многослойных нанотрубок.

Методами сканирующей туннельной микроскопии измерены диаметры нанотрубок и исследована морфология синтезированных нанотрубных пленок. Решен ряд методических вопросов, связанных с применением акустической СВЧ спектроскопии для изучения углеродных нанотрубных систем, развит и теоретически обоснован метод измерения плотности и скорости объемных акустических волн. Изготовлены образцы составных резонаторов с нанотрубными пленками, нанесенными на поверхность АИГ. Методом акустической СВЧ спектроскопии впервые проведены прямые измерения плотности нанотрубных пленок и скорости акустических волн вдоль трубок.

Из данных эксперимента оценены коэффициенты упругости и коэффициент поглощения энергии упругих колебаний. Впервые обнаружен новый эффект — наблюдалось аномальное изменение во времени плотности нанотрубных пленок и скорости акустических волн. Проведены ИК спектроскопические и масс-спектроскопические исследования структур нанотрубных пленок и обнаружен эффект самопроизвольного легирования нанотрубных пленок материалом подложки при комнатной температуре, который качественно объясняет наблюдаемые аномалии в поведении плотности и скорости звука со временем.

Решен ряд методических вопросов, связанных с применением поверхностных акустических волн

(ПАВ) для изучения углеродных нанотрубных систем. Теоретически обоснованы методы измерения акустоэлектрической ЭДС, обосновано применение формул типа соотношения Вайнрайха для получения информации о знаке и концентрации носителей заряда, увлекаемых поверхностной акустической волной.

С использованием образцов на частотах 24 и 150 МГц впервые наблюдались продольный и поперечный акустоэлектрический эффекты в интервале температур от азота до комнатной. Обнаружены эффекты изменения величины и знака продольного акустоэлектрического эффекта со временем, по-видимому, связанные с эффектом проникновения атомов из подложки в область пленки. Следует отметить, что последний эффект значительно влияет и на механическую прочность углеродных нанотрубных пленок — после трехнедельного интервала от момента нанесения пленки их практически не удается смыть.

Впервые сформулировано предложение об использовании нанотрубных пленок в электроакустических преобразователях, основанных на эффекте электрострикции, стимулированной электрическими полями большой напряженности вблизи концов трубок. Проведен расчет полей вблизи пленки, показавший, что использование нанотрубных пленок позволяет увеличить эффективность преобразования в десятки раз. Развита теория электроакустического преобразования (возбуждения и регистрации объемных акустических волн) с помощью структур, содержащих углеродные нанотрубные пленки. Впервые в широком частотном диапазоне непосредственно измерена СВЧ проводимость углеродных нанотрубных пленок и обнаружены особенности электрического импеданса, характерные для конкретных материалов подложек.

Институт радиотехники и электроники РАН

Исследование физико-химических и тепловых процессов в элементах металлгидридных аккумуляторов водорода для энергоустановок, использующих возобновляемые энергоресурсы

Номер проекта: 99-02-16383
 Год представления отчета: 2002

Проект направлен на решение фундаментальных физико-химических и теплофизических проблем, связанных с созданием новых систем аккумуляции энергии на основе гидридов интерметаллических соединений. В рамках проекта проведено теоретическое и экспериментальное исследование проблем тепломассопереноса в металлгидридных системах аккумуляции водорода и теплоты для различных сплавов-абсорбентов с использованием обобщений термодинамических свойств систем металл—водород.

Выполнен комплекс экспериментальных исследований и разработана математическая модель расчета термодинамических свойств систем металл—водород. С использованием этих результатов разработана методика двумерного тепломассопереноса в дисперсных системах интерметаллид—водород при поглощении (выделении) водорода с учетом тепловых эффектов и кинетики реакции. На основе полученных результатов разработаны научные основы методов комплексной оптимизации основных параметров систем и составов сплавов для металлгидридных аккумуляторов водорода и тепловой энергии.

Государственное образовательное учреждение Химический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова

Проекционная литография экстремального ультрафиолетового диапазона (= 13 нм)

Номер проекта: 99-02-16137
 Год представления отчета: 2002

В рамках проекта в 2001 г. продолжены исследования по оптимизации технологии изготовления многослойных зеркал на спектральную область 13 нм, проведено комплексное исследование особенностей роста многослойных структур Mo/Si при применении технологии магнетронного распыления. Для изучения изготовленных многослойных структур применялись методы рентгеновской дифрактометрии и рентгеновской рефлектометрии, электронно-микроскопические исследования поперечных сколов структур, послынная Оже-электронная спектроскопия. Экспериментально показано основное влияние процессов кристаллизации в слоях молибдена на отражательные свойства многослойных зеркал Mo/Si. Изучена возможность и реализована схема компенсации внутренних напряжений в Mo/Si-многослойных зеркалах за счет применения буферного компенсационного подслоя, изучены процессы релаксации механических напряжений. Изготовлены и паспортизованы образцы зеркал с коэффициентами отражения на длине волны 13 нм до 69 %. Разработана и изготовлена новая разборная рентгеновская трубка и на ее основе создан макетный образец рефлектометра, позволяющий проводить измерения параметров образцов диаметром до 330 мм и с различной формой поверхности.

Институт физики микроструктур РАН

ПРЕДСТАВЛЯЕМ КНИГУ

В. Немудров, Г. Мартин. Системы на кристалле. Проектирование и развитие. — М. — Техносфера. 2004.

В книге рассмотрены различные аспекты проектирования и развития нового класса перспективной электронной элементной базы — "систем на кристалле" ("system-on-chip" — сокращенно SoC).

Описываются характерные особенности проектирования SoC (многократное использование в процессе проектирования IP-блоков, введение в САПР "системного" уровня, спиралевидная модель маршрута проектирования и т.д.).

Анализируется новая мировая инфраструктура проектирования и производства SoC, сложившаяся в мире в начале 2000-х годов.

Описана новая методология проектирования на основе многократного использования IP-блоков (блоков интеллектуальной собственности — Intellectual Property).

Изложена полная методология проектирования SoC, включающая системный, функциональный, логический и физический уровни проектирования SoC.

Описаны особенности и преимущества использования языка System C в процессе проектирования SoC на системном уровне. На конкретном примере SoC в прикладной области беспроводной связи третьего поколения рассмотрены особенности алгоритмически ориентированных методов проектирования SoC. Рассмотрены также методы "платформенного" проектирования SoC.

Для специалистов, студентов и преподавателей в области современной электроники.

**Заказ книги:
 125319 Москва, а/я 594
 тел. (095) 956-3346, 234-0110**

Шестая Международная научно-техническая конференция ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ И МНОГОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ ИМС'2005



ИПИИ



НИИ МВС ТРТУ



БГУ

26 сентября—1 октября 2005 г.
пос. Дивноморское, Геленджикский район,
Краснодарский край, Россия

Целью конференции является объединение усилий ученых различных стран в области создания высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем и их использования для решения задач искусственного интеллекта. Проводимая конференция даст возможность развить имеющиеся концепции создания МВС и стратегии их применения в интеллектуальных системах, уточнить наиболее перспективные пути фундаментальных и прикладных исследований в данной области, определить направления практических внедрений интеллектуальных и многопроцессорных систем в различных сферах человеческой деятельности.

Ввиду актуальности тематики и важности принимаемых решений на конференции также приглашены потенциальные заказчики высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем и интеллектуальных систем нового поколения.

Организаторы и спонсоры

- Министерство образования и науки России
- Южный научный центр Российской академии наук
- Российский фонд фундаментальных исследований
- Министерство образования и науки Украины
- Отделение информатики Национальной академии наук Украины
- Национальная академия наук Беларуси
- НИИ многопроцессорных вычислительных систем Таганрогского государственного радиотехнического университета (НИИ МВС ТРТУ, Россия)
- Институт оптико-нейронных технологий РАН (ИОНТ РАН, Россия)
- Институт проблем искусственного интеллекта (ИПИИ, Украина)

- Белорусский государственный университет (БГУ, Беларусь)

Направления работы конференции:

- Концептуальные проблемы искусственного интеллекта
- Теория и практика создания интеллектуальных и многопроцессорных систем
- Алгоритмическое и программное обеспечение ИМС
- Нейронные сети и нейросетевые технологии
- Интеллектуальные системы принятия решений и управления
- Обучающие и экспертные системы
- Компьютеризация естественных языков
- Элементная база ИМС
- Интеллектуальные системы цифровой обработки сигналов и изображений
- Интеллектуальные робототехнические и мультимедийные системы
- Интеллектуальные системы информационной безопасности

Одновременно с работой конференции будут проведены научные молодежные школы и международный турнир по виртуальному футболу.

Международный программный комитет

- | | |
|--------------------|--|
| И. А. Каляев | чл.-корр. РАН (НИИ МВС ТРТУ, Таганрог, Россия) — сопредседатель |
| С. В. Абламейко | чл.-корр. НАНБ (ОИПИ НАНБ, Минск, Беларусь) — сопредседатель |
| А. И. Шевченко | профессор (ИПИИ, Донецк, Украина) — сопредседатель академик РАН (МФТИ, Москва, Россия) |
| А. С. Бугаев | профессор (БГУ, Минск, Беларусь) |
| М. К. Буза | академик РАН (ИПИ РАН, Москва, Россия) |
| В. С. Бурцев | чл.-корр. НАНУ (ИПМЭ НАНУ, Киев, Украина) |
| В. В. Васильев | профессор (Научный центр нейрокompьютеров, Москва, Россия) |
| А. И. Галушкин | профессор (ИК им. В. М. Глушкова НАНУ, Киев, Украина) |
| В. П. Гладун | академик РАН (ИРЭА РАН, Москва, Россия) |
| Ю. В. Гуляев | профессор (ИОНТ РАН, Москва, Россия) |
| Б. В. Крыжановский | профессор (БГУ, Минск, Беларусь) |
| А. Н. Курбацкий | академик НАНБ (БГУИР, Минск, Беларусь) |
| В. А. Лабунов | профессор (ОИПИ НАНБ, Минск, Беларусь) |
| Б. М. Лобанов | чл.-корр. РАН (ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, Россия) |
| В. А. Лопота | профессор (Чжецздзянский университет, Ханьчжоу, Китай) |
| Ли Джилин | |

П. П. Мальцев	профессор (СПП РАН, Москва, Россия)
В. М. Матросов	академик РАН (ИМАШ РАН, Москва, Россия)
А. Л. Микаэлян	академик РАН (ИОНТ РАН, Москва, Россия)
Д. Е. Охочимский	академик РАН (ИПМ им. М. В. Кельдыша РАН, Москва, Россия)
В. Е. Павловский	профессор (МГУ, Москва, Россия)
А. В. Палагин	чл.-корр. НАНУ (ИК им. В. М. Глушкова НАНУ, Киев, Украина)
А. С. Сигов	профессор (МИРЭА, Москва, Россия)
А. А. Петровский	профессор (БГУИР, Минск, Беларусь)
И. В. Сергиенко	академик НАНУ (ИК им. В. М. Глушкова НАНУ, Отделение информатики НАНУ, Киев, Украина)
В. И. Скурихин	академик НАНУ (ИК им. В. М. Глушкова НАНУ, Киев, Украина)
И. В. Совпель	профессор (БГУ, Минск, Беларусь)
Ю. С. Харин	чл.-корр. НАНБ (БГУ, Минск, Беларусь)
В. Г. Хорошевский	чл.-корр. РАН (ИФП СО РАН, Новосибирск, Россия)
В. Ю. Шелепов	профессор (ИПИИ, Донецк, Украина)

Секретариат Программного и Организационного комитетов

По вопросам участия в конференции обращаться:

347928, Россия, г. Таганрог, ГСП-284, ул. Чехова, 2, НИИ МВС ТРТУ

Телефоны для справок: (8634) 615-459, 315-493,

Факс: (8634) 36-03-76 E-mail: mvs@tsure.ru

Internet: <http://www.mvs.tsure.ru>

Кухаренко Анатолий Павлович

Бронзов Владимир Олегович

83050, Украина, г. Донецк, пр. Б. Хмельницкого, 84, ИПИИ

Телефоны для справок: +1038 (062) 337-33-35, 337-01-70

Факс: +1038 (0622) 92-60-82 E-mail: press@iai.donetsk.ua

Иванова Светлана Борисовна

Пигуз Валентина Николаевна

220050, Беларусь, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 4, БГУ,

Телефоны для справок: +10 (37517) 209-54-05, 209-51-08

E-mail: krakhotko@bsu.by, roubashko@bsu.by

Крахотко Валерий Васильевич

Рубашко Наталья Константиновна

Заявка на участие в конференции

Заявка на участие и материалы докладов должны поступить в Оргкомитет **не позднее 15.06.2005 г.** Возможна пересылка по E-mail в НИИ МВС ТРТУ.

ICMNE 2005

QI-2005

International Conference "Micro- & nanoelectronics — 2005" and International Symposium "Quantum Informatics — 2005", Moscow region, October, 3–7

<http://www.icmne.ftian.ru>

Dear Colleagues

We are glad to invite you for participation in the International Conference "Micro- and nanoelectronics — 2005" (ICMNE — 2005) and co-located International Symposium "Quantum Informatics — 2005" (QI — 2005) which will be held at the holiday hotel "Lipki", Zvenigorod, Moscow region, Russia during October 3–7, 2005.

The Conference ICMNE is SPIE biennial conference in Russia covering the whole area of micro- and nanoelectronics problems. Conference is focused on current and recent progress in micro- and nanoelectronics technologies, physics and devices. The Conference will include a micro- and nanoelectronic equipment and devices exhibition with participation SEMI@ Moscow.

The official language is English. ICMNE—2005 single-page abstracts will be collected in a Book of Abstracts before beginning of the Conference. SPIE (<http://www.spie.org>) will publish the full-manuscript Proceedings after Conference termination.

Registration form, abstract submission address, and more detail conference information are given at website <http://www.icmne.ftian.ru>.

Deadline is June 15th, 2005.

Sincerely Yours,

Organizing Committee ICMNE—2005

Уважаемые коллеги!

Мы рады пригласить Вас принять участие в Международной конференции "Микро- и нанoeлектроника — 2005" (ICMNE — 2005) и Симпозиуме "Квантовая информатика — 2005" (QI — 2005), которые состоятся в подмосковном пансионате "Липки", г. Звенигород, с 3 по 7 октября 2005 г.

Российская конференция, в последние два года ставшая Международной конференцией SPIE, включает в себя все сферы микро- и нанoeлектронных технологий, физики и приборов. Главной целью ICMNE является представление современных достижений в этой области на обсуждение научной общественности. Конференция будет включать в себя выставку микро- и нанoeлектронного оборудования и приборов при участии московского представительства фирмы SEMI@.

Официальный язык конференции и публикаций — английский. Представленные на конференцию "ICMNE — 2005" одностраничные тезисы доклада будут опубликованы в виде брошюры до начала конференции. SPIE (<http://www.spie.org>) публикует полные тексты докладов в виде трудов конференции после проведения ICMNE — 2005. Публикуются только те доклады, которые были представлены и обсуждены на конференции.

Регистрационную форму, адрес, по которому следует направить тезисы Вашего доклада, и более детальную информацию Вы можете получить на сайте конференции <http://www.icmne.ftian.ru>.

Последний срок регистрации и прием тезисов — **15 июня 2005 г.**

С наилучшими пожеланиями

Оргкомитет ICMNE — 2005

XI Международная научно-техническая конференция "ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ"

(Материалы и устройства
функциональной электрони-
ки и нанопотоники)

и XVII Международный симпозиум "ТОНКИЕ ПЛЕНКИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ"

Москва, 8—10 сентября 2005 г.

Основные направления

- Электронные технологии в машиностроении
- Вакуумное технологическое оборудование и системы автоматического управления
- Материалы, оборудование и технологии нанoeлектроники и нанопотоники
- Нанотехнологии и фотонные кристаллы
- Новые технологии производства, обработки и исследования наноматериалов
- Технологии и оборудование для производства приборов электронной техники и радиоэлектронных устройств
- Наноструктурированные материалы и фотонные кристаллы в оптоэлектронике, медицине и оптическом приборостроении
- Микроэлектромеханические системы в медицине и промышленности
- Получение, свойства и применение тонких пленок в электронике
- Системы и устройства радиотехники и средств связи
- Методы контроля функциональных свойств материалов электронной техники, измерительная аппаратура и аналитические методы
- Моделирование и информационное обеспечение исследований

Адреса для переписки:

105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, МТ-11

E-mail: bulygina@mx.bmstu.ru

E-mail: panfilov@mx.bmstu.ru

Тел.: (095) 267-02-13,

Тел./факс (095) 267-17-39

121108, Россия, г. Москва, ул. Ивана Франко, 4

E-mail: samoylovich@technomash.ru

Тел.: (095) 146-10-95

Тел./факс (095) 146-19*42

ОРГКОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИЙ

Сопредседатели

И. Б. Федоров — Ректор МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва

В. Д. Житковский — Генеральный директор ОАО ЦНИТИ "Техномаш", Москва

Члены оргкомитета

Ю. В. Панфилов — заведующий кафедрой "Электронные технологии в машиностроении" МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, зам. председателя

А. Ф. Белянин — руководитель научных программ, начальник отдела ОАО ЦНИТИ "Техномаш", Москва, зам. председателя

М. И. Самойлович — руководитель научных программ, начальник отдела ОАО ЦНИТИ "Техномаш", Москва, зам. председателя

А. С. Багдасарян — генеральный директор ЗАО НП "ЭЛКО", Москва

С. В. Гапоненко — директор Института молекулярной и атомной физики НАН Беларуси, Минск

К. Е. Демихов — проректор по научной работе МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва

В. М. Елинсон — профессор МАТИ — Российский государственный авиационно-технологический университет им. К. Э. Циолковского, Москва

В. В. Жиликов — первый заместитель генерального директора ОАО ЦНИТИ "Техномаш", Москва

Н. Д. Жуков — генеральный директор ФГУП "Волга", Саратов

Р. Каканак — директор Института прикладной физики БАН, Пловдив, Болгария

А. Г. Колесников — руководитель НУК "Машиностроительные технологии" МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва

В. С. Круглов — заместитель директора Института сверхпроводимости и физики твердого тела РНЦ "Курчатовский институт", Москва

В. Н. Конов — директор Центра естественно-научных исследований Института общей физики РАН, Москва

С. Б. Нестеров — заместитель генерального директора ГУП НИИВТ им. С. А. Векшинского, Москва

В. В. Одинок — генеральный директор ОАО НИИТМ, Зеленоград

Ю. М. Саранулов — генеральный директор ОАО НПО "Спецэлектромеханика", Москва

А. П. Семёнов — вице-президент БНЦ СО РАН, Улан-Удэ

Н. С. Сергеева — руководитель отдела МНИОИ им. П. А. Герцена, Москва

В. И. Стафеев — руководитель научных программ НПО "Орион", Москва

Н. В. Суетин — заведующий отделом НИИЯФ МГУ, Москва

В. С. Урусов — заведующий кафедрой МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва

Ю. Б. Цветков — заместитель заведующего кафедрой МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва

В. Я. Шевченко — директор Института химии силикатов РАН, Санкт-Петербург

Э. М. Шпилевский — заведующий отделом ГНУ "Института тепло- и массообмена"

НАН Беларуси, Минск

В. А. Шубарев — генеральный директор ОАО "Авангард", Санкт-Петербург

В. М. Шулаев — заместитель генерального директора по технологическим и опытно-конструкторским работам ННЦ "Харьковский физико-технический институт" НАН Украины, Харьков

И. О. Шурчков — вице-президент ОАО "Телеком", Москва

Ученый секретарь

Екатерина Вадимовна Булыгина — доцент кафедры "Электронные технологии в машиностроении" МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва

Тел.: (095) 267-0983, факс (095) 267-1739

E-mail: bulygina@mx.bmstu.ru

CONTENTS

Luchinin V. V. *Introduction into the Industry of Nanosystems* . . . 2

Presented the system approach to the industry of nanosystems as a priority line of development of science and engineering.

Defined the fundamental concepts which are used in the industry of nanosystems. Defined research-and-production and educational basis of the industry of nanosystems according to the fusion with the priority lines of development of science, engineering and technology.

Maximov G. A., Nikolitchev D. E., Filatov D. O. *Local Analysis of GeSi/Si Nanoclusters by Scanning Auger Microscopy* 9

Analytic potential of Scanning Auger Microscopy for study of semiconducting nanostructures composition was investigated. The object of investigation was the self-assembled GeSi nanoclusters grown on silicon substrate by methods of Molecular Beam Epitaxy. The practicability of local compositional analysis with nanometer resolution of single GeSi nanoclusters was shown. The spatial resolution of the apparatus was determined for different structures types. The measurement technique was developed and concentration of Ge and Si profiling in nanoclusters was done.

Bedkov G. V. *On the Mechanical Energy Dissipation in Dynamic Force Scanning Probe Microscopy in UHV* 14

This works aims at critical discussion of recent observations of conservative and dissipative interactions in tip — sample contacts probing by dynamic force spectroscopy in UHV. Specifically, both normal and lateral tip motion on different materials was realized, but to date, the origin of the long range damping forces proves to be unclear. For the first time, we propose a simple general relation between conservative and dissipative force of arbitrary origin, acting on the tip, which allows to explain the measured damping into the contact. A single phenomenological

parameter is needed — the characteristic velocity or time of the dissipative mechanism. A reasonable agreement with both type of the experiments is achieved. The physical origin of the dissipative mechanism is assumed to be related with phonon damping.

Yakjmov A. I., Dvurechenskii A. V., Nikiforov A. I. *Ge/Si Photodetectors with Embedded Ge Quantum Dots for Optical Fibre Communications* 19

We expound the physical fundamentals and report on the development of Ge/Si photodetectors embedded with Ge quantum dots and designed for operation at the telecommunication wavelengths (1,3...1,55 μm).

Gaikovich K. P., Dryakhlushin V. F., Nikolichev D. E. *Images Deconvolution in the Scanning Auger Microscopy in the Scanning Electron Microscopy* 30

Possibilities are demonstrated to improve the lateral resolution in the scanning Auger microscopy that is in use for the chemical analysis of the nanostructures as well as in the scanning electron microscopy by the images deconvolution with taking into account the probe transfer function. The problem of images retrieval from the 2D convolution equation are solved using a method based on the Tikhonov's theory of ill-posed problems.

Ryabko M. V., Nikitov S. A., Chamorovskii Yu. K. *The Micro-Structured Optical Fiber* 33

The current issue surveys the results of investigations of dispersion, linear properties and birefringency of the micro-structured optical fiber properties. The non-linear properties are considered in the course. The computing and analytical methods for the calculations of the properties of micro-structured fibers are considered. The properties of the photonic crystal fibers are reviewed with the idea of their applications.

For foreign subscribers:

Joint-stock company MK-Periodica. E-mail: info@periodicals.ru Tel.: +7(095) 684-5008. Fax: +7(095) 681-3798

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(095) 269-5510.
E-mail: it@novtex.ru; <http://www.microsystems.ru>

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4/1. Телефон редакции журнала (095) 269-5510. E-mail: it@novtex.ru
Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т.Н. Погорелова. Технический редактор И.С. Павлова. Корректор Е. Волкова

Сдано в набор 01.03.2005. Подписано в печать 07.04.2005. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,67. Заказ 738. Цена договорная

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