

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 12 ✧ 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.
Пяташев 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.
Чугунова А. В.

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

- Петрунин В. Ф. Российская ниша наноматериалов как перспективная база нанотехнологий 2
- Назаренко В. А. Нейтронные методы в исследовании структуры и свойств материалов 4
- Чаплыгин Ю. А. Проблемы подготовки кадров для разработки нанотехнологий и производства наноструктур 8
- Быков В. А. Развитие производственной базы нанoeлектроники в Зеленограде . 11

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

- Аксенов А. И., Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Симунин М. М. Химические сенсоры на основе пучков углеродных нанотрубок для обнаружения низких концентраций молекул хлора в атмосфере. 12

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

- Козлов А. Г. Моделирование нестационарного режима работы микроэлектронного теплового приемника излучения консольного типа . . . 16

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

- Панфилов Ю. В. Наноструктурированные материалы и нанотехнология: анализ современного состояния. Часть II. 26
- Гордеев С. К., Корчагина С. Б., Ламанов А. М., Ламанов М. М., Мойя А. М., Слепнев С. П., Шешин Е. П. Новая методика изготовления автоэмиссионных катодов из графитовой фольги 33

СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

- Адамов Ю. Ф., Губин Я. С., Кокин С. А., Макаров С. В., Сомов О. А. Параметризация и верификация аналоговых блоков для "систем на кристалле" при смене технологии 37

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

- Барабаненков М. Ю., Старков В. В. Микрозеркала на основе двумерных периодических структур из металло-диэлектрических трубок 40

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

- Осипов Л. В. Медицинская электроника 45

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

- Указатель статей, опубликованных в журнале "Нано- и микросистемная техника" в 2005 г. 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)

УДК 621.3.049

В. Ф. Петрунин, д-р техн. наук, проф.,
Московский инженерно-физический институт

РОССИЙСКАЯ НИША НАНОМАТЕРИАЛОВ КАК ПЕРСПЕКТИВНАЯ БАЗА НАНОТЕХНОЛОГИЙ*

Рассматриваются история, особенности свойств и перспективы применения ультрадисперсных (нано-) порошков — наноматериалов, разработанных в России.

Несмотря на недостаточность государственной поддержки развития нанотехнологий в России — это, несомненно, одна из "ключевых" технологий. А "ключевые" технологии, как отметил один из нобелевских лауреатов, — это такие технологии, которые на какой-то период времени определяют развитие всех других технологий.

Нанотехнологии — это и есть самая современная "ключевая" технология. Если рассмотреть ретроспективу, то с начала XX века такими ключевыми технологиями были легкая промышленность, затем тяжелая индустрия, еще позже ядерно-энергетические и космические технологии (рис. 1) [1]. И когда наша страна занимала ведущие места именно в этих технологиях (в тяжелой индустрии, в ядерной энергетике, в космических технологиях), тогда мы и были великой страной. Если мы сейчас не упустим время для разработки нанотехнологий и даже если не по всему их фронту, а по некоторым из них

займем ведущие места в создающемся "умном" мире XXI века, то мы снова сможем стать великой страной, подлинной державой.

Стоит сказать об ультрадисперсных порошках, т. е. о наноматериалах, которыми мы занимаемся очень давно — уже более 50 лет, т. е. раньше, чем ими стали заниматься и на Востоке, и на Западе. Есть очень много перспективных областей их применения, в частности, в военной технике и вооружениях, т. е. в области, традиционно важной для России, а также в таких актуальных областях, как безопасность, энергетика (в том числе ядерная), газовая, нефтяная, горнодобывающая промышленность, медицина и фармакология. Ультрадисперсные, или нанопорошки, как их называют за рубежом, уже сегодня достигли оборота на рын-

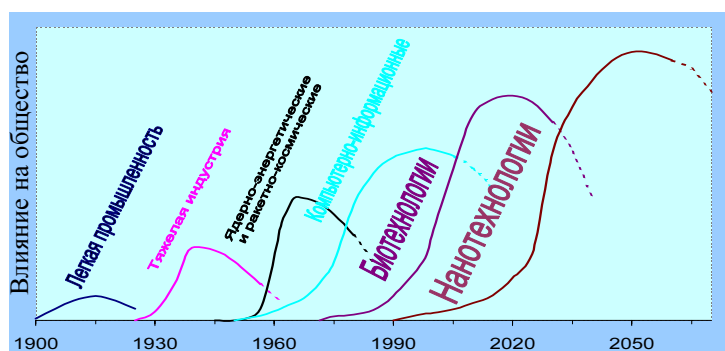
ке порядка миллиона долларов, поскольку области их применения — это самые разные области техники и промышленности.

Еще в 1950-е годы в бывшем Минсредмаше СССР было освоено не только производство этих порошков, но и их важное применение в "урановом проекте" при создании атомной бомбы. И уже тогда было налажено производство, которое позволило достичь большого экономического эффекта, который был отмечен Ленинской премией.

В качестве открытого гражданского научно-технического направления "Ультрадисперсные системы" оформилось в нашей стране в 1979 г. созданием координационного Совета при АН СССР и успешно развивалось до 1992 г. и менее успешно — позже. Проведены были три всесоюзных и три всероссийских конференций. Сейчас из двух тысяч специалистов в этой сфере, которые были у нас перед распадом СССР, около 500 еще работают в России, а более 100 работают за рубежом.

Несколько слов о терминологии. Еще в 1981 г. ультрадисперсные материалы были определены не просто по геометрическому размеру (меньше 100 нм), а и по их соизмеримости с характерны-

* Статья подготовлена на основании стенограммы совещания Межфракционного депутатского объединения "Наука и высокие технологии" совместно с Комитетом по образованию и науке, Комитетом по промышленности, строительству и наукоёмким технологиям и Комитетом по энергетике, транспорту и связи на тему: "Нанотехнологии — проблемы развития и подготовки кадров" в Государственной Думе 26 октября 2004 г. под председательством лауреата Нобелевской премии академика Ж. И. Алферова. Стенограмма подготовлена и представлена В. И. Бабкиным.



Объемы финансирования исследовательских программ
 США 830 \$M Япония 900 \$M Западная Европа 1300 \$M
 Другие страны (Россия, Китай, Канада, Ю.Корея, Индия) ~2000 \$M
ИТОГО ~5000 \$M

Рис. 1. Актуальность проблемы. Развитие "ключевых" технологий в 1900–2050 гг.

ми физическими величинами для твердого вещества. К главным физическим особенностям ультрадисперсных (нано-) материалов можно отнести три:

- ограничение действия законов классической физики из-за малого размера;
- значительный рост удельной поверхностной энергии;
- экстремальные условия синтеза.

По критерию, предложенному в свое время нобелевским лауреатом Л. Д. Ландау, по функции атомного распределения наноматериалы занимают промежуточное положение между кристаллами и аморфными веществами (рис. 2) [2]. Именно этим обуславливаются особенности их свойств. И фактически все свойства — механические, электрические, магнитные, термические, оптические и химические — ультрадисперсных (нано-) материалов своеобразны, а иногда уникальны, что можно широко использовать для практического применения.

Можно привести несколько примеров. Добавки ультрадисперсных порошков позволяют:

- усовершенствовать технологию получения топливных таблеток на основе диоксида урана (снизить температуру спекания, увеличить размер зерна, причем не на проценты, а в разы);
- получить наночастицы для очистки жидких радиоактивных отходов, которые могут быть применены для очистки биологически вредных и других наноразмерных примесей.

Очень интересна разработка по созданию нанокраски для защиты ценных бумаг и документов (рис. 3). Можно защитить, например, документы депутатов Госдумы и другие документы по технологиям, которые на сегодня лучшие в мире.

Чрезвычайно перспективный материал — разработанный в атомной энергетике ультрадис-

персный высокопористый бериллий для рентгеновских аппаратов физического и медицинского назначения. Сейчас он интересен еще и тем, что в лазерно-термоядерном синтезе он единственный или один из двух материалов

для оболочки мишени лазерного термоядерного синтеза.

На основе наноструктурных материалов разработана тонкослойная защита (в 70 раз тоньше применяемых сегодня) от электромагнитного излучения — на-

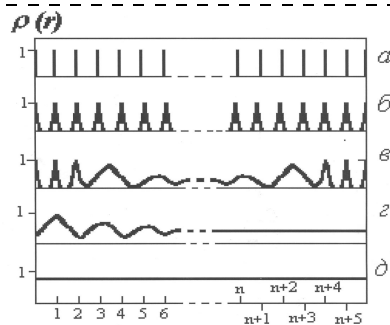


Рис. 2. Функция атомной плотности в твердых телах с различным совершенством атомной структуры

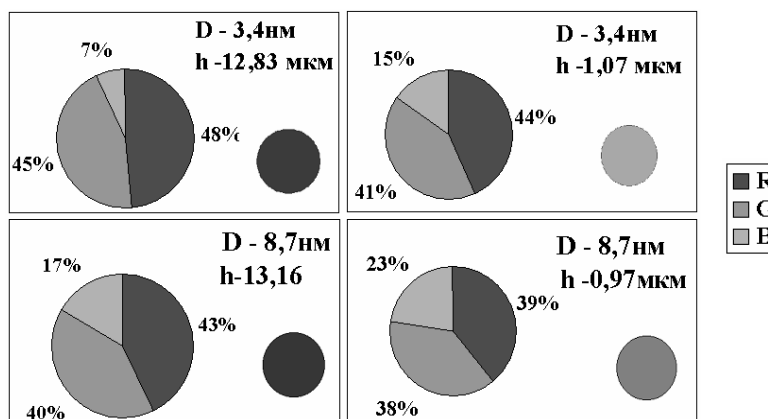
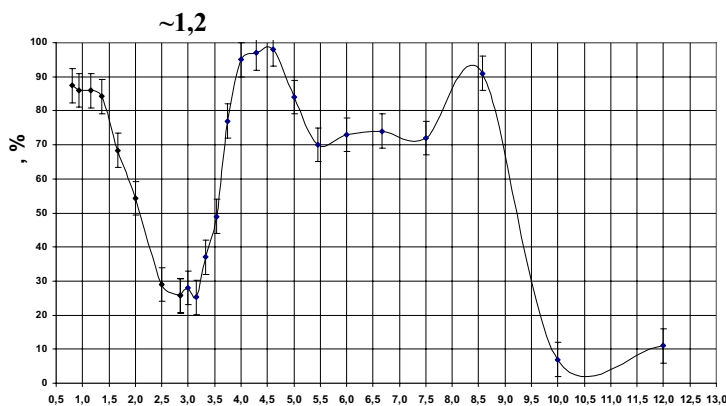


Рис. 3. Краски для защиты от подделок. Влияние размера кристаллита (D) и толщины отклика (h) на цвет



: 2200749 20.03.2003 2200177 10.03.2003

Рис. 4. Наномаскировка от радиообнаружения

номаскировка от радиобнаружения (рис. 4). Эта технология прошла испытания, защищена патентом и сейчас на стадии разработки для промышленного производства.

Если удастся добиться государственной поддержки Госдумы, как это делается, например, законодательными органами в США, то имеющиеся разработки можно будет использовать для развития высоких технологий и с помощью частного сектора. Сейчас предприниматели нередко задают вопрос, почему государство не обращает достаточного внимания на деятельность по применению наноматериалов. На этот вопрос трудно дать конкретный ответ. Если будет хоть какая-то го-

сударственная национальная программа, то многие российские предприниматели окажут поддержку и вложат внебюджетные средства.

В заключение следует подчеркнуть, что в лице ультрадисперсных порошков мы имеем целый класс наноматериалов, весьма технологичных в самых разнообразных применениях. На сегодня разработано около 20 различных технологических способов их синтеза. Есть также специалисты, выпускающие опытные партии ультрадисперсных (нано-)порошков. При государственной поддержке все это может стать одной из инновационно-технических основ развития нанотехнологий в нашей стране.

Список литературы

1. Roco M. C., Bainbridge W. S. Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology // Kluwer Academic Publishers. Dordrecht (Netherlands). 2001.
2. Petrunin V. F. // Nanostruct. Mater. 1999. V. 12. P. 1153.
3. Круглов А. К. Как создавалась атомная промышленность в СССР. М.: ЦНИИАтоминформ, 1995. 380 с.
4. Морохов И. Д., Петин В. И., Петрунин В. Ф., Трусов Л. И. // УФН. 1981. Т. 133. В. 4. С. 653—692.
5. Петрунин В. Ф. Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем // Сб. науч. труд. VI Всерос. конф. М.: МИФИ, 2003. С. 19—22.
6. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии: Пер. с англ. // М.: Техносфера, 2004. 328 с.
7. Петрунин В. Ф., Рябьев Л. Д. Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем // Сб. науч. труд. IV Всерос. конф. М.: МИФИ, 1999. С. 18—22.

УДК 621.3.049

В. А. Назаренко, чл.-корр. РАН, директор
Петербургского института ядерной физики РАН

НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ В ИССЛЕДОВАНИИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ*

Рассмотрены особенности нейтронного излучения и сфера его применения как в фундаментальной науке, так и в прикладных исследованиях, а также состояние дел с завершением реализации проекта высокопоточного реактора ПИК.

Поиск и искусственное создание новых материалов, разработка технологий их использования составляют основу развития цивилизации на всей ее многовековой истории. Высокотемпературные сверхпроводники, фуллерены и их модификации, спиновые стекла, магниторезисторы, нанострук-

туры, материалы с памятью формы и т. п. — все это понятия, еще совсем недавно неизвестные не только неспециалистам. Нет сомнения в том, что эта лавина будет нарастать с развитием науки, а место государств в мировой иерархии будет определяться состоянием науки в той или иной стране и использованием ее достижений в практике. Но создание, направленный синтез новых материалов невозможны без изучения их структуры и свойств, а наиболее эффективным инструментом в этом смысле являются нейтронное и синхротронное излучения. При этом это не конкурирующие методы, а комплементарные (дополняющие друг друга) — их параллельное использование позволяет получить более полное и детальное знание свойств изучаемого объекта.

Специфические особенности нейтронного излучения определяются следующими уникальными свойствами нейтрона:

- нейтрон взаимодействует с атомными ядрами, а поэтому способен различать не только практически все элементы таблицы Менделеева (включая легкие — водород, углерод, кислород), но и изотопный состав вещества;
- нейтрон обладает магнитным моментом, что исключительно ценно для изучения магнитной структуры и магнитных возбуждений;
- энергия нейтронов при той же длине волны, что и у рентгеновских, и гамма-лучей, сравнима с энергией элементарных возбуждений в исследуе-

* Статья подготовлена на основании материалов совещания Межфракционного депутатского объединения "Наука и высокие технологии" совместно с Комитетом по образованию и науке, Комитетом по промышленности, строительству и наукоёмким технологиям и Комитетом по энергетике, транспорту и связи на тему: "Нанотехнологии — проблемы развития и подготовки кадров" в здании Государственной Думы 26 октября 2004 г. под председательством лауреата Нобелевской премии академика Ж. И. Алферова. Стенограмма подготовлена и представлена В. И. Бабиным.

мом материале, что позволяет изучать не только среднестатистическую структуру, но и динамические процессы, происходящие в веществе;

- нейтрон электрически нейтрален, что обеспечивает его глубокое проникновение в вещество.

Благодаря этим и другим, не перечисленным выше особенностям, нейтронное излучение имеет весьма широкую сферу применения как в фундаментальной науке, так и в прикладных исследованиях.

Прежде всего, нейтрон сам по себе представляет интерес для фундаментальной науки:

- прецизионное измерение времени жизни нейтрона (а он не стабилен) исключительно важно для физики элементарных частиц, астрофизики и космологии;
- измерение корреляционных констант бета-распада нейтрона совместно с данными по времени жизни позволяет проверить справедливость так называемой Стандартной модели — наиболее общей принятой сегодня физической теории;
- поиск электрического дипольного момента нейтрона является наиболее чувствительным тестом инвариантности физических законов по отношению к обращению времени;
- именно во взаимодействии нейтронов с веществом было открыто нарушение закона сохранения пространственной четности (неэквивалентность левого и правого) в ядерных взаимодействиях.

Нельзя не отнести к фундаментальной науке и ряд результатов, полученных при изучении конденсированных сред:

- создание теории рассеяния поляризованных нейтронов;
- получение новых данных о критических явлениях вблизи магнитных фазовых переходов;
- экспериментальное доказательство существования новых киральных классов универсальности;
- теоретическое обоснование и экспериментальное обнаружение взаимодействия спинов через их квантовые флуктуации.

Этот список легко может быть продолжен, так как он включает в себя только работы сотрудников Петербургского института ядерной физики (ПЯФ) РАН.

Что касается прикладных исследований, то для примера можно привести лишь несколько областей применения нейтронного излучения.

Наноматериалы. Нейтронное излучение позволяет получать информацию о магнитной и молекулярной структуре наночастиц и нанокластеров, включая молекулярные магниты, эффективные катализаторы, фуллерены и металлофуллерены.

Водородная энергетика. Благодаря высокой чувствительности нейтронов к легким атомам (таким как водород) нейтронное излучение позволяет ис-

следовать структуру водородных топливных элементов и их поведение при многократном использовании (циклировании).

Магнитная электроника. Наличие у нейтронов магнитного момента позволяет их использовать при исследовании магнитных материалов, сверхпроводников, магнеторезисторов и т. д.

Материаловедение. Высокая проникающая способность нейтронов дает возможность использовать нейтронное излучение для определения (без разрушения конструкций) упругих напряжений в деталях, обнаруживать дефекты на первой стадии их зарождения. Это особенно важно для конструкций, работающих в экстремальных условиях.

Биотехнологии. Зарядовая нейтральность нейтронов и их избирательная чувствительность к изотопному составу дают возможность локализовать атомы водорода (дейтерия), кислорода и углерода в органических молекулах белков и их биологически активных производных, что крайне важно при разработке лекарственных препаратов.

К этому надо добавить традиционно используемые методы производства радиоизотопов, нейтрон-активационного анализа, нейтронной терапии рака и др.

Выше была сделана попытка показать, зачем нужны нейтроны. А теперь несколько слов о том, что нужно для того, чтобы реализовать их возможности.

Нужны современные источники нейтронного излучения и экспериментальные установки, работающие на выведенных пучках. Несомненно, это дорогое "удовольствие". Скажем, вполне современный, хотя и не лучший в мире, реактор в г. Мюнхене (Германия), только что введенный в строй, стоил (без приборной базы) около $600 \cdot 10^6$ \$.

Но любая страна, претендующая на роль цивилизованной, не говоря уж о статусе "великой державы", должна понимать, что у нее нет будущего без современной науки и развитых высоких технологий. И в мире это понимают.

Только за последние 15 лет новые исследовательские реакторы, являющиеся источниками нейтронов, построены в Германии, Японии, Корее, Египте, реконструированы реакторы во Франции, США, Венгрии и Польше, строятся в Китае, Аргентине и Канаде. В России же с конца 60-х годов прошлого столетия новые исследовательские пучковые реакторы в строй не вводились, а из построенных в Советском Союзе на рубеже 50-х — 60-х годов полутора десятков среднепоточных реакторов осталось на территории РФ лишь четыре реактора средней мощности (10—15 МВт) со средним потоком, пригодным для работы на выведенных пучках. Да и те за прошедшие годы физически и морально устарели. Исключением является лишь один — реактор ИБР-2 в г. Дубне (ОИЯИ). Это ре-



Рис. 1. Общий вид Петербургского института ядерной физики

актор современного уровня, вполне соответствующий решению целого ряда задач. Но это — импульсный источник средней мощности 2 МВт, что, конечно, мало для широкого круга исследований, требующих набора большой статистики.

Единственный сильно продвинутый в реализации проект — это проект высокопоточного реактора ПИК, строящегося на площадке ПИЯФ РАН (рис. 1—3).

Параметры реактора ПИК при полной реализации проекта не уступают (а по некоторым позициям даже превосходят) лучший исследовательский реактор HFR, работающий в Международном институте Лауэ-Ланжевена (Гренобль, Франция):

- проектная мощность — 100 МВт;
- поток тепловых нейтронов в отражателе — свыше 10^{15} н/(см²·с) (что на порядок больше, чем у ныне действующих), а в центральной водной части $\sim 4,5 \cdot 10^{15}$ н/(см²·с) (рекордная цифра);
- 10 горизонтальных, 6 наклонных и 6 вертикальных каналов для вывода пучков и облучения образцов позволяют разместить до 50 экспериментальных установок, работающих одновременно.



Рис. 2. Пульт управления ПИЯФ



Рис. 3. Экспериментальный зал горизонтальных пучков ПИЯФ

Реактор должен быть оснащен источниками горячих, холодных и ультрахолодных нейтронов, относящихся к разным частям энергетического спектра.

Все это при вводе реактора в строй даст возможность не только удовлетворить потребности в нейтронах всех заинтересованных потребителей в России, но и организовать на его основе Международный центр нейтронных исследований, заинтересованность в работе на котором не раз заявляли наши зарубежные коллеги.

На сегодня реактор готов на 85 %. Стоимость оставшихся до физического пуска работ оценивается в сумму меньше 1 млрд руб. плюс ~750 млн руб. для вывода его на проектную мощность. И это при уже вложенных в строительство средствах, эквивалентных ~200 млн долл. США. Казалось, еще немного, еще чуть-чуть. Но... Вспомним историю строительства.

Первое Постановление ЦК КПСС и СМ СССР вышло в 1969 г. Начали строительство в 1976 г., когда реактор в Гренобле, спроектированный практически одновременно с нашим, уже был пущен. Строили темпами, отнюдь, не адекватными поставленной задаче (см. график финансирования по годам, рис. 4). Максимум финансирования пришелся на 1988—1991 годы, когда Н. И. Рыжков, в то время возглавлявший Правительство, приказал прекратить это "безобразие" и завершить работы в ближайшие 3—4 года. А дальше — падение финансирования почти до нуля. Так продолжалось до конца 1998 г., когда Минатом России, понимая неспособность Академии, строившей объект, довести его до конца, принял решение взять на себя финансирование почти половины оставшегося объема работ. Это спасло объект от полного закрытия.

Российская академия наук, Минатом и Минобрнауки России, признав приоритетное значение реакторного комплекса ПИК, подписали Совместное решение о финансировании, поставив целью ввод реактора в строй в 2001 г. и организацию на



Рис. 4. Диаграмма финансирования строительства ПИЯФ по годам

его основе Международного центра нейтронных исследований.

Решение-то приняли, но оказалось, что в условиях безудержного роста цен на оборудование и спецматериалы для объектов атомной сферы собственных средств этих ведомств недостаточно для достижения поставленных целей.

Многочисленные резолюции и заключения научных форумов, советов, комитетов о необходимости ввода в строй реактора, многократные обращения в Правительство и издаваемые по этим обращениям Правительственные поручения Председателя Правительства и его замов — "помочь, рассмотреть, подготовить совместные предложения", как и поддержка обращений со стороны руководства профильных министерств и ведомств неизбежно давали нулевой результат.

Можно привести последний пример. В июне—июле 2004 г. губернатор Ленинградской области В. П. Сердюков и Председатель Совета Федерации С. М. Миронов почти одновременно обратились к Председателю Правительства М. Е. Фрадкову с просьбой о выделении из Федерального бюджета в течение 2004—2006 гг. 300 млн. рублей ежегодно для завершения работ по сооружению реактора ПИК. М. Е. Фрадков подписал соответствующее Правительственное поручение. Академия, Федеральное агентство по атомной энергии, Федеральное агентство по науке и инновациям России (уже не в первый раз) поддержали это предложение, на основании чего Минобрнауки России, которому поручалось выработать совместные предложения, подало в Минфин России заявку на дополнительное выделение запрашиваемых средств. Об этом и были поставлены в известность и В. П. Сердюков, и С. М. Миронов и, по-видимому, М. Е. Фрадков.

А через несколько дней Межведомственная комиссия по подготовке проекта бюджета-2005 эту заявку не приняла! Но об этом уже не информиро-

вали ни В. П. Сердюкова, ни С. М. Миронова (про М. Е. Фрадкова — неизвестно).

На этом примере отчетливо видно, кто у нас принимает решения о развитии науки.

А в результате? При установившемся в последние три года финансировании в размере ~200 млн руб./год со стороны Академии, Минатома и Минпромнауки России реактору ПИК до пуска осталось пять лет (и это в случае, если указанные три ведомства смогут сохранить выделение средств на прежнем уровне). Однако, может оказаться, что к этому времени на реакторе некому уже будет работать. Сегодня лучшие наработки, которые имеют наши ученые, они реализуют на зарубежных реакторах, в основном в Институте Лауэ-Ланжевена (ИЛЛ), где за нашу работу рассчитывается высокообогащенным ураном бывший Минатом России. Но в 2006 г. Соглашение ИЛЛ—Минатом заканчивается, и возобновлять его Агентство по атомной энергии не планирует.

Казалось бы, в этих условиях задача скорейшего ввода в строй реактора ПИК становится еще более актуальной. Но нет, вместо этого власть создает на этом пути новые препятствия. Федеральным законом о бюджете на 2004 г. (статья 129) введено новое ограничение: "финансирование одной стройки или объекта за счет нескольких разделов функциональной классификации расходов бюджетов Российской Федерации не допускается".

Для нас это означает, что Агентство по атомной энергии России не имеет права финансировать строительство ПИК — объекта Российской академии наук. А это потеря 100 млн руб./год, а значит надо "поставить крест" на комплексе ПИК.

Что необходимо сделать для того, чтобы положить конец этому беспрецедентному (во всяком случае, в науке) долгострою?

Надо добиться существенного (до 400—450 млн руб./год) увеличения целевого финансирования из Федерального бюджета на завершение строительства комплекса. Производственные возможности для освоения таких ассигнований у организаций, строящих объект, имеются. По-видимому, было бы целесообразно издать специальное Постановление Правительства, регламентирующее создание и деятельность этого центра коллективного пользования.

В этом случае было бы возможно использовать средства, выделяемые Академией, Росатомом и Роснаукой России на создание современной приборной базы, которая дорого стоит.

Но если указанные выше суммы не могут быть выделены в полном объеме, то тогда необходимо хотя бы отменить ограничение, наложенное статьей 129 ФЗ "О Федеральном бюджете 2004 года", запрещающее финансирование одной стройки разными ведомствами.

УДК 621.3.049

Ю. А. Чаплыгин, чл.-корр. РАН,
ректор МИЭТ

ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И ПРОИЗВОДСТВА НАНОСТРУКТУР*

Рассматриваются особенности подготовки специалистов по нанотехнологии в Российской Федерации.

Вузовское сообщество, прекрасно понимая важность и перспективность развития нанотехнологии во всем мире и в России, приблизительно два с половиной года назад вышло с инициативой создания и открытия подготовки по специальности "Нанотехнология" [1]. С осени 2002 г. группа вузов, среди которых были МИЭТ, МИСИС, ЛЭТИ, МХТУ им. Д. И. Менделеева, НГУ и другие, начали работать над созданием государственного образовательного стандарта по подготовке специалистов в области нанотехнологии. Работа велась по открытию двух специальностей: "Нанотехнологии в электронике" и "Наноматериалы". В июне 2003 г. вышел приказ Министерства образования об открытии подготовки специалистов в области нанотехнологий. Было создано соответствующее учебно-методическое объединение (УМО). Учебно-методический совет в рамках УМО работает на базе ЛЭТИ, возглавляет его академик Ж. И. Алферов, созданы две учебно-методические комиссии по нанотехнологиям в электронике (базовый вуз МИЭТ) и по наноматериалам (базовый вуз МИСИС).

В настоящее время организована подготовка по специальности "Нанотехнологии в электронике" в вузах Москвы, Санкт-Петербурга, Северного Кавказа, Новосибирска, Нижнего Новгорода, Воронежа и Саратова (всего в 12 вузах).

По наноматериалам ведут подготовку лишь семь вузов (московские вузы и Санкт-Петербургский государственный политехнический университет).

* Статья подготовлена на основании стенограммы совещания Межфракционного депутатского объединения "Наука и высокие технологии" совместно с Комитетом по образованию и науке, Комитетом по промышленности, строительству и наукоемким технологиям и Комитетом по энергетике, транспорту и связи на тему: "Нанотехнологии — проблемы развития и подготовки кадров" в Государственной Думе 26 октября 2004 г. под председательством лауреата Нобелевской премии академика Ж. И. Алферова. Стенограмма подготовлена и представлена В. И. Бабиным.

В 2004 г. вышел приказ Министерства образования и науки по открытию двухступенчатой подготовки специалистов в области нанотехнологии по системе бакалавр-магистр. В соответствии с этим приказом такая подготовка предусматривается в 19 вузах.

Подготовка специалистов по нанотехнологии должна быть фундаментальной, основанной на компьютерных технологиях и информатике. Особенностью учебных планов и стандартов является их междисциплинарность — специфический набор физических, химических, материаловедческих и биомедицинских дисциплин. Естественно, невозможно в данной области подготовить специалиста без тесной связи с научными исследованиями.

Несмотря на то, что высшая школа и научные организации переживали сложный период, связанный с недофинансированием, ведущие университеты, в какой-то мере, удавалось оснащать уникальным оборудованием.

В вузах России были созданы центры коллективного пользования. Так, МИСИС обладает уникальным технологическим и исследовательским оборудованием, которое успешно используется как для проведения научных исследований, так и для подготовки специалистов по наноматериалам.

В Московском институте электронной техники (МИЭТ) создан центр коллективного пользования "Нанотехнологии в электронике". Центр имеет достаточно уникальное оборудование, включая молекулярно-лучевую эпитаксию, установки плазмохимического травления, установки нанесения тонких слоев с наноразмерными толщинами, туннельные зондовые микроскопы, разработанные НТ-МДТ (рис. 1) и т. д.

Для концентрации исследований в МИЭТе был организован факультет нанотехнологии, который объединил 11 научных подразделений. Это подтверждает тезис о том, что учебный процесс в этом направлении невозможен без научных исследований.

Впервые в России в лаборатории были получены сначала диодные структуры, потом транзисторные структуры на углеродных нанотрубках [2]. Топология логического ключа выполняется на одном кристалле, где область транзистора включает в себя сетку из пучков углеводородных нанотрубок, т. е. речь идет об углеродной наноэлектронике (рис. 2).

Ведутся работы по наноструктурам на основе пористых материалов (рис. 3). Это в основном анодно-окисленный алюминий, а также оксид магния и титана. Эти структуры могут использоваться для создания терабитных ЗУ, автономных катодов.

В МИЭТ ведутся работы в области фотоники на наноразмерных структурах с использованием уникального оборудования. К этим работам удалось



Рис. 1. Центр коллективного пользования "Нанотехнологии в электронике" МИЭТ

привлечь капитал из Юго-Восточной Азии, поэтому ряд установок является уникальным не только для России, но и для Европы.

Следует отметить, что Государственная Дума должна обсуждать те проблемы, которые стоят в образовании и в науке и связаны в данном случае с нанотехнологиями. Проблема профессора, доцента и преподавателя не менее важна, чем проблема учителя. Необходимо вспомнить о том, сколько у нас получает профессор, доцент и преподаватель, т. е. кадровая проблема, естественно, существует и будет существовать, пока разрыв в оплате труда между работниками приблизительно одной квалификации в России и на Западе составляет примерно полтора порядка.

Несмотря на то, что материально-техническое обеспечение учебного процесса в области нанотехнологии в ряде вузов (МИСИС, МИЭТ, Нижегородский государственный университет, ЛЭТИ, РХТУ имени Д. И. Менделеева и т. д.) имеет

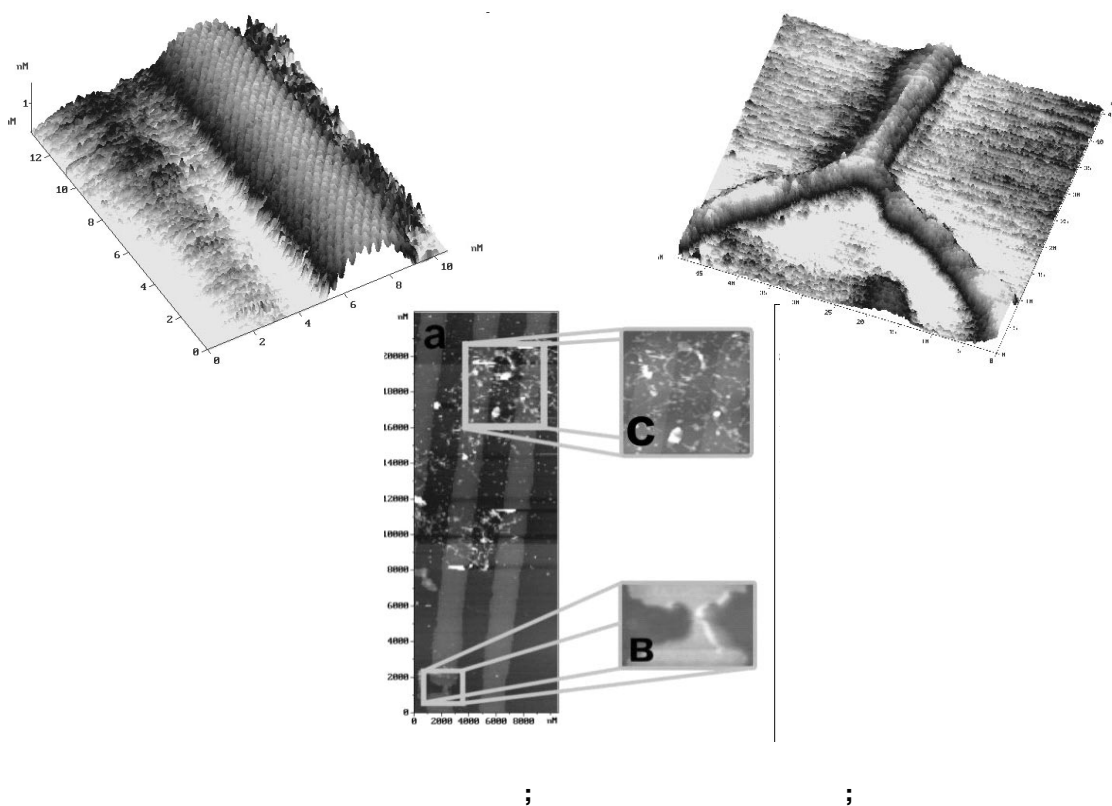


Рис. 2. Углеродная нанoeлектроника

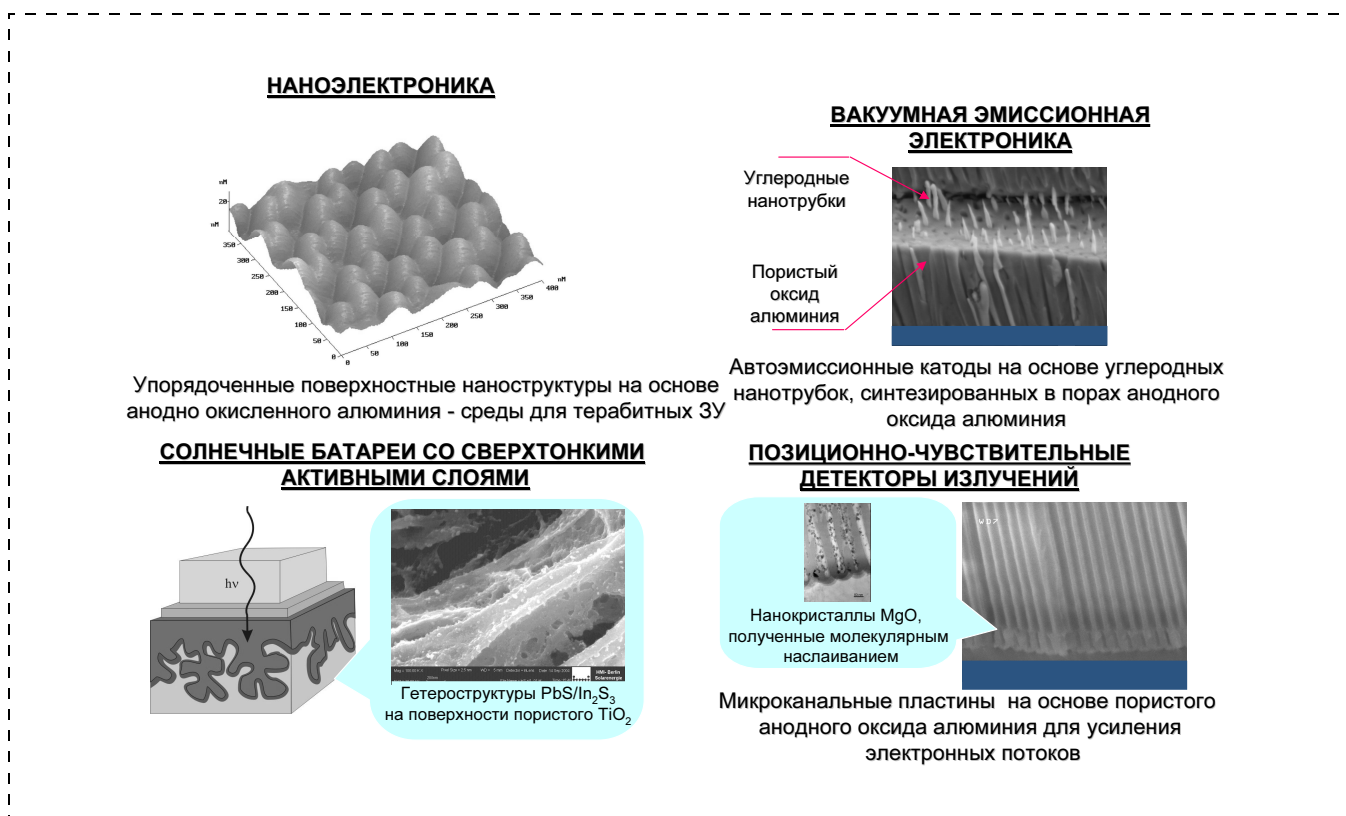


Рис. 3. Наноструктуры на основе пористых материалов

достаточно высокий уровень, тем не менее, проблемы материально-технического обеспечения учебного процесса стоят очень остро. И хотя вряд ли появятся какие-то новые деньги, но в рамках Федеральной программы "Развитие образования" можно было бы выделить специальный раздел для финансирования подготовки специалистов в области нанотехнологий — как один из приоритетных.

Наконец, следует сказать о законе № 122, который был принят Законодательным Собранием в августе 2004 г. В основном средства массовой информации преподносили как закон о льготах, но на самом деле этот закон сильно изменил законодательную базу науки и образования. Можно привести один пример. Государственный стандарт высшего профессионального образования включает в себя два компонента: федеральный и национально-региональный (раньше он назывался вузовским). Дисциплины федерального компонента составляют приблизительно 70 %, а дисциплины национально-региональные — 30 %, причем национально-региональные компоненты государственных образовательных стандартов определяются высшими учебными заведениями по инициативе органа исполнительной власти субъектов Российской Федерации. Когда речь идет о нанотехноло-

гии, машиностроении, энергетике и т. д., такая формулировка несколько сомнительна.

Дисциплины национально-региональные выполняются на договорной основе соответствующими органами исполнительной власти субъекта Российской Федерации, т. е. 70 % учебного плана будет финансироваться федеральной властью, а 30 % в такой формулировке никем не будут финансироваться, потому что местные власти не будут финансировать этот национально-региональный компонент по нанотехнологии и другим высоким технологиям и техническим специальностям.

В заключение заметим, что вузы в общем-то готовы и в кадровом, и в материально-техническом обеспечении в определенной степени вести подготовку по нанотехнологиям, но при наличии недофинансирования, о чем уже говорилось, делать это будет очень трудно.

Список литературы

1. Развитие в России работ в области нанотехнологий / С. М. Алфимов, В. А. Быков, Е. П. Гребенников, С. И. Желудев, П. П. Мальцев, В. Ф. Петрунин, Ю. А. Чаплыгин // Микросистемная техника. 2004. № 8. С. 2—8.
2. Бобринецкий И. И., Неволлин В. К., Чаплыгин Ю. А. Логические ключи на основе пучков однослойных углеродных нанотрубок // Микросистемная техника. 2004. № 7. С. 12—14.

УДК 621.3.049

В. А. Быков, д-р техн. наук, проф.,
Генеральный директор НТ-МДТ, Зеленоград (г. Москва)

РАЗВИТИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БАЗЫ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ В ЗЕЛЕНГРАДЕ*

Рассматриваются вопросы разработки и производства сканирующих зондовых микроскопов и сопутствующего оборудования для нанотехнологий.

В настоящее время в Зеленограде развивается достаточно большая группа предприятий на базе НТ-МДТ, которую мы создали для бизнеса в направлении разработки и производства сканирующих зондовых микроскопов и сопутствующего оборудования для нанотехнологий [1].

В настоящее время на этих предприятиях в Зеленограде работает около 250 человек. Приборы продаются более чем в 30 странах. В 20 странах у нас есть представительства. И в 150 центрах в России тоже работают наши приборы (см. рисунок).

В результате того, что мы получили определенную поддержку со стороны Министерства науки и образования по мегапроекту [2], нам удалось разработать в настоящее время новые линии, так называемые нанолaborатории, на которых можно делать и фотолитографии, и работать во многих других режимах.

Мы продвинулись и дальше. Наши приборы, вообще говоря, лучшие на рынке. И мы сейчас достаточно успешно действуем, выигрывая тендеры и в Европе, и в Азии, и в Соединенных Штатах.

* Статья подготовлена на основании стенограммы совещания Межфракционного депутатского объединения "Наука и высокие технологии" совместно с Комитетом по образованию и науке, Комитетом по промышленности, строительству и наукоемким технологиям и Комитетом по энергетике, транспорту и связи на тему: "Нанотехнологии — проблемы развития и подготовки кадров" в здании Государственной Думы 26 октября 2004 г. под председательством лауреата Нобелевской премии академика Ж. И. Алферова. Стенограмма подготовлена и представлена В. И. Бабкиным.

Очень приличный спрос на приборы и в России.

Логика подсказывает, что необходимо дальнейшее развитие. Сканирующие зондовые микроскопы — это хорошо. Они многое могут, но далеко не все. И для того, чтобы действительно работать интенсивно и плодотворно в области нанотехнологий, необходимы более мощные инструменты, которые включают в себя и возможности электронной микроскопии, и так называемой техники сфокусированных ионных пучков.

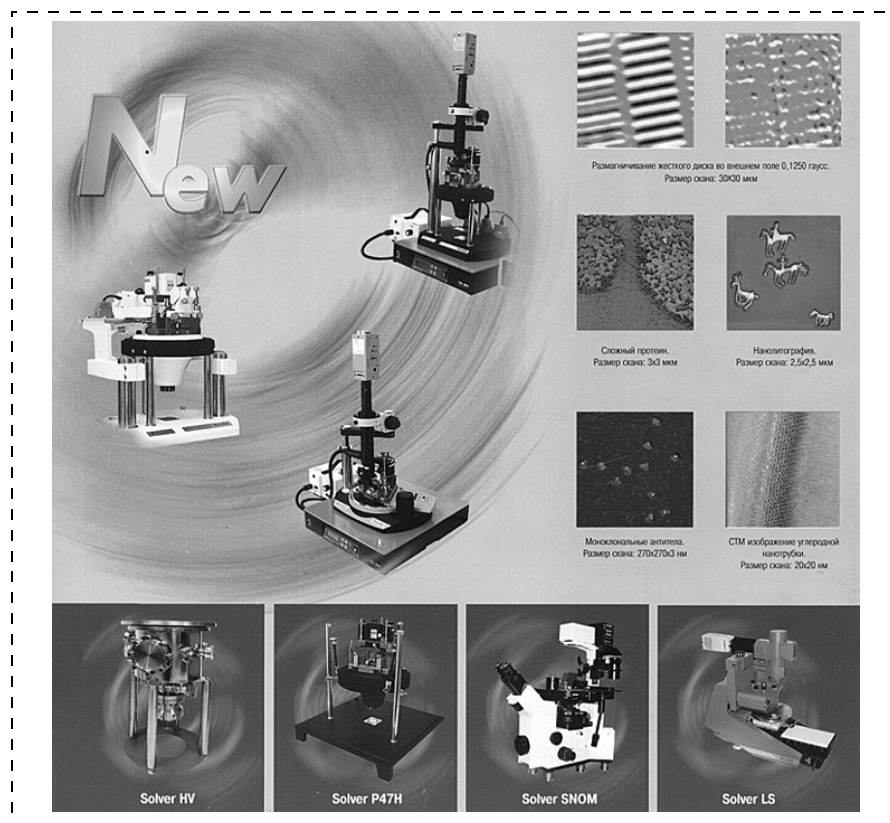
В настоящее время в кооперации с целым рядом компаний, одна из которых — это в прошлом

"Филипс", мы развиваем нанотехнологические кластеры.

Сейчас создан прибор и для системы образования. Многое сделано, но развиваются у нас в России и центры нанотехнологий, и обучающие центры, а это требует следующего шага, т. е. перехода к промышленности. И в настоящее время условия для развития у нас есть.

Конечно, если рассматривать весь производственный цикл, то его организовать для массового производства в настоящее время нельзя, это очень дорого и долго. Но можно производить приборы как раз те, которые мы сейчас производим и продаем, используя возможности открытой системы, когда мы можем задействовать производственные мощности не только свои, но и Сингапура, Тайваня, центров нанотехнологий в Европе.

Внедряя у себя технологии по разработке интегральных схем и корпусирования этих интегральных схем, и выпуска аппаратуры



Сканирующие зондовые микроскопы производства НТ-МДТ

на основе модулей, которые сделаны по нашим технологиям, мы можем получить деньги за эти самые модули. Вот тогда можно действительно развить по-настоящему те проекты, что мы делаем.

В этом случае такая технология будет востребована страной, и будут оправданы вложения в нее. И я думаю, это приведет к тому, что эта отрасль будет нормально поставлена для производства.

В настоящее время мы работаем в данном направлении очень интенсивно. Формируем группу предприятий из четырех направлений. В настоящее время разрабатываем бизнес-планы по их развитию. Одно из них — связано с машиностроением, другое — с элементной базой, где мы предполагаем тесную кооперацию наших предприятий с дизайн-цент-

рами, которые в настоящее время есть. Предприятие, которое должно занять наиболее сильное положение на рынке, связано с разработкой и производством аппаратуры.

В настоящее время зачаток таких групп предприятий уже есть. Они действуют достаточно успешно на рынке медицинского приборостроения. Возникает интересный вопрос. А вообще, существует ли рынок внутри России, который бы сделал эту технику рентабельной, есть ли деньги? Если посмотреть на Россию в целом, это сложный вопрос, и это вопрос нашего законодательства. Но если посмотреть хотя бы на такой регион, как Ханты-Мансийск, то оказывается, что там вкладывается в настоящее время в закупку приборов более ста миллионов долларов в год.

Это уже достаточно приличные деньги. Они идут в чистом виде на финансирование высоких технологий, только не у нас в стране, а за рубежом. Поэтому создание таких групп предприятий, на мой взгляд, это ключевой вопрос развития. И самый большой вопрос — в недостатке денег. Вопрос самый главный в таких проектах — рентабельность, которую можно было бы все-таки разглядеть с относительно близкого временного расстояния, т. е. через 2—3 года.

Список литературы

1. Быков В. А. Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 21—33.
2. Алфимов С. М., Быков В. А., Гребенников Е. П., Желудева С. И., Мальцев П. П., Петрунин В. Ф., Чаплыгин Ю. А. Развитие в России работ в области нанотехнологий // Микросистемная техника. 2004. № 8. С. 2—8.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 621.385.833

А. И. Аксенов, И. И. Бобринский, канд. техн. наук,
В. К. Неволин, д-р физ.-мат. наук, проф.,
М. М. Симунин,
Московский государственный институт
электронной техники (технический университет),
vkn@miee.ru

ХИМИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ПУЧКОВ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ НИЗКИХ КОНЦЕНТРАЦИЙ МОЛЕКУЛ ХЛОРА В АТМОСФЕРЕ

Исследованы электрические характеристики структур на основе пучков углеродных нанотрубок в атмосфере, содержащей молекулы хлора. Показано, что проводимость структур увеличивается больше чем на порядок при изменении концентрации хлора на 0,5 ppm.

Введение

Работа сорбционного химического сенсора основана на зависимости оптических, электрофизи-

ческих, магнитных, массовых и температурных параметров вещества от присутствия в нем адсорбата. Такие приборы являются перспективными объектами для контроля состава окружающей среды, благодаря низкой потребляемой энергии и малой поверхностной площади активной области [1, 2]. Сорбционные химические сенсоры позволяют определять присутствие в воздухе паров летучих компонентов органических веществ, биологически активных и инертных газов.

Активный преобразователь данного элемента должен удовлетворять ряду требований: занимать по возможности меньшую площадь; потреблять небольшое количество энергии; быть совместимым с технологией традиционной микроэлектроники. Наиболее приемлемыми в качестве потребителей меньшей энергии являются сенсоры, основанные на изменении под действием внешнего химического поля емкости [3] или проводимости [4, 5]. Вместе с тем, чувствительный элемент должен обеспечивать заметное изменение характеристик при незначительных вариациях концентрации детектируемого вещества.

Одним из возможных материалов для создания

химических сенсоров могут являться углеродные нанотрубки. Благодаря малым размерам (порядка 1 нм в диаметре и нескольких микрометров в длину), полый структуре и уникальным электрическим свойствам, они являются наиболее предпочтительным материалом для адсорбции газов [6, 7]. Результаты ряда теоретических работ и экспериментальных исследований демонстрируют, что в проводимости однослойные углеродные нанотрубки проявляют электрические свойства идеальных одномерных проводников [8, 9]. Более того, проводимость нанотрубок определяется окружающей их средой. Например, в нормальных условиях нанотрубки имеют *p*-тип проводимости, что обуславливается присутствием на их поверхности молекул кислорода [10].

Ранее были продемонстрированы возможности по созданию транзисторов и логических элементов на основе отдельных полупроводниковых углеродных нанотрубок [11, 12], и сеток, состоящих из пучков однослойных углеродных нанотрубок [13, 14]. Использование сеток из пучков однослойных углеродных нанотрубок позволяет разработать методику массового создания химических сорбционных сенсоров с заданными технологическими параметрами.

В данной работе изучаются статические электрические характеристики структур на основе пучков углеродных нанотрубок в хлорсодержащей атмосфере с опосредованным контролем концентрации.

Структура на основе сеток из пучков углеродных нанотрубок

В работе для измерения электрических характеристик структур на основе углеродных нанотрубок был использован четырехзондовый держатель образцов с вольфрамовыми иглами. Контакт осуществлялся с золотыми электродами площадью $150 \times 300 \text{ мкм}^2$.

В качестве материала тонких электродов был выбран графитизированный углерод с удельным сопротивлением $3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, нанесенный методом магнетронного распыления. Расстояние между тонкими электродами варьировалось от 1 до 2 мкм [15]. Высоколегированная кремниевая подложка, отделенная от электродов термически выращенным оксидом кремния, использовалась в качестве затвора для исследования полевого эффекта в проводимости структур на основе углеродных нанотрубок.

Однослойные нанотрубки наносились на тонкие электроды из раствора в 2-пропанол, предварительно подвергнутого ультразвуковой обработке в течение нескольких часов. Образцы структур на основе углеродных нанотрубок исследовались с использованием атомно-силового микроскопа [16].



Рис. 1. Вид тестового кристалла с контактными площадками. На вставке: атомно-силовое изображение участка тонких электродов с лежащим на них пучком нанотрубок

Было обнаружено, что на электродах нанотрубки оседают в виде отдельных пучков или их небольших скоплений (рис. 1). Средний диаметр пучков равен 10–15 нм, что соответствует примерно 100–200 нанотрубкам в одном пучке.

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной лабораторной установки по исследованию чувствительности структур на основе пучков углеродных нанотрубок приведена на рис. 2. Установка представляет собой сосуд, в котором находится образец со структурой на

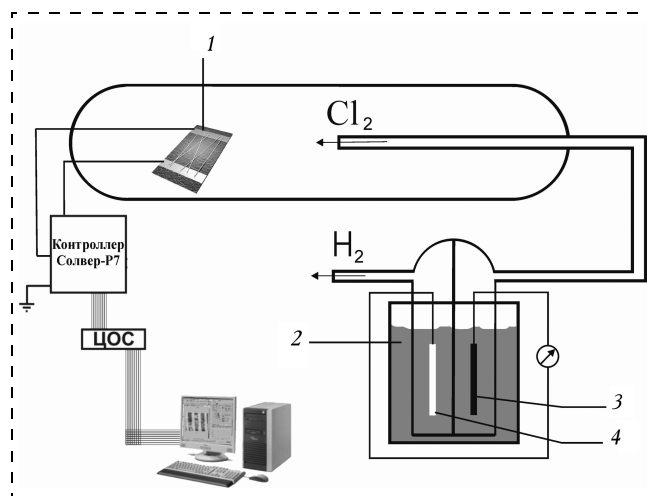
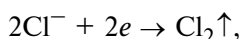


Рис. 2. Схема установки по измерению электрических свойств структур на основе нанотрубок в хлорсодержащей атмосфере:

1 — структура с пучками нанотрубок; 2 — раствор NaCl; 3, 4 — графитовый и медный электроды соответственно

основе нанотрубок 1. В сосуд диффузионно подается хлор напрямую — из установки его получения.

В большинстве работ по исследованию влияния газов, в том числе и с высокой электроотрицательностью (O_2 , кислородсодержащие газы) [17, 18], образцы с нанотрубками предварительно дегазируются до глубокого вакуума при поддержании постоянной температуры порядка 300 К, после чего в герметичную камеру происходит напуск исследуемого газа. Однако подобные "чистые" эксперименты не позволяют судить о степени чувствительности нанотрубок, находящихся в атмосферных условиях и покрытых слоем адсорбата воздуха [19]. В связи с этим, необходимо было обеспечить введение в атмосферу камеры газообразного хлора с концентрацией, меньшей предельно допустимой ($ПДК_{Cl} = 10^{-3}$ мг/л). В работе данное условие было реализовано непосредственным введением в камеру молекул Cl_2 при электролизе водного раствора хлорида натрия 2. Реакция электролиза на аноде проходила по стандартной формуле



и при разности потенциалов между анодом 4 и катодом 3 5 В ток электролиза был равен 1 А.

Измерение статических электрических характеристик структур на основе углеродных нанотрубок проводилось с использованием контроллера Солвер-Р47. Приложение потенциала к затвору (подложке) (см. рис. 2) обнаружило в большинстве случаев наличие слабой модуляции проводимости структур, что свидетельствует о доминирующей роли в переносе заряда углеродных нанотрубок полупроводникового типа с присутствием значительной части нанотрубок с металлической проводимостью.

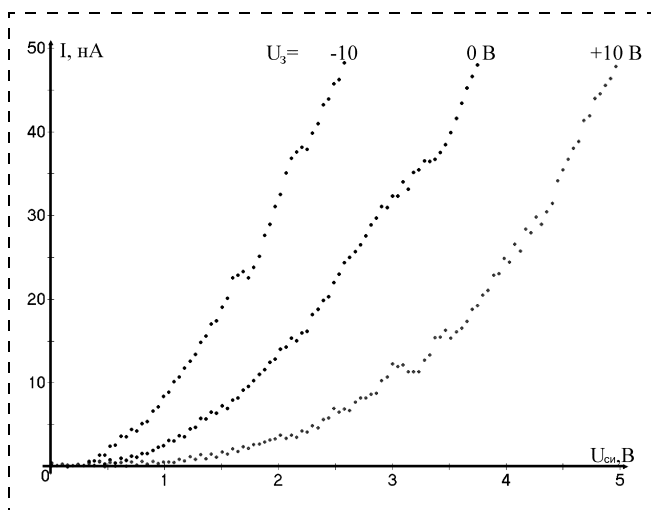


Рис. 3. Выходные характеристики структуры на основе пучков углеродных нанотрубок для трех значений потенциала на затворе

После размещения кристалла в камере с атмосферным давлением проводилась электролитическая реакция в течение 10 мин. При этом происходило нелинейное изменение проводимости структуры с углеродными нанотрубками при постоянном смещении напряжения между стоком и истоком 2 В (рис. 3). Заметный рост проводимости наблюдался в момент времени $t = 280$ с с углом наклона $0,3 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1}/\text{с}$.

Определить количество выделившегося хлора за время проведения эксперимента можно, используя закон Фарадея изменения массы вещества, выделившегося на электроде при прохождении тока по раствору электролита. Согласно данному закону на графитовом катоде должно выделяться количество хлора по массе равное 200 мг. Однако не вся масса полученного таким образом хлора поступает в камеру с измерительной схемой: происходит его растворение в электролите в виде молекулярного хлора, а также в виде соединений анионов хлора с гидроксильными группами, катионами натрия и водорода. В связи с этим количество хлора, выделившегося непосредственно в области вблизи исследуемой структуры, определялось косвенными методами. Было получено, что за время 600 с может быть введен газообразный хлор с концентрацией 2 мкг/л (0,5 ppm).

Результаты и их обсуждение

Было обнаружено увеличение проводимости в 12 раз за период времени 600 с (рис. 4), что соответствует увеличению концентрации основных носителей заряда в структуре на основе пучков нанотрубок с полупроводниковым типом проводимости. Так как изначально нанотрубки имели p -тип проводимости [20] и роль акцептора в атмосфер-

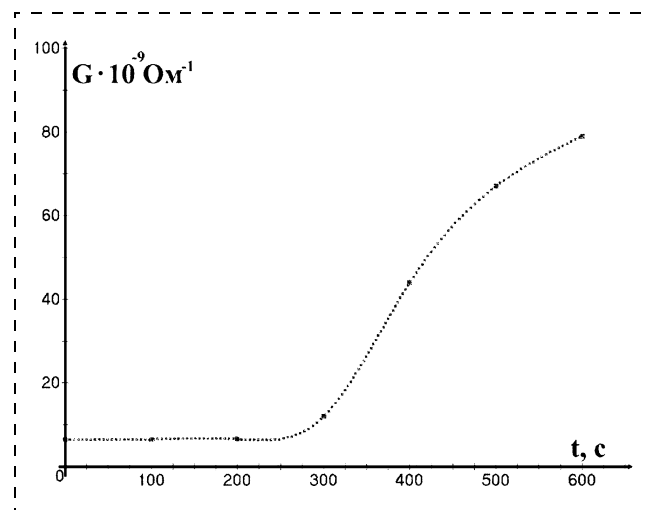


Рис. 4. Изменение проводимости структур на основе пучков углеродных нанотрубок с увеличением концентрации хлора в камере

ных условиях предположительно выполняют молекулы кислорода [10], то можно говорить о дополнительном допировании нанотрубок молекулами хлора. Теоретические оценки для однослойных нанотрубок [21] показывают, что наиболее энергетически выгодным является расположение адсорбированных атомов Cl и O над атомами углерода в нанотрубке с энергиями сорбции 6,9 и 4,9 эВ соответственно. Так как хлор обладает большей электроотрицательностью, чем кислород, то он может замещать кислород в местах его присутствия на нанотрубках. После прекращения процесса электролиза и извлечения образца из камеры происходило возвращение электрических характеристик структур к исходным значениям в течение 1–2 мин.

В дополнение был проведен аналогичный эксперимент с измерением электрических характеристик структур на основе многослойных углеродных нанотрубок, которые обладали проводимостью металлического типа с характерным значением 10^{-6} Ом^{-1} . Структуры помещали в камеру, и за аналогичный период времени и тех же параметрах электролиза было замечено необратимое увеличение проводимости в 1,5 раза.

Задержка в отклике проводимости структур на основе углеродных нанотрубок при увеличении концентрации хлора в камере может быть связана как с пределом чувствительности нанотрубок к хлору вследствие насыщенности поверхностных состояний атомами кислорода, так и с диффузионными процессами, проходящими в адсорбате, окружающем пучки нанотрубок в атмосферных условиях, либо с особенностями измерительной установки.

Таким образом, в работе было продемонстрировано значительное (больше, чем на один порядок) изменение проводимости структур на основе пучков углеродных нанотрубок полупроводникового типа при изменении концентрации хлора в атмосфере на 0,5 ppm. Дальнейшая отработка методик высаживания сеток нанотрубок, равномерно распределенных на больших поверхностях, и функционализация в них нанотрубок полупроводникового типа позволит реализовать микросенсоры с высокой чувствительностью к присутствию молекул химически активных газов в атмосфере.

Работа выполнена при поддержке гранта Москвы по разделу "Инфраструктура и адресная поддержка науки" Программы развития науки и технологий в интересах города Москвы 2005 года (грант № 1.1.100).

Список литературы

1. Li J. R., Xu J. R., Zhang M. Q., Ronga M. Z. Carbon black/polystyrene composites as candidates for gas sensing materials // Carbon. 2003. V. 41. N. 12. P. 2353–2360.

2. Соборовер Э. И., Ткаченко С. В. Химические сенсоры на поверхностно-акустических волнах для мультисенсорной системы атмосферного мониторинга // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 1. С. 18–22.
3. Patel S. V., Mlsna T. E., Fruhberger B. et al. Chemicapacitive microsensors for volatile organic compound detection // Sensors and Actuators B: Chemical. 2003. V. 96. N. 3. P. 541–553.
4. Борсякова О. И., Рембеза Е. С., Рембеза С. И., Свиствова Т. В. Свойства нанокристаллических пленок SnO_2 для датчиков газов // Микросистемная техника. 2001. № 7. С. 14–18.
5. Eastman M. P., Hughes R. C., Yelton G. et al. Application of the solubility parameter concept to the design of chemiresistor arrays // Journal of The Electrochemical Society. 1999. V. 146. N. 10. P. 3907–3913.
6. Dillon A. C., Jones K. M., Bekkedahl T. A. et al. Storage of hydrogen in single-walled carbon nanotubes // Nature. 1997. V. 386. N. 6623. P. 377–379.
7. Snow E. S., Novak J. P., Lay M. D. et al. Carbon nanotube networks: nanomaterial for macroelectronic applications // J. Vac. Sci. Technol. B. 2004. V. 22. N. 4. P. 1990–1994.
8. Frank S., Poncharal Ph., Wang A. Z. et al. Carbon nanotube quantum resistors // Science. 1998. V. 280. N. 5370. P. 1744–1746.
9. Sanvito S., Kwon Y.-K., Tománek D., Fractional C. J. Quantum conductance in carbon nanotubes // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. N. 9. P. 1974–1977.
10. Ulbricht H., Moos G., Hertel T. Interaction of molecular oxygen with single-wall carbon nanotube bundles and graphite // Surface Science. 2003. V. 532–535. P. 852–856.
11. Bachtold A., Hadley P., Nakanishi T., Dekker C. Logic circuits with carbon nanotube transistors // Science. 2001. V. 294. P. 1317–1320.
12. Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Строганов А. А., Чаплыгин Ю. А. Модуляция проводимости пучков однослойных углеродных нанотрубок // Микроэлектроника. 2004. № 5. С. 356–361.
13. Khakani M. A. El., Yi J. H. The nanostructure and electrical properties of SWNT bundle networks grown by an "all-laser" growth process for nanoelectronic device applications // Nanotechnology. 2004. V. 15. P. S534–S539.
14. Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Чаплыгин Ю. А. Логические ключи на основе пучков однослойных углеродных нанотрубок // Микросистемная техника. 2004. № 7. С. 12–14.
15. Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Петрик В. И., Чаплыгин Ю. А. Вольтамперные характеристики двухэлектродных элементов с углеродными нанотрубками // Микроэлектроника. 2003. Том. 32. № 2. С. 102–104.
16. Бобринецкий И. И., Неволин В. К. Микромеханика углеродных нанотрубок на подложках // Микросистемная техника. 2002. № 4. С. 20–21.
17. Collins Ph. G., Bradley K., Ishigami M., Zettl A. Extreme oxygen sensitivity of electronic properties of carbon nanotubes // Science. 2000. V. 287. N. 5459. P. 1800–1804.
18. Kong J., Franklin N. R., Zhou C. et al. Nanotube molecular wires as chemical sensors // Science. 2000. V. 287. N. 5453. P. 622–625.
19. Булатов А. Н., Хартов С. В. Исследование адсорбата воздуха на твердотельных подложках методами атомно-силовой микроскопии // Известия вузов. Электроника. 2004. № 4. С. 9–17.
20. Wildoer J. W. G., Venema L. C., Rinzler A. G. et al. Electronic structure of atomically resolved carbon nanotubes // Nature. 1998. V. 391. N. 6662. P. 59–62.
21. Запорожкова И. В., Литинский А. О., Чернозатонский Л. А. Особенности сорбции легких атомов на поверхности однослойного углеродного тубулена // Письма в ЖЭТФ. 1997. Том 66. Вып. 12. С. 799–804.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 681.7.069.3

А. Г. Козлов, канд. техн. наук, доц.,
Омский филиал Института физики
полупроводников СО РАН, г. Омск

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ МИКРОЭЛЕКТРОННОГО ТЕПЛОВОГО ПРИЕМНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ КОНСОЛЬНОГО ТИПА

Представлен аналитический метод, позволяющий моделировать нестационарный режим работы микроэлектронного теплового приемника излучения консольного типа. В структуре приемника излучения выделены две зоны с эквивалентными параметрами. Для каждой зоны получено нестационарное уравнение теплопроводности, которое решено с помощью интегрального преобразования Фурье по времени. Плотность теплового потока между зонами определена из условия сопряжения. Получено аналитическое выражение для комплексной частотной характеристики тепловой подсистемы приемника излучения. С помощью предложенного метода для конкретной конструкции микроэлектронного теплового приемника излучения определены частотные зависимости модуля и аргумента комплексной частотной характеристики его тепловой подсистемы и временные зависимости температуры горячих спаев термопар при ступенчатом, гармоническом и импульсном входных воздействиях.

Введение

Микроэлектронные тепловые приемники излучения широко используются в различных областях науки и техники для детектирования, измерения, наблюдения и контроля оптических, главным образом, инфракрасных излучений [1, 2]. Основными элементами этих приборов являются поглощающее покрытие и пленочный термоэлектрический преобразователь в виде батареи пленочных термопар, которые расположены на общем основании. Это основание называется термически изолированной структурой и изготавливается с использованием элементов микросистемной технологии (анизотропное травление кремния, травление скрытых слоев). При работе поглощающее покрытие преобразует энергию падающего излучения в тепловую энергию, которая повышает температуру основания в области расположения покрытия. Данное повышение температуры пропорционально

мощности падающего излучения и измеряется пленочным термоэлектрическим преобразователем. Таким образом, выходное напряжение приемника излучения также оказывается пропорциональным мощности падающего излучения. В настоящее время разработаны, исследованы и используются следующие типы микроэлектронных тепловых приемников излучения, которые отличаются геометрией термически изолированной структуры:

- с консольной структурой;
- с мостовой структурой;
- с крестообразной структурой (структура типа "четырёхплечий мост");
- с мембранной структурой.

В работах [3—12] предложены методы моделирования стационарного распределения температуры в микроэлектронных тепловых приемниках излучения. На основе этого моделирования можно определить статические характеристики разрабатываемых микроэлектронных тепловых приемников излучения. Однако при проектировании и эксплуатации приемников излучения кроме статических характеристик важно знать их динамические характеристики. Определение этих характеристик путем экспериментальных исследований требует больших затрат, связанных с изготовлением тепловых приемников излучения и проведением измерений, и неприемлемо на стадии их проектирования. Другим путем определения динамических характеристик тепловых приемников излучения является моделирование нестационарного режима их работы при различных воздействиях. Однако до настоящего времени этот путь не получил широкого распространения, что связано с рядом трудностей, заключающихся в следующем:

1. В микроэлектронных тепловых приемниках излучения толщина термически изолированной структуры и толщина пленочных слоев, из которых сформированы элементы приемника излучения, являются соизмеримыми величинами. В этом случае при моделировании должны учитываться свойства как термически изолированной структуры так и всех пленочных слоев.

2. Микроэлектронные тепловые приемники излучения состоят из нескольких элементов, которые расположены в разных зонах термически изолированной структуры. Учет свойств пленочных слоев, образующих эти элементы, требует построения математических моделей, у которых параметры зависят от координат.

В связи с этим развитие методов моделирования нестационарных процессов в микроэлектронных тепловых приемниках излучения является актуальной задачей. В частности, в данной работе будет рассмотрен метод математического моделирования нестационарного режима работы теплового приемника излучения консольного типа.

Анализ конструкции микроэлектронного теплового приемника излучения консольного типа

Структура микроэлектронного теплового приемника излучения консольного типа представлена на рис. 1. Приемник излучения содержит массивное основание 1, выполненное из кремния, на котором консольно закреплена термически изолированная структура 2. Эта структура обычно изготавливается из диоксида или нитрида кремния, или комбинации слоев данных материалов путем анизотропного травления кремния. На термически изолированной структуре располагаются поглощающий слой 3 и пленочный термоэлектрический преобразователь 4. Поглощающий слой 3 имеет прямоугольную форму (длина l_1 , ширина b), расположен на конце термически изолированной структуры и служит для преобразования энергии падающего излучения в тепловую энергию. Термоэлектрический преобразователь 4 в виде батареи пленочных термопар расположен между погло-

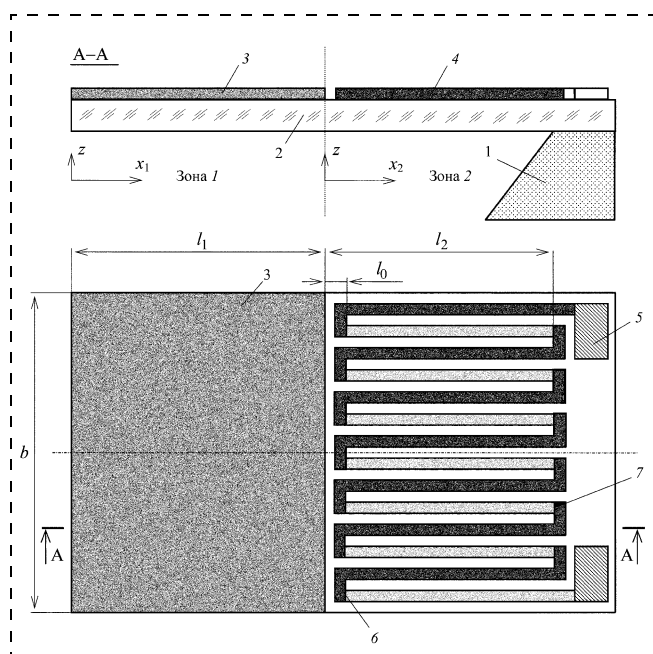


Рис. 1. Микроэлектронный тепловой приемник излучения консольного типа:

1 — основание; 2 — термически изолированная структура; 3 — поглощающий слой; 4 — термоэлектрический преобразователь; 5 — контактные площадки; 6 — горячие спаи термопар; 7 — холодные спаи термопар

щающим слоем 3 и массивным основанием 1. Контактные площадки 5 термоэлектрического преобразователя находятся на массивном основании 1. Горячие спаи термопар 6 термоэлектрического преобразователя располагаются у границы поглощающего слоя 3 на расстоянии l_0 от него. Холодные спаи термопар 7 находятся на массивном основании 1 около места крепления к нему термически изолированной структуры 2. Расстояние между границей поглощающего слоя и линией расположения холодных спаев термопар равно l_2 . Температура холодных спаев термопар определяется температурой основания 1, которая равна температуре окружающей среды T_0 .

При моделировании нестационарного режима работы микроэлектронного теплового приемника излучения будут использоваться следующие допущения, относящиеся к его конструкции:

- массивное основание имеет более высокую теплопроводность и теплоемкость, чем термически изолированная структура; в этом случае тепловые процессы в термически изолированной структуре не оказывают влияния на температуру основания;
- размеры и тепловые параметры материалов положительных и отрицательных ветвей термопар идентичны; этот вариант часто реализуется в микроэлектронных тепловых приемниках излучения, когда для изготовления пленочных термопар используется поликремний *n*- и *p*-типов.

При моделировании нестационарного режима работы микроэлектронного теплового приемника излучения необходимо учесть наличие в его структуре зон с различными элементами, а также свойства всех пленочных слоев, из которых сформированы эти элементы. Для учета распределения элементов по площади термически изолированной структуры конструкцию приемника излучения следует разделить на две зоны, каждая из которых содержит по одному элементу приемника излучения (рис. 2);

- зону приемной площадки (условное обозначение — зона 1); посылочно эта зона состоит из термически изолированной структуры и слоя приемной площадки; границы зоны 1 совпадают с границами приемной площадки; она имеет длину l_1 и ширину b ;
- зону, свободную от приемной площадки (условное обозначение — зона 2); посылочно эта зона состоит из термически изолированной структуры и слоев пленочных термопар; зона 2 располагается от границы приемной площадки до линии расположения холодных спаев термопар термопреобразователя и имеет длину l_2 , ширину b ; особенностью зоны 2 является то, что пленочные слои термоэлектрического преобразователя

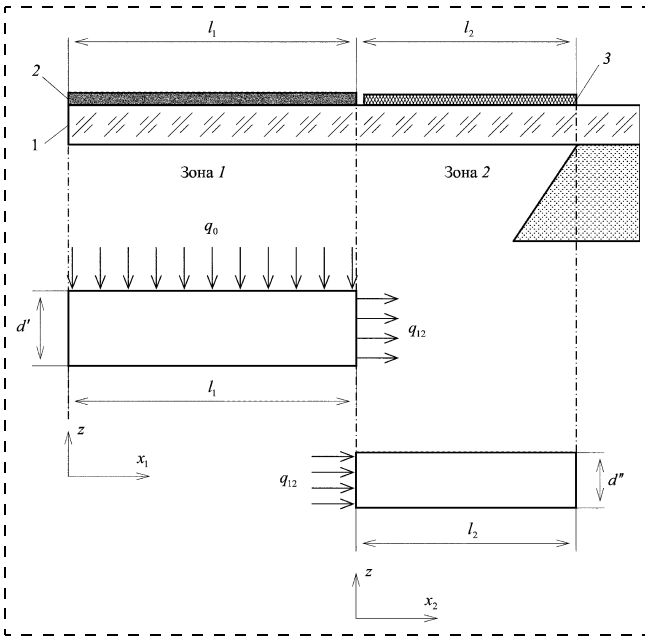


Рис. 2. Разделение структуры микроэлектронного теплового приемника излучения консольного типа на две зоны:
1 — термически изолированная структура; 2 — поглощающий слой; 3 — слои термоэлектрического преобразователя

занимают не всю площадь термически изолированной структуры.

Для учета свойств всех пленочных слоев следует использовать особенность конструкции микроэлектронных тепловых приемников излучения. Эта особенность заключается в том, что толщина любого слоя и суммарная толщина слоев в каждой из выделенных зон гораздо меньше длины и ширины зон. В этом случае каждую зону можно заменить эквивалентной зоной, сформированной из однородного материала с эквивалентными параметрами (толщиной, плотностью, удельной теплоемкостью и коэффициентом теплопроводности), и не учитывать градиент температуры по толщине зоны (см. рис. 2). Эквивалентные параметры зон определяются следующим образом:

толщина

$$d' = d_s + d_r; \quad (1)$$

$$d'' = d_s + \frac{d_{tc}}{2}; \quad (2)$$

плотность

$$\rho' = \frac{\rho_s d_s + \rho_r d_r}{d'}; \quad (3)$$

$$\rho'' = \frac{\rho_s d_s + \frac{\rho_{tc} d_{tc}}{2}}{d''}; \quad (4)$$

удельная теплоемкость

$$c' = \frac{c_s d_s + c_r d_r}{d'}; \quad (5)$$

$$c'' = \frac{c_s d_s + \frac{c_{tc} d_{tc}}{2}}{d''}; \quad (6)$$

коэффициент теплопроводности

$$\lambda' = \frac{\lambda_s d_s + \lambda_r d_r}{d'}; \quad (7)$$

$$\lambda'' = \frac{\lambda_s d_s + \frac{\lambda_{tc} d_{tc}}{2}}{d''}, \quad (8)$$

где d_s , d_r , d_{tc} , d' и d'' — соответственно толщина термически изолированной структуры, поглощающего слоя, пленочных термопар и эквивалентная толщина зоны 1 и зоны 2; ρ_s , ρ_r , ρ_{tc} , ρ' и ρ'' — соответственно плотность материала термически изолированной структуры, поглощающего слоя, пленочных термопар и эквивалентная плотность зоны 1 и зоны 2; c_s , c_r , c_{tc} , c' и c'' — соответственно удельная теплоемкость материала термически изолированной структуры, поглощающего слоя, пленочных термопар и эквивалентная удельная теплоемкость зоны 1 и зоны 2; λ_s , λ_r , λ_{tc} , λ' и λ'' — соответственно коэффициент теплопроводности материала термически изолированной структуры, поглощающего слоя, пленочных термопар и эквивалентный коэффициент теплопроводности зоны 1 и зоны 2. Выражения для эквивалентных параметров зоны 2 получены с учетом второго допущения и при следующих условиях: а) расстояние между ветвями пленочных термопар равно ширине термопар; б) $l_0 \ll l_2$. В этом случае пленочные термопары занимают примерно половину площади зоны 2.

Анализ конструкции микроэлектронного теплового приемника излучения консольного типа позволяет определить размерность рассматриваемой задачи моделирования нестационарных процессов в этом приемнике излучения. Учет соотношения размеров слоев и введение эффективных параметров для зон позволяют привести рассматриваемую задачу к двумерному варианту. Благодаря тому, что эквивалентные толщины зон значительно меньше их продольных размеров (длина и ширина), градиент температуры вдоль толщины каждой зоны будет незначительным. Это позволяет считать в каждой точке зоны температуру по толщине зоны постоянной и рассматривать только распределение температуры по площади зоны. Используя две следующие особенности микроэлек-

тронных тепловых приемников излучения консольного типа можно привести двумерную задачу к одномерному варианту. Во-первых, микроэлектронные тепловые приемники излучения консольного типа имеют плоскость симметрии параллельную плоскости xz . Во-вторых, рассеяние тепла через боковые поверхности консольной термически изолированной структуры с пленочными слоями, которые граничат с воздушной средой, значительно меньше рассеяния теплоты через нижние и верхние поверхности структуры и ее границу с массивным основанием. Это связано с малой толщиной структуры. Учитывая указанную особенность, рассеянием теплоты через боковые поверхности структуры, граничащие с воздушной средой, можно пренебречь и считать их адиабатическими. В этом случае градиент температуры вдоль оси y равен нулю, и для моделирования нестационарных процессов можно использовать одномерную задачу, которая сводится к нахождению распределения температуры вдоль оси x .

Аналитическая модель нестационарного распределения температуры в микроэлектронном тепловом приемнике излучения консольного типа

Аналитическая модель нестационарных процессов в микроэлектронных тепловых приемниках излучения должна учитывать различный вид оптических входных воздействий и определять временную зависимость температуры горячих спаев термопар, так как холодные спаи термопар имеют постоянную температуру T_0 , которая не зависит от внешнего воздействия, и поэтому значение выходного сигнала приемника излучения определяется температурой горячих спаев термопар. Временную зависимость температуры горячих спаев термопар можно найти из нестационарного распределения температуры в структуре микроэлектронного теплового приемника излучения. Аналитическую модель для определения нестационарного распределения температуры будем разрабатывать на основе модели, предложенной в работах [9, 10]. Эта модель позволяет определять стационарное распределение температуры в микроэлектронных тепловых приемниках излучения консольного типа. Для нахождения нестационарного распределения будем использовать следующий алгоритм, аналогичный алгоритму решения, предложенному в работе [11]:

- 1) решение нестационарного уравнения теплопроводности для зоны I ;
- 2) решение нестационарного уравнения теплопроводности для зоны 2 ;
- 3) сопряжение указанных решений и нахождение теплового потока, характеризующего нестационарный теплообмен между зонами.

Трудность использования данного алгоритма связана с тем, что при решении обычных нестационарных уравнений теплопроводности для зон I и 2 , тепловой поток между зонами зависит от времени и входит в подынтегральные выражения [13]. В этом случае для нахождения значения потока из условий сопряжения необходимо аналитически решать интегральное уравнение, что при сложных временных зависимостях оптических воздействий практически невозможно. Поэтому в разрабатываемой модели предлагается с помощью интегрального преобразования исключить из нестационарных уравнений теплопроводности для зон I и 2 частную производную температуры по времени. В качестве интегрального преобразования по времени предлагается использовать интегральное преобразование Фурье с бесконечными пределами. В этом случае в отличие от интегральных преобразований Лапласа и Лапласа—Карсона, во-первых, проще осуществить преобразование начального условия, которое может быть задано в виде функции координат, во-вторых, решение преобразованного уравнения получается в более общем виде (зависимость от частоты), и в-третьих, проведение обратного преобразования осуществляется более легким путем. Однако для применения интегрального преобразования Фурье требуется, чтобы функции, зависящие от времени (температура зон и функция, характеризующая оптическое воздействие), были абсолютно интегрируемыми в диапазоне от $t = -\infty$ до $t = +\infty$. Для микроэлектронных тепловых приемников излучения это условие соблюдается при конечном оптическом воздействии.

Согласно рис. 2 нестационарное уравнение теплопроводности для зоны I в одномерном варианте имеет следующий вид:

$$d'c'p' \frac{\partial T_1}{\partial t} = d'\lambda' \frac{\partial^2 T_1}{\partial x_1^2} - \left(h' + \frac{\lambda_a}{d_c} \right) (T_1 - T_0) - \sigma(\varepsilon'_1 + \varepsilon'_n)(T_1 - T_0)^4 + a_t q_r, \quad (9)$$

где T_1 — температура зоны I ; h' — коэффициент конвекции для зоны I ; λ_a — коэффициент теплопроводности окружающей газовой среды; d_c — расстояние между нижней поверхностью термически изолированной структуры и дном V -канавки под этой структурой; σ — постоянная Стефана—Больцмана; ε'_1 и ε'_n — коэффициент излучения нижней и верхней поверхностей зоны I соответственно; a_t — коэффициент поглощения поглощающего слоя; q_r — плотность потока излучения, падающего на поглощающий слой.

В уравнении (9) учтены все пути рассеяния теплоты от поглощающего слоя в окружающую сре-

ду: а) путем теплопроводности через термически изолированную структуру; б) путем конвективного теплообмена через верхнюю поверхность термически изолированной структуры; в) путем теплопроводности через воздушный промежуток между термически изолированной структурой и дном V-канавки; г) путем радиационного теплообмена через верхнюю и нижнюю поверхности термически изолированной структуры. При функционировании теплового приемника излучения температура в зоне I незначительно превышает температуру окружающей среды T_0 , т. е. выполняется условие

$$T_1 - T_0 \ll T_0. \quad (10)$$

В этом случае нестационарное уравнение теплопроводности (9) может быть преобразовано к следующему виду:

$$\frac{\partial T'}{\partial t} = a' \frac{\partial^2 T'}{\partial x_1^2} - p_1^2 T' + \varphi_r', \quad (11)$$

$$\text{где} \quad T' = T_1 - T_0; \quad (12)$$

$$a' = \frac{\lambda'}{c' \rho'}; \quad (13)$$

$$p_1 = \sqrt{\frac{A'}{d' c' \rho'}}; \quad (14)$$

$$\varphi_r' = \frac{a_r q_r}{d' c' \rho'}; \quad (15)$$

a' — коэффициент температуропроводности материала зоны I ; A' — суммарный коэффициент теплоотдачи поверхности зоны I , который учитывает конвективный и радиационный теплообмены и теплообмен путем теплопроводности через воздушный промежуток. При выполнении условия (10) суммарный коэффициент теплоотдачи A' может быть представлен следующим образом:

$$A' = h' + \frac{\lambda_a}{d_c} + 4\sigma(\varepsilon_1' + \varepsilon_n') T_0^3. \quad (16)$$

Начальное и граничные условия для зоны I имеют следующий вид:

$$T'|_{t=0} = 0; \quad (17)$$

$$\lambda' \frac{\partial T'}{\partial x_1} \Big|_{x_1=0} = 0; \quad (18)$$

$$-\lambda' \frac{\partial T'}{\partial x_1} \Big|_{x_1=l_1} = q_{12}, \quad (19)$$

где q_{12} — плотность теплового потока на границе между зонами I и 2 .

Использование интегрального преобразования Фурье с бесконечными пределами позволяет преобразовать нестационарное уравнение теплопроводности для зоны I (11) с начальными и граничными условиями (17—19) к следующему виду:

$$\frac{\partial^2 \tilde{T}'}{\partial x_1^2} - \left(\frac{p_1^2 + j\omega}{a'} \right) \tilde{T}' = -\frac{\tilde{\varphi}_r'}{a'}; \quad (20)$$

граничные условия:

$$\lambda' \frac{\partial \tilde{T}'}{\partial x_1} \Big|_{x_1=0} = 0; \quad (21)$$

$$-\lambda' \frac{\partial \tilde{T}'}{\partial x_1} \Big|_{x_1=l_1} = \tilde{q}_{12}, \quad (22)$$

$$\text{где} \quad \tilde{T}' = \int_{-\infty}^{\infty} T' \exp(-j\omega t) dt; \quad (23)$$

$$\tilde{\varphi}_r' = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_r' \exp(-j\omega t) dt; \quad (24)$$

$$\tilde{q}_{12} = \int_{-\infty}^{\infty} q_{12} \exp(-j\omega t) dt; \quad (25)$$

ω — переменная, соответствующая круговой частоте; j — мнимая единица.

По аналогии с решением для стационарного случая [9] из решения уравнения (20) с граничными условиями (21) и (22) можно получить выражение для изображения температуры в зоне I :

$$\begin{aligned} \tilde{T}' = & \frac{\tilde{\varphi}_r'}{p_1^2 + j\omega} - \\ & - \frac{\tilde{q}_{12} a'^{0,5} \cosh[(p_1^2 + j\omega)^{0,5} a'^{-0,5} x_1]}{\lambda' (p_1^2 + j\omega) \sinh[(p_1^2 + j\omega)^{0,5} a'^{-0,5} l_1]}. \end{aligned} \quad (26)$$

Для зоны 2 , имеющей температуру T_2 , нестационарное уравнение теплопроводности в одномерном варианте имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} d'' c'' \rho'' \frac{\partial T_2}{\partial t} = & d'' \lambda'' \frac{\partial^2 T_2}{\partial x_2^2} - \left(h'' + \frac{\lambda_a}{d_c} \right) (T_2 - T_0) - \\ & - \sigma(\varepsilon_1'' + \varepsilon_n'') (T_2 - T_0)^4. \end{aligned} \quad (27)$$

Используя соотношение между температурой зоны 2 и температурой окружающей среды

$$T_2 - T_0 \ll T_0 \quad (28)$$

и вводя новую независимую переменную

$$T'' = T_2 - T_0, \quad (29)$$

уравнение (27) можно преобразовать к виду

$$\frac{\partial T''}{\partial t} = a'' \frac{\partial^2 T''}{\partial x_2^2} - p_2^2 T''. \quad (30)$$

Обозначение параметров, входящих в уравнения (27) и (30), аналогично обозначению параметров в уравнениях (9) и (11) с той лишь разницей, что все параметры относятся к зоне 2.

Начальное и граничные условия для зоны 2 имеют следующий вид:

$$T''|_{t=0} = 0; \quad (31)$$

$$\lambda'' \frac{\partial T''}{\partial x_2} \Big|_{x_2=0} = \kappa_{12} q_{12}; \quad (32)$$

$$T''|_{x_2=l_2} = 0, \quad (33)$$

где κ_{12} — коэффициент, учитывающий изменение плотности теплового потока q_{12} при переходе из зоны 1 в зону 2. Данное изменение плотности теплового потока q_{12} обусловлено разницей в толщинах зон 1 и 2. Обоснование введения коэффициента κ_{12} приведено в работе [11]. В рассматриваемом варианте структуры микроэлектронного теплового приемника излучения этот коэффициент равен

$$\kappa_{12} = \frac{d'}{d''}. \quad (34)$$

Преобразование уравнения (31) и начального и граничных условий (31—33) с использованием интегрального преобразования Фурье с бесконечны-

ми пределами по времени приводит к следующему их виду:

$$\frac{\partial^2 \tilde{T}''}{\partial x_2^2} - \left(\frac{p_2^2 + j\omega}{a''} \right) \tilde{T}'' = 0; \quad (35)$$

граничные условия:

$$\lambda'' \frac{\partial \tilde{T}''}{\partial x_2} \Big|_{x_2=0} = \kappa_{12} \tilde{q}_{12}; \quad (36)$$

$$\tilde{T}''|_{x_2=l_2} = 0, \quad (37)$$

где
$$\tilde{T}'' = \int_{-\infty}^{\infty} T'' \exp(-j\omega t) dt. \quad (38)$$

По аналогии с решением для стационарного случая [9] из решения уравнения (35) с граничными условиями (36) и (37) можно получить выражение для изображения температуры в зоне 2:

$$\tilde{T}'' = \frac{\kappa \tilde{q}_{12} a''^{0,5} \sinh[(p_2^2 + j\omega)^{0,5} a''^{-0,5} (l_2 - x_2)]}{\lambda'' (p_2^2 + j\omega)^{0,5} \cosh[(p_2^2 + j\omega)^{0,5} a''^{-0,5} l_2]}. \quad (39)$$

В полученных аналитических выражениях (26) и (39) для изображений температур в зонах 1 и 2 неизвестной величиной является изображение плотности теплового потока между этими зонами $\tilde{q}_{12}$. Для нахождения $\tilde{q}_{12}$ следует использовать условие равенства изображений температур на границе между зонами 1 и 2:

$$\tilde{T}'|_{x_1=l_1} = \tilde{T}''|_{x_2=0}. \quad (40)$$

Подставляя в выражение (40) значения $\tilde{T}'$ и $\tilde{T}''$ в соответствии с выражениями (26) и (39) и проводя необходимые преобразования, получим следующее выражение для изображения плотности теплового потока $\tilde{q}_{12}$:

$$\tilde{q}_{12} = \frac{\tilde{\varphi}'_r \lambda' \lambda'' (p_1^2 + j\omega)^{0,5} (p_2^2 + j\omega)^{0,5}}{(p_1^2 + j\omega)(a' a'')^{0,5}} \times \frac{1}{\lambda'' (p_2^2 + j\omega)^{0,5} a''^{-0,5} \coth[(p_1^2 + j\omega)^{0,5} a'^{-0,5} l_1] + \kappa_{12} \lambda' (p_1^2 + j\omega)^{0,5} a'^{-0,5} \tanh[(p_2^2 + j\omega)^{0,5} a''^{-0,5} l_2]}. \quad (41)$$

Выражение (26) для изображения температуры $\tilde{T}'$ в зоне 1 и выражение (41) для изображения плотности теплового потока $\tilde{q}_{12}$ между зонами 1 и 2 содержат функцию $\tilde{\varphi}'_r$, которая является изображением функции, зависящей от плотности потока излучения, падающего на поглощающий слой, q_r . По условиям рассматриваемой задачи плотность потока излучения является функцией времени и не зависит от пространственных координат. В целях нахождения $\tilde{\varphi}'_r$ зададим временную зависимость плотности потока излучения, падающего на поглощающий слой q_r , для нескольких видов оптического воздействия:

а) ступенчатого

$$q_r = q_0 \quad \text{при} \quad 0 < t < t_e; \quad (42)$$

б) гармонического

$$q_r = q_0 [1 - \cos(\omega_0 t)] \quad \text{при} \quad 0 < t < t_e; \quad (43)$$

в) импульсного

$$q_r = q_0 \left\{ \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2n\pi t}{t_p}\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi t}{t_p}\right) \right] \right\} \quad \text{при} \quad 0 < t < t_e, \quad (44)$$

где q_0 — амплитуда плотности потока излучения; t_e — время окончания оптического воздействия, которое по условию абсолютной интегрируемости при интегральном преобразовании Фурье с бесконечными пределами должно быть конечным; ω_0 — круговая частота гармонических колебаний, равная $2\pi f_0$; t_p — период следования импульсов; a_0 , a_n , b_n — коэффициенты ряда Фурье для импульсного оптического воздействия, которые равны:

$$a_0 = \frac{2t_i}{t_p}; \quad (45)$$

$$a_n = \frac{1}{n\pi} \sin\left(\frac{2n\pi t_i}{t_p}\right); \quad (46)$$

$$b_n = \frac{1}{n\pi} \left[1 - \cos\left(\frac{2n\pi t_i}{t_p}\right) \right]; \quad (47)$$

t_i — длительность импульсов.

Используя известные временные зависимости q_r , в каждом конкретном случае согласно выражению (15) определяем функцию φ'_r , а затем ее изображение $\tilde{\varphi}'_r$ с помощью выражения (24). После

того, как определены функции $\tilde{\varphi}'_r$ и $\tilde{q}_{12}$, их выражения подставляются в выражения (26) и (39) для изображений температур $\tilde{T}'$ и $\tilde{T}''$. Значения температур в зонах 1 и 2 при заданном времени определяются с помощью обратного интегрального преобразования Фурье с бесконечными пределами:

$$T' = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{T}' \exp(j\omega t) d\omega; \quad (48)$$

$$T'' = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{T}'' \exp(j\omega t) d\omega. \quad (49)$$

Таким образом, используя представленную аналитическую модель, можно определить нестационарное распределение температуры отдельно в каждой зоне.

Представленная аналитическая модель может быть также использована для определения комплексной частотной характеристики теплового приемника излучения. Согласно работе [14] эту характеристику можно представить в следующем виде:

$$G(j\omega) = K_r F_T(j\omega) K_T, \quad (50)$$

где $G(j\omega)$ — комплексная частотная характеристика теплового приемника излучения; K_r — коэффициент преобразования поглощающего слоя; $F_T(j\omega)$ — комплексная частотная характеристика тепловой подсистемы приемника излучения; K_T — коэффициент преобразования термочувствительного элемента (термоэлектрический преобразователь).

Входящие в выражение (50) коэффициенты K_r и K_T практически не зависят от частоты модуляции входного воздействия. Однако коэффициент K_r зависит от длины волны оптического излучения и при монохроматическом излучении имеет постоянное значение. Учитывая изложенное, отклик теплового приемника излучения на изменяющееся во времени входное воздействие можно определить видом комплексной частотной характеристики его тепловой подсистемы $F_T(j\omega)$. Эта характеристика может быть рассчитана с помощью предлагаемой аналитической модели. Для данной конструкции микроэлектронного теплового приемника излучения консольного типа комплексная частотная характеристика, определенная из представленной модели, имеет следующий вид:

$$F_T(j\omega) = \frac{\kappa_{12} \lambda' \sinh[(p_2^2 + j\omega)^{0,5} a''^{-0,5} (l_2 - l_0)]}{d' \rho' c' (p_1^2 + j\omega)^{0,5} a'^{-0,5} \cosh[(p_2^2 + j\omega)^{0,5} a''^{-0,5} l_2]} \times \frac{1}{\lambda'' (p_2^2 + j\omega)^{0,5} a''^{-0,5} \coth[(p_1^2 + j\omega)^{0,5} a'^{-0,5} l_1] + \kappa_{12} \lambda' (p_1^2 + j\omega)^{0,5} a'^{-0,5} \tanh[(p_2^2 + j\omega)^{0,5} a''^{-0,5} l_2]}. \quad (51)$$

Данная комплексная частотная характеристика получена для входного воздействия в виде плотности потока излучения.

Результаты моделирования

Предложенный метод моделирования был применен для определения нестационарного распределения температуры в структуре микроэлектронного теплового приемника излучения консольного типа. При расчетах использовались следующие значения параметров элементов приемника излучения. В качестве материала термически изолированной структуры выбран диоксид кремния со следующими свойствами: плотность — 2200 кг/м^3 ; удельная теплоемкость — $740 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; коэффициент теплопроводности — $1,2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; коэффициент излучения — $0,2$. Размеры термически изолированной структуры были равны: длина — 200 мкм ; толщина — 1 мкм . Расстояние от термически изолированной структуры до дна V-канавки выбрано равным 200 мкм . На термически изолированной структуре располагаются две зоны. Зона 1 с поглощающим слоем имеет длину, равную 100 мкм . Поглощающий слой изготовлен из платины, которая имеет следующие параметры: плотность — 21450 кг/м^3 ; удельная теплоемкость — $140 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; коэффициент теплопроводности — $72 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; коэффициент излучения — $0,9$; коэффициент поглощения — $0,9$. Толщина поглощающего слоя равна $0,5 \text{ мкм}$. Зона 2 с термоэлектрическим преобразователем имеет длину, равную 100 мкм . Для положительной и отрицательной ветвей пленочных термопар преобразователя использовался поликремний, соответственно p - и n -типов. Считалось, что ветви термопар имеют одинаковую длину, равную 10 мкм , и расстояние между ними равно их ширине. Толщина пленочных слоев термопар составляла $0,4 \text{ мкм}$. Горячие спаи пленочных термопар расположены на расстоянии 5 мкм от границы поглощающего слоя. При моделировании полагалось, что поликремний обоих типов проводимости имеет одинаковые параметры: плотность — 2330 кг/м^3 ; удельная теплоемкость — $750 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; коэффициент теплопроводности — $22 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ [2]; коэффициент излучения — $0,5$. Для остальных параметров, используемых при моделировании, выбраны следующие значения: температура окружающей среды — 300 К ; коэффициент теплопроводности воздуха — $0,026 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; коэффициент конвективного теплообмена — $19,8 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; плотность потока излучения — 2000 Вт/м^2 ; время воздействия излучения — $0,5 \text{ с}$.

Частотные зависимости модуля и аргумента комплексной частотной характеристики тепловой подсистемы микроэлектронного приемника излу-

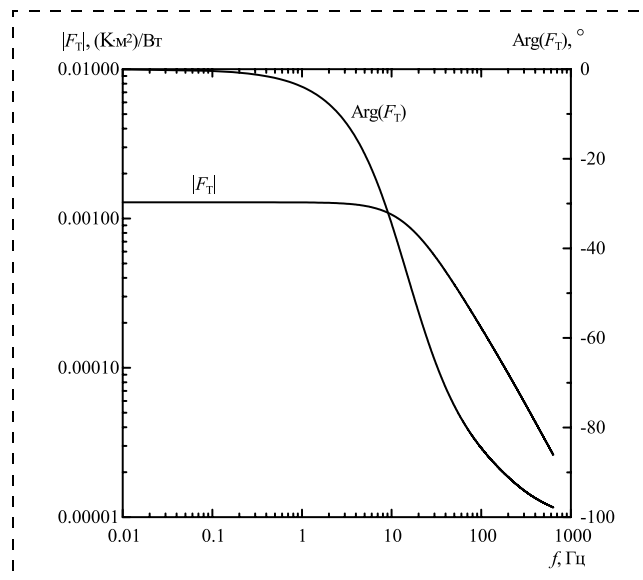


Рис. 3. Частотные зависимости модуля и аргумента комплексной частотной характеристики тепловой подсистемы микроэлектронного приемника излучения консольного типа

чения консольного типа представлены на рис. 3. По частотной зависимости модуля комплексной частотной характеристики можно определить граничную частоту f_c рассматриваемого теплового приемника излучения. Эта частота равна примерно 13 Гц и соответствует аргументу комплексной частотной характеристики, равного 45° . Особенностью частотной зависимости аргумента комплексной частотной характеристики является то, что при частоте больше 100 Гц его значение становится меньше — 90° .

Предложенный метод моделирования нестационарного режима работы микроэлектронного теплового приемника излучения консольного типа был использован для вычисления временных зависимостей температуры перегрева горячих спаев термопар при различных видах входного воздействия. Температура перегрева горячих спаев термопар ΔT_h определялась следующим образом:

$$\Delta T_h = T_h - T_0, \quad (52)$$

где T_h — температура горячих спаев термопар, равная

$$T_h = T_2|_{x_2 = l_0}. \quad (53)$$

Временная зависимость температуры перегрева горячих спаев термопар приемника излучения при ступенчатом входном воздействии представлена на рис. 4. В данном случае, учитывая требование абсолютной интегрируемости функции при интегральном преобразовании Фурье, ступенчатое входное

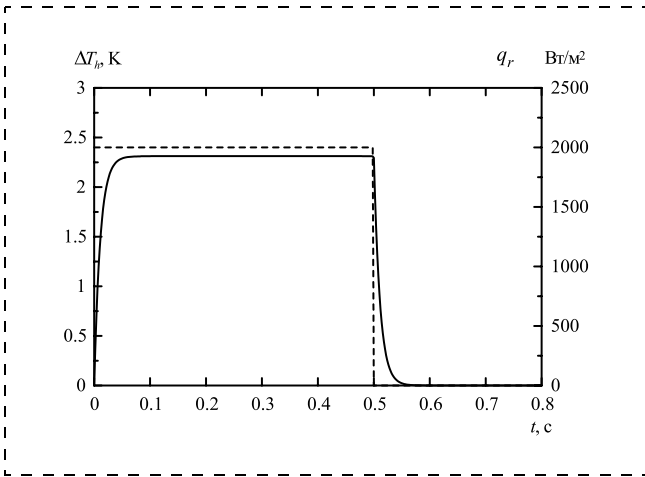


Рис. 4. Временные зависимости входного воздействия q_r (штриховая линия) и температуры перегрева горячих спаев термопар приемника излучения ΔT_h (сплошная линия) при ступенчатом входном воздействии

воздействие заменено широким импульсом с длительностью импульса гораздо большей, чем тепловая постоянная времени приемника излучения. По полученной временной зависимости температуры перегрева горячих спаев термопар при ступенчатом воздействии можно определить значение тепловой постоянной времени рассматриваемого приемника излучения. Полагая, что микроэлектронный тепловой приемник излучения является системой первого порядка, можно записать уравнения изменения температуры перегрева горячих спаев термопар в следующем виде:

$$\Delta T_h = \Delta T_h^{(s)} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_T}\right) \right], \quad (54)$$

где $\Delta T_h^{(s)}$ — установившееся значение температуры перегрева горячих спаев термопар; τ_T — тепловая постоянная времени приемника излучения. Если определить из результатов моделирования время достижения выходным сигналом определенного уровня установившегося значения, то используя выражение (54), можно вычислить тепловую постоянную времени приемника излучения:

$$\tau_T = \frac{t}{\ln[(1 - \Delta T_h / \Delta T_h^{(s)})^{-1}]}. \quad (55)$$

Рассчитанное с помощью выражения (55) значение тепловой постоянной времени для рассматриваемого микроэлектронного теплового приемника излучения по уровню выходного сигнала, равного 90 % от установившегося значения, составляет 0,012 с. Зная значение тепловой постоян-

ной времени, можно также вычислить значение граничной частоты микроэлектронного теплового приемника, используя следующее соотношение:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau_T}. \quad (56)$$

Вычисленное значение граничной частоты составляет 13,26 Гц, что хорошо согласуется со значением граничной частоты, определенным из комплексной частотной характеристики приемника излучения, равным 13 Гц.

Для иллюстрации возможностей предложенного метода моделирования нестационарного режима работы микроэлектронного теплового приемника излучения консольного типа с его помощью определены временные зависимости температуры перегрева горячих спаев термопар приемника излучения при гармоническом и импульсном воздействиях. На рис. 5 представлены временные зависимости температуры перегрева горячих спаев термопар для двух видов гармонического воздей-

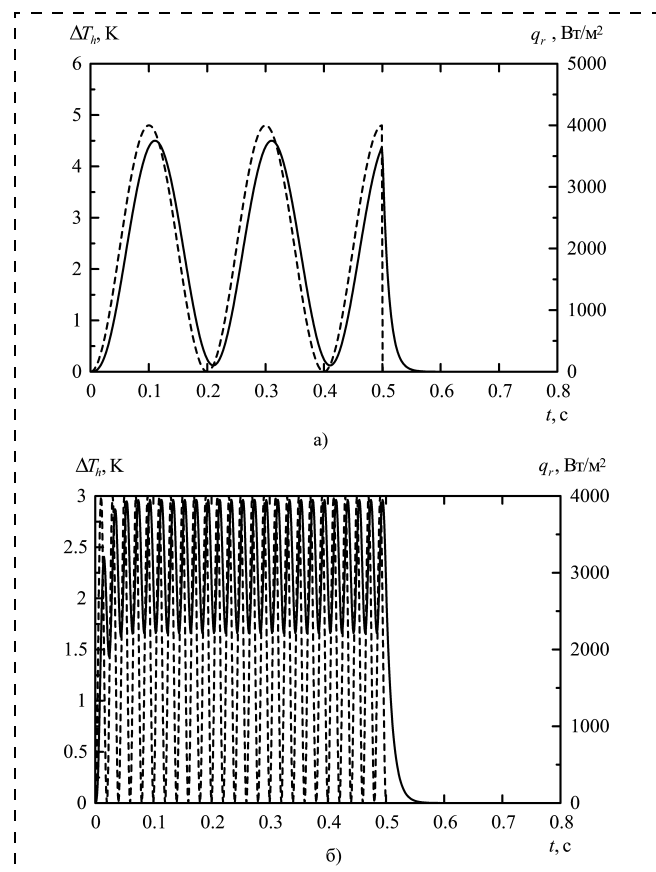


Рис. 5. Временные зависимости входного воздействия q_r (штриховая линия) и температуры перегрева горячих спаев термопар приемника излучения ΔT_h (сплошная линия) при гармоническом входном воздействии:

а — $f_0 = 5$ Гц; б — $f_0 = 50$ Гц

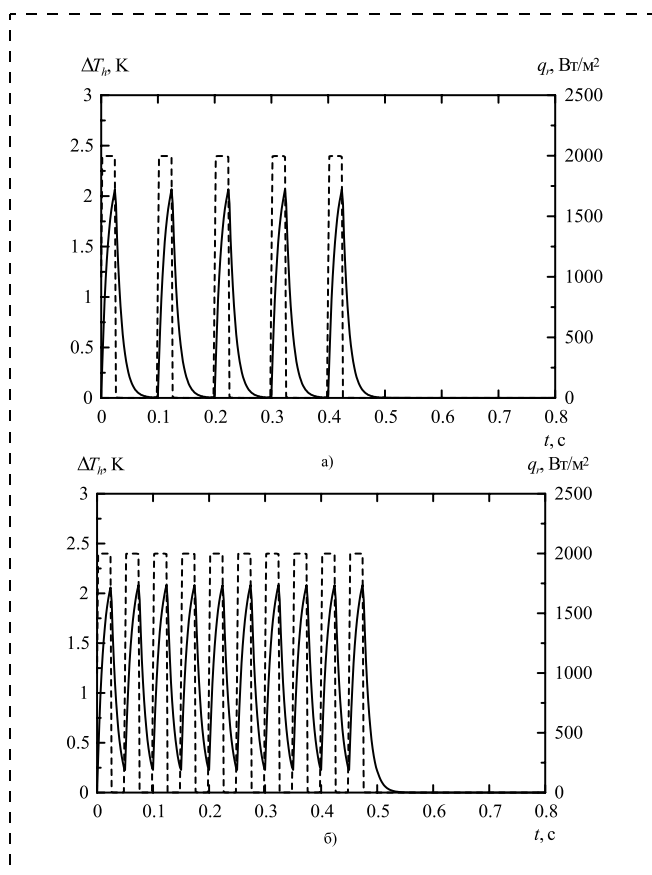


Рис. 6. Временные зависимости входного воздействия q_r (штриховая линия) и температуры перегрева горячих спаев термопар приемника излучения ΔT_h (сплошная линия) при импульсном входном воздействии:

а — $t_i = 0,025$ с; $t_p = 0,1$ с; б — $t_i = 0,025$ с; $t_p = 0,05$ с

ствия: а) $f_0 < f_c$; б) $f_0 > f_c$. На рис. 6 представлены временные зависимости температуры горячих спаев термопар для двух видов импульсного воздействия:

а) временной интервал между импульсами больше времени достижения установившегося значения температуры перегрева;

б) временной интервал между импульсами меньше времени достижения установившегося значения температуры перегрева.

Заключение

В работе предложен аналитический метод для моделирования нестационарного распределения температуры в структуре микроэлектронного теплового приемника излучения консольного типа. В методе для решения нестационарного уравнения теплопроводности используется интегральное пре-

образование Фурье по времени, что дает возможность определить комплексную частотную характеристику теплового приемника излучения. Предложенный метод позволяет заменить численные методы и осуществлять моделирование нестационарного распределения температуры быстро и с требуемой точностью. Представленные практические результаты показывают, что предложенный метод моделирования нестационарного распределения температуры в структуре микроэлектронного теплового приемника излучения консольного типа может быть использован для создания простых систем автоматизированного проектирования данных тепловых приемников.

Список литературы

1. Van Herwaarden A. W., Van Duyn D. C., Van Oudheusden B. W., Sarro P. M. Integrated thermopile sensors // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1989. V. 21—23. P. 621—630.
2. Baltes H., Paul O., Brand O. Micromachined thermally based CMOS microsensors // *Proceedings of the IEEE*. 1998. V. 86. P. 1660—1678.
3. Elbel T. Miniaturized thermoelectric radiation sensors // *Sensors and Materials*. 1991. V. 3. P. 97—109.
4. Elbel T., Lenggenhager R., Baltes H. Model of thermoelectric radiation sensors made by CMOS and micromachining // *Sensors and Actuators A. Physical*. V. 35. P. 101—106.
5. Völklein F., Baltes H. Optimization tool for the performance parameters of thermoelectric microsensors // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1993. V. 36. P. 65—71.
6. Lee J.-B., Kim I.-S., Sim Y.-C., Kim T.-C. Optimization and fabrication of a dual thermopile sensor based on the BEM // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1998. V. 64. P. 179—184.
7. Socher E., Degani O., Nemirovsky Y. Optimal design and noise considerations of CMOS compatible IR thermoelectric sensors // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1998. V. 71. P. 107—115.
8. Dillner U. Thermal simulation and realization of micromachined thermal sensor arrays // *Proceedings of 5th NEXUSPAN Workshop on Thermal Aspects in Microsystem Technology*, Budapest, 1998. P. 133—141.
9. Kozlov A. G. Optimization of thin-film thermoelectric radiation sensor with comb thermoelectric transducer // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1999. V. 75. P. 139—150.
10. Kozlov A. G. Optimization of thin-film thermoelectric radiation sensor with separate disposition of absorbing layer and comb thermoelectric transducer // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2000. V. 84. P. 259—269.
11. Kozlov A. G. Analytical modelling of steady-state temperature distribution in thermal microsensors using Fourier method. Part 1. Theory // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2002. V. 101. P. 283—298.
12. Kozlov A. G. Analytical modelling of steady-state temperature distribution in thermal microsensors using Fourier method. Part 2. Practical application // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2002. V. 101. P. 299—310.
13. Карпачов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высшая школа, 2001. 550 с.
14. Michalski L., Eckersdorf K., Kucharski J., McGhee J. *Temperature Measurement*. Chichester: John Wiley & Sons, 2001. 501 p.

УДК 621.3

Ю. В. Панфилов, д-р техн. наук, проф.,
МГТУ им. Н. Э. Баумана

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИЯ: АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Часть II*

По материалам международного конгресса "7th International Conference on Nanostructured Materials" проведен анализ современного состояния дел в области наноструктурированных материалов и нанотехнологии. Особое внимание уделено изучению шансов и рисков, связанных с работами по созданию новых материалов и технологий.

Нанообработка

На конгрессе были представлены разнообразные методы воздействия на нанообъекты, которые пока достаточно трудно систематизировать. Поэтому в данной статье они просто перечислены.

Уникальные механические свойства материалов получают с помощью так называемого метода **равноканального углового прессования** (Equal Channel Angular Pressing — ECAP), схема которого показана на рис. 1 [С. 48]**.

Нанокompозитная тонкая пленка из $\text{Co}_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ толщиной 2–5 нм получена **ионно-лучевым распылением** композитной мишени в атмосфере $\text{Ag} + \text{O}_2$ при давлении $\text{O}_2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}$ Па [С. 100]. В [С. 119] описаны нанокерметы — металлические нанокластеры, внедренные в диэлектрическую матрицу. Они обладают следую-

щими свойствами: большим поглощением излучений и поверхностным плазмонным резонансом, что может быть использовано для

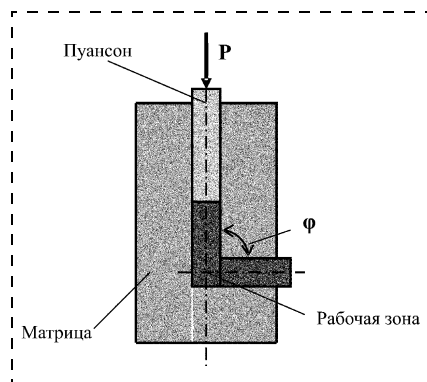


Рис. 1. Схема получения монолитного наноструктурированного материала методом ECAP (ϕ — угол прессования)

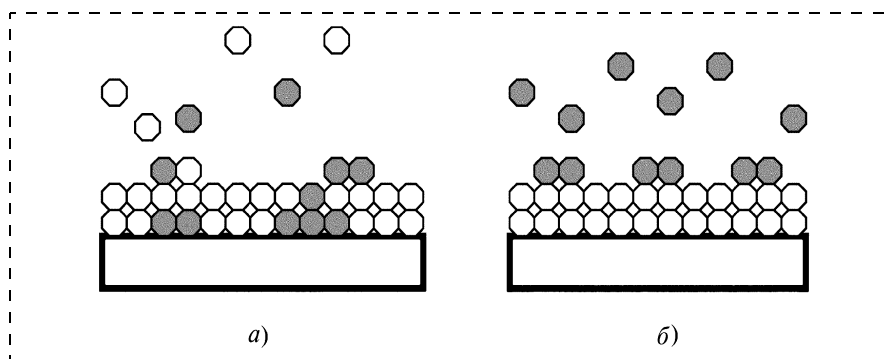


Рис. 2. Схема получения нанокермета:

а — распыление композитной мишени $\text{Ag} - \text{Si}_3\text{N}_4$; б — последовательное осаждение Ag и Si_3N_4

создания оптических фильтров, солнечных батарей сверхбыстрых оптических выключателей. Метод получения — ионно-лучевое распыление для осаждения Ag нанокластеров в аморфную Si_3N_4 матрицу (рис. 2).

Асимметричные металлические наночастицы со свойствами плазмонного резонанса (рис. 3), уникальными электрическими, оптическими и другими свойствами получены на поверхности путем **комбинирования** коллоидной литографии, осаждения испарением металлической пленки и ионно-лучевого травления. Наклонное испарение, ионно-лучевое травление и удаление наносфер дает асимметричные, в четверть луны, наночастицы. Вращение образца и повторное испарение позволяют получать другие формы наночастиц. Управлять оптическими свойствами наночастиц можно путем изменения их формы [С. 115].

Металл-фторполимерный нанокompозит (Au , Ag , Cu в тефлоне) получен одновременным **осаждением из паровой фазы** металла и полимера и предназначен для хранения оптической информации и изготовления многоцветных фильтров [С. 122]. Размеры частиц металла и расстояние между ними много меньше длины

* Часть I опубликована в № 11, 2005 г.

** Статья написана по материалам секций конгресса, опубликованных в сборнике [1], включающем пленарные и стендовые доклады, а также по материалам из проспектов фирм и организаций, принимавшим участие в конгрессе. Поэтому все ссылки в статье включают или номер страницы в [1] или электронный адрес в Интернет.

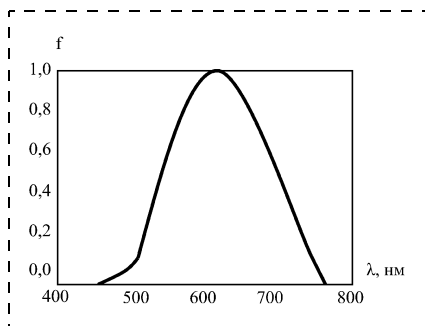


Рис. 3. Спектр рассеяния света наночастиц, полученный с помощью конфокального микроскопа (f — плотность распределения, λ — длина волны света)

волны света. Гетероэпитаксия MoO_3 -наноструктур с размерами кластеров 10 нм в диаметре на Au проведена методом CVD при 450 K из газа $\text{Mo}(\text{CO})_6$. Осаждение нанокристаллического и аморфного кремния в виде тонкой пленки для солнечных батарей проведено с помощью **стимулированного плазмой газозафазного осаждения** (СПГФО) с ВЧ источником плазмы (13,56 МГц). Размер кристаллов — 2–5 нм в аморфной матрице Si [С. 253]. Магнитные Fe/C и Fe/N сферические нанокapsулы (5–20 нм) получены методом **химической конденсации из газовой фазы** (CVC — Chemical Vapor Condensation), заключающимся в нагреве до 400–1000 °C смеси газов $\text{Fe}(\text{CO})_5 + \text{CO} + \text{CH}_4 + \text{Ar}/\text{NH}_3$ в рабочей камере [С. 273].

Разработана ионная жидкость — новый электролит для электрохимического синтеза беспористых материалов, покрытий и фольги. Такие материалы, как Al, In, Mg, W, Nb, не могут получаться **электроосаждением** (Electro-deposition) из электролитов, т. е. гальваникой с пульсирующим режимом подачи напряжения на электроды. Поэтому были созданы ионные жидкости, состоящие из неорганических и органических компонентов. Ионная жидкость имеет диапазон рабочих температур $-50 \div +200$ °C, низкую вязкость (10^{-2} Па·с),

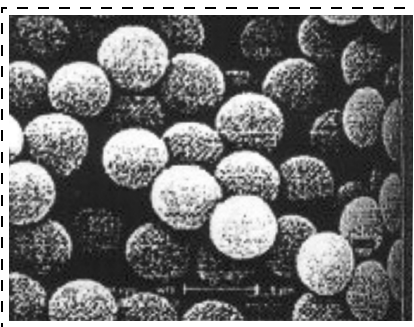


Рис. 4. Изображение монодисперсных сфер TiO_2 , полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа

хорошую электропроводность (10^{-2} Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$). Из ионной жидкости получены сплавы $\text{Al}_x\text{Mn}_{1-x}$ и $\text{Al}_x\text{Fe}_{1-x}$ с размерами кристаллов 10–100 нм. Измерена твердость покрытий: 1,44 ГПа для кристаллитов с размерами 100 нм и 3,4 ГПа — для кристаллитов с размерами 14 нм [С. 247].

Самоорганизующиеся наноструктуры с "туннелями" в диэлектрическом слое получены методами **нанесения тонких пленок в вакууме и жидкостного анодного окисления** (получены поры с размерами от 1 до 100 нм). Эти наноструктуры в виде "металл — диэлектрик — металл" квантовых точек могут использоваться для одноэлектронного транспорта [С. 269]. Монодисперсные сферы TiO_2 диаметром 200–2500 нм

(рис. 4) получены управляемым **гидролизом** [С. 270].

Низкоэнергетическое (< 1 эВ) лучевое кластерное осаждение аморфных пленок углерода на Si подложки проведено методом **лазерной абляции** с использованием графитовой мишени. Рамановские спектры показали наличие sp , sp^2 и sp^3 состояния углерода в пленке. Молекулярная масса кластеров составила 10^3 – 10^4 а.е.м. в среднем, а размер зерна ("агрегатов") в покрытии — 2,5–6 нм [С. 268].

Разработана установка импульсной лазерной абляции (рис. 5) для низкоэнергетического кластерного лучевого осаждения (LECBD) в сверхвысоком вакууме нанокластеров кобальта с размерами около 8 нм [С. 284].

Формирование квантовых точек из In_2O_3 высотой 0,7–2,5 нм и радиусом 0,1–1 нм на поверхности InSe и GaSe выполнено с помощью **АСМ (атомно-силового микроскопа) окислением** при атмосферном давлении [С. 271]. Формирование монослойной и субмонослойной кластерной области из Ag на W методом СТМ в сверхвысоком вакууме представлено в [С. 273]. На рис. 6 видны кластеры с высотой одного атома и состояние приблизительно из семи атомов Ag.

Покрывтия из наночастиц V, Si

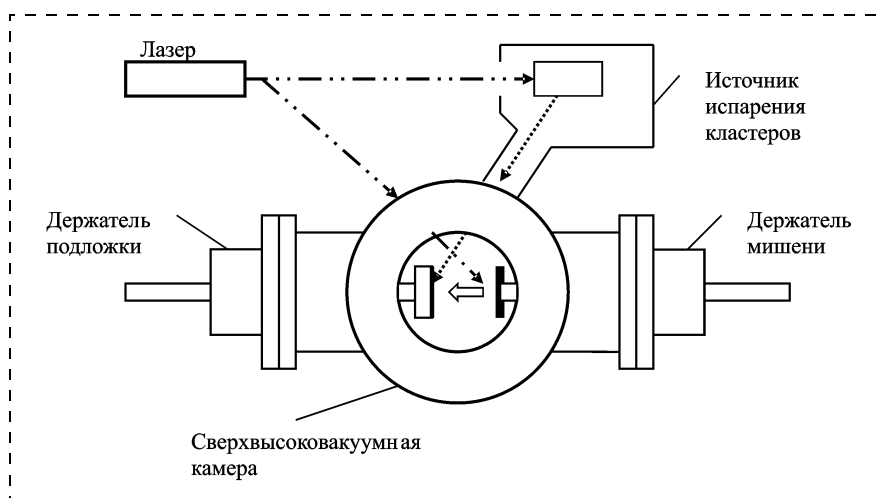


Рис. 5. Схема установки импульсной лазерной абляции



Рис. 6. Кластеры серебра, полученные с помощью АСМ

и др. на Ti образцах получены методом пламенного **аэрозольно-го синтеза** в реакторе для использования в качестве каталитических пленок и УФ фильтров. Газофазные покрытия из Ti наночастиц получены в реакторе с горячей стенкой [С. 272].

Золь-гель технологией были получены наносистемы Ge—Zr—Al, ZrO₂, Al₂O₃, GeO₂, SnO₂, In₂O₃, TiO₂, MoO₃, GeO₂—ZrO₂, MoO₃—SnO₃, MoO₃—In₂O₃, NiO—In₂O₃, NiO—SnO₂. Эти структуры имеют размеры зерен 4—10 нм и стабильны при 800—900 °С [С. 276].

Технология нанесения много-

слойных наноструктурированных тонких пленок Al₂O₃/ZrO₂ методом золь-гель окунания (Sol-Gel Dip Coating Technique) предложена швейцарской компанией CSEM (Swiss Center for Electronics and Microtechnology). Технология базируется на результатах исследования наноструктурных многослойных покрытий с толщиной отдельных слоев в нанометровом диапазоне, которые являются новым классом твердых защитных покрытий. Важное значение для обеспечения качества таких покрытий имеет граница раздела между слоями и дефекты структуры каждого слоя, а также последующая лазерная или микроволновая обработка покрытия, полученного золь-гель методом.

Слои Al₂O₃ обладают хорошими диэлектрическими свойствами, высоким коэффициентом преломления, химической стабильностью, радиационной стойкостью. Пленки ZrO₂ отличаются химической инертностью, высокой плотностью и твердостью, низкой теплопроводностью. Основными областями применения являются оптоэлектроника, микроэлектроника, оптика. Покры-

тия обладают стойкостью к окислению при высоких температурах, свойствами теплового барьера, коррозионной и износостойкостью.

Технологический процесс нанесения многослойных покрытий золь-гель методом (рис. 7) обладает следующими достоинствами: воспроизводимостью, высокой чистотой, простотой выполнения, низкой ценой, низкой температурой, управляемой структурой покрытия, возможностью нанесения покрытий на изделия сложной формы, возможностью селективного легирования.

Проверка свойств покрытий показала, что с повышением температуры отжига от 200 до 800 °С шероховатость поверхности покрытий увеличивается с 10 до 20 нм (микроволновая обработка и отжиг) и до 35 нм (УФ облучение и отжиг), критическая нагрузка — с 25 до 30 Н и с 30 до 40 Н, соответственно, а также увеличивается адгезия покрытий. Твердость покрытий составляет 4—10 ГПа, модуль упругости — 95—160 ГПа. Фазовый состав покрытия — γ-алюминий и кубический цирконий с однородной и плотной структурой.

Cu₆₀(Zr или Hf)₃₀Ti₁₀ сплав получен методом **плавления с быстрым охлаждением** с образованием стекланной матрицы с размерами зерен 5 нм в диаметре [С. 313].

Технология нанолитографии "S-FIL™" (Step and Flash Imprint Lithography) компании Molecular Imprint, Inc. (США) предназначена для получения трехмерных оттисков (реplik) с разрешением менее 20 нм. Технологический маршрут включает в себя изготовление жесткого и прозрачного для УФ излучения шаблона размером от 5 × 5 мм до 25 × 25 мм электронно-лучевым или лазерным методом и состоит из пяти шагов изготовления образца (рис. 8):

1. Ориентирование шаблона и подложки с планаризирующим

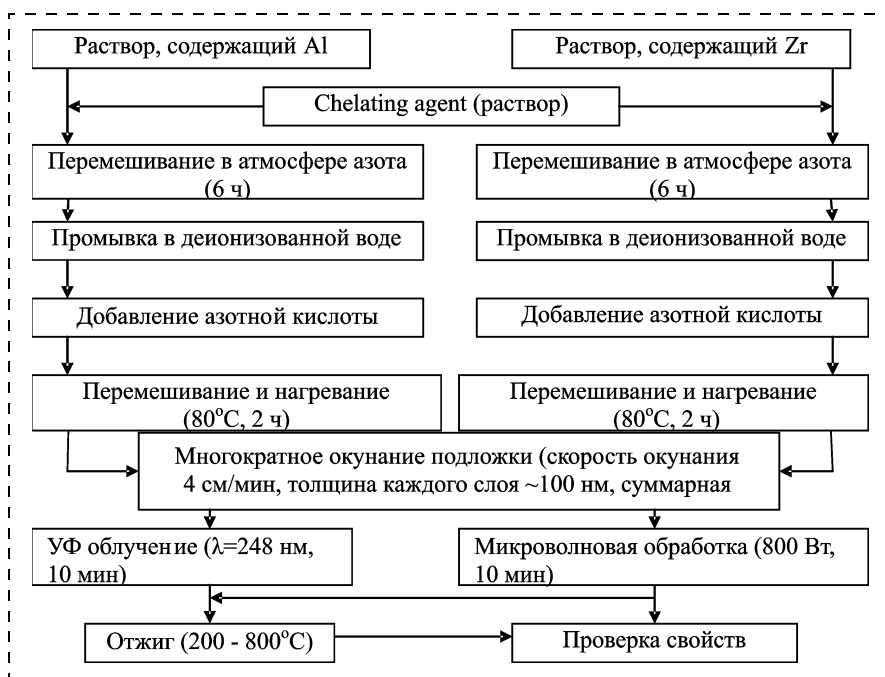


Рис. 7. Схема золь-гель метода формирования многослойного покрытия

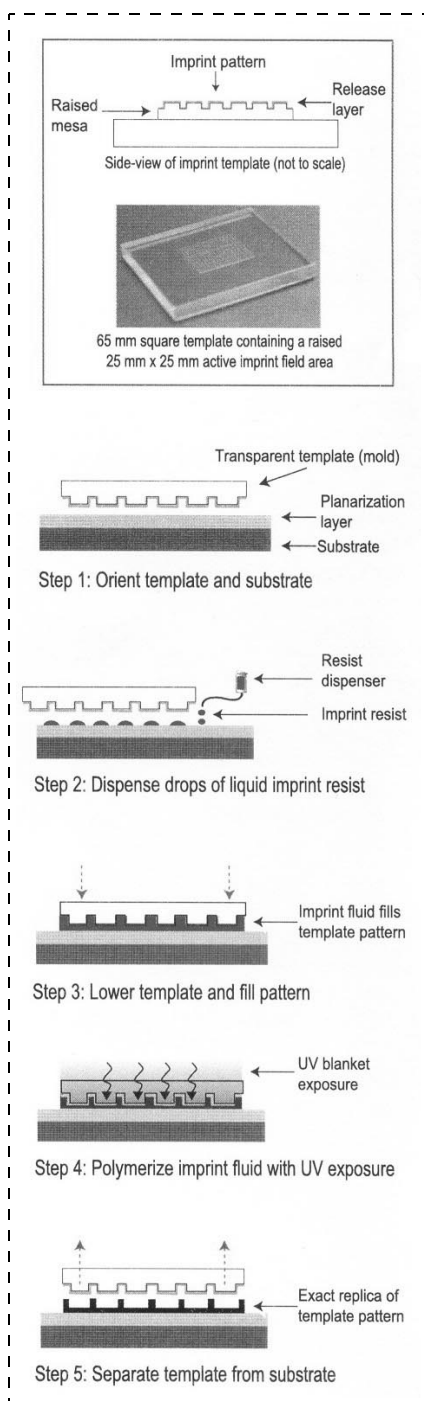


Рис. 8. Нанолитография: технологический маршрут получения трехмерных оттисков (реплик) с разрешением менее 20 нм

(выравнивающим) слоем для обеспечения их параллельности.

2. Нанесение резиста с низкой вязкостью и чувствительного к УФ излучению.

3. Опускание шаблона, очень слабое надавливание на подложку (GaAs, InF, etc.) с резистом и

заполнение рельефа шаблона жидким резистом.

4. Засветка и полимеризация резиста УФ излучением.

5. Отделение шаблона от подложки с сформированным нанорельефом.

Эти пять шагов повторяются для всей площади полупроводниковой пластины, в том числе и для 300-миллиметровой (рис. 9). Травление планаризирующего слоя осуществляется в два этапа (рис. 10): удаление с помощью галогенов остатков полимеризованного резиста с поверхности подложки и реактивное травление ионами кислорода планаризирующего слоя. В качестве примера приведены фотографии 40-нанометровых канавок с аспектным отношением 8 : 1, 20-нанометровых линий, трехрядного шаблона и 3D оттиска.

Области применения: полупроводниковые приборы и наноустройства, микрорельеф и МЭМС, фотонные и оптические компоненты, хранение данных и тонкопленочные считывающие головки, биологические устройства [www.molecularimprints.com].

К готовым к промышленному применению результатам можно отнести "печатную электронику" (Printable Electronics), дисплеи, элементы питания и др. (рис. 11).

Наноперемещения

В [С. 286] показаны два основных метода манипулирования материалами с помощью АСМ:

- непосредственным контактом иглы кантилевера с поверхностью объекта;

- возбуждением резонансной частоты (кГц) колебаний кантилевера (бесконтактный метод).

"NanoFeel™ 300" — манипулятор для нанометрового масштаба с обратной связью, предназначен для совместной работы с АСМ по перемещению нанообъектов, таких как углеродные нанотрубки, вирусы, кластеры и т. п.

Компания LOT-Orient Group Europe предлагает Zyvex программу с широким кругом тематик: от зондов для интегральных микросхем и питания МЭМС устройств до манипулирования и измерения нанообъектов, например, углеродных нанотрубок, нанопроволок и нанокатушек: Zyvex S100 наноманипулятор [www.lot-orient.de].

Компании, занимающиеся нанотехнологиями

Министерство образования, культуры, спорта, науки и технологии Японии поддержало следующие проекты по нанотехнологии:

1. Изготовление трехмерных наноструктур с помощью электронно-лучевой литографии [www.re.titech.ac.jp/rcqee/nano_support/].

2. Лазерная молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ), нанесение тонких органических пленок, фокусирование ионного пучка и др. [www.sanken.osaka-ua.c.jp/labs/foundry].

Японская компания **National Institute for Material Science** имеет следующие подразделения, занимающиеся нанотехнологией:

- Лаборатория новых материалов.

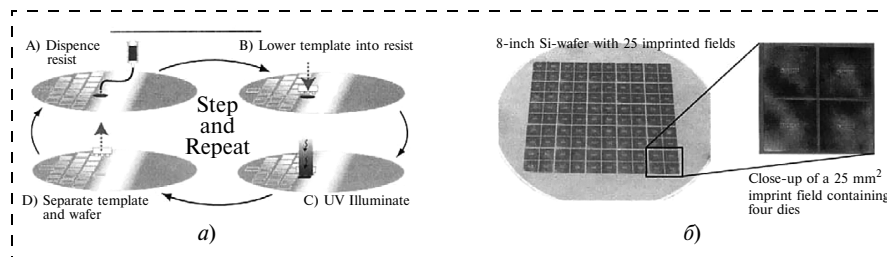


Рис. 9. Схема обработки кремниевой пластины (а) и вид 8-дюймовой кремниевой пластины с 25 печатными полями площадью 25 мм² (б)

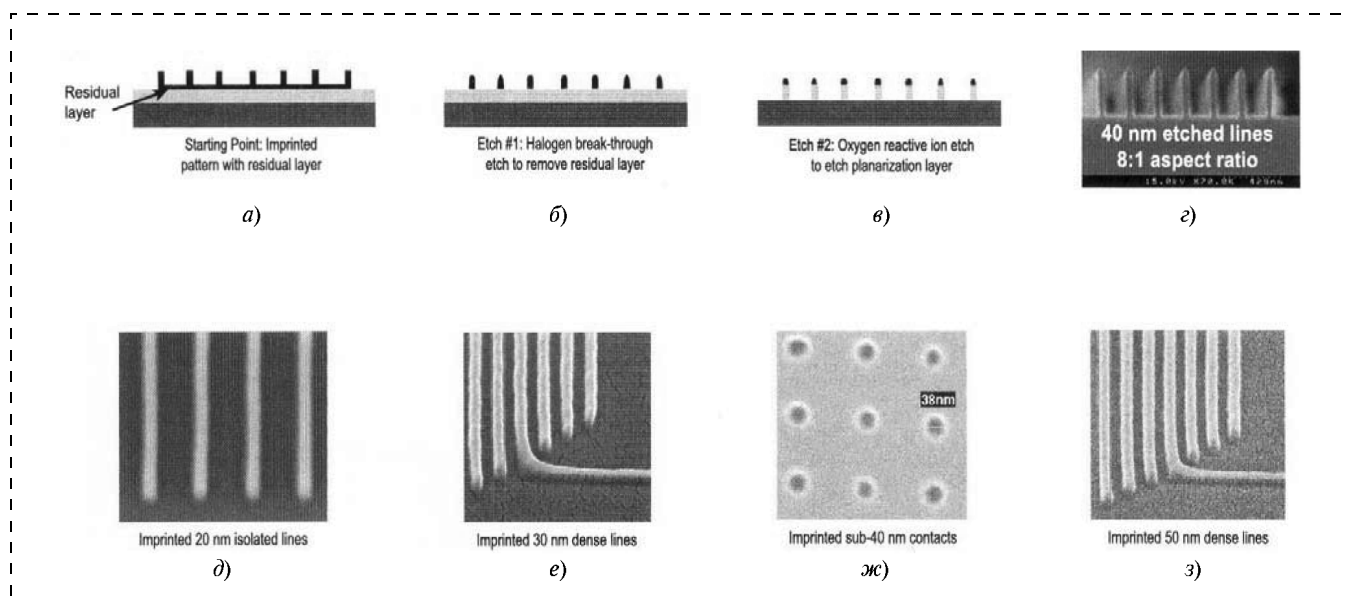


Рис. 10. Схема травления планаризирующего слоя: исходный печатный образец с остаточным слоем (а); удаление остаточного слоя травлением в галогенах (б); травление планаризирующего слоя реактивным методом ионами кислорода (в); вид протравленных линий шириной 40 нм с аспектным отношением 8 : 1 (г); печатные 20 нм (д) и 30 нм (е) линии, печатные 40 нм контакты (ж) и 50 нм линии (з)

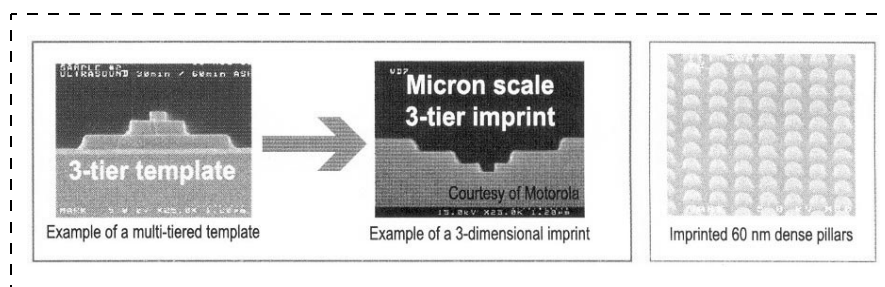


Рис. 11. Пример изделия "печатной электроники"

- Лаборатория наноматериалов.
- Лаборатория инженерии материалов.
- Центр биоматериалов.
- Центр сверхпроводников.
- Центр моделирования материалов.
- Центр исследования сталей.
- Центр материалов для экологии.
- Центр магнитных материалов.

Наиболее существенными новыми разработками института в области наноматериалов являются: искусственная кость, включенная в обмен веществ организма человека, и технология синтеза многокомпонентных пленок (тройных сплавов) в вакууме с использованием KrF-лазерного трехтигельного испарителя, вра-

щающегося подложкодержателя и подвижной маски.

Институт Бионинженерии и Нанотехнологии (Сингапур) проводит исследования в следующих областях:

- доставка с помощью наночастиц лекарств в нужное место организма;
- пересадка тканей, искусственные органы и имплантаты;
- нанобиотехнология — ощущение и проверка биологических объектов с помощью наноструктурированных материалов;
- медицинские устройства и инструмент;
- биологическая и биомедицинская аналитика [www.ibn.a-star.edu.sg].

Компания **LOT-Orient Group Europe** предлагает Zyvex Dried Film (ZDF) углеродные нанотрубки, изготовленные из органического раствора, который легко смешивается с другими материалами для получения композитов. Получаемые углеродные нанотрубки (Carbon nanotubes' — CNTs) обладают уникальными физическими свойствами: высокой прочностью (предел прочности растяжения в 8 раз больше, чем у коррозионно-стойкой стали), малой массой, высокой термической (в 5 раз больше, чем у меди) и электрической проводимостью, большой площадью поверхности [www.lot-orient.de].

Основными областями применения углеродных нанотрубок являются:

- пластичные композиты;
- управление теплопроводностью (стыки материалов, печатные платы, радиаторы и т. п.);
- авиационная, автомобильная и другая инфраструктура;
- сенсоры;
- компоненты МЭМС;
- топливные элементы;
- медицинские и другие материалы [www.zyvex.com].

Центр нанотехнологии Ренсселерского (Rensselaer) политехнического института (Штат Нью-Йорк, США) разработал новый метод (Freeze-drying Method) самосборки наночастиц и нанотрубок. Микро- и нанотрубки диаметром порядка 1 мкм получены Freeze-drying ("высушивание замораживанием") методом синтеза самоорганизующихся наночастиц из TiO_2 , средний размер которых составляет 18–23 нм. Явления капиллярности и связывания водорода во время высушивания замораживанием объясняют самоорганизацию наночастиц и получение нанотрубок. Изменением таких параметров технологического процесса, как концентрации взвеси и уровень pH, кроме нанотрубок можно получить пластины, сферы и "пчелиные соты", в том числе и из других материалов, например, нанотрубок из ZnO.

CSEM (Swiss Center for Electronics and Microtechnology, Inc.) проводит исследования фрикционных свойств гидрофобных и наноструктурированных тонких пленок, применяемых в МЭМС. Особенности объекта исследований: большое значение отношения поверхности к объему; типовые материалы — Si и Ni; адгезионное схватывание контактирующих поверхностей; большой коэффициент трения и износ; сильный капиллярный эффект — образование пленки воды на поверхности. Решение — создание гидрофобных поверхностей МЭМС.

Для проведения исследований разработан микротрибометр со следующими характеристиками: тангенциальная сила от 10 мкН до 100 мН, нормальная сила от 10 мкН до 100 мН, максимальная частота сканирования 10 Гц, максимальный ход 1 мм.

Проведены исследования микротрения фторуглеродных тонких пленок: гладкой аморфной пленки CF_x и частично кристаллической микро-, наноструктурированной пленки $(\text{CF}_2)_n$, получен-

ных методом стимулированного ВЧ плазмой газофазного осаждения (PECVD) при частотах 13,27 и 75 МГц при разных условиях осаждения — с модуляцией и без модуляции частоты (гладкая аморфная пленка — без модуляции, частично кристаллическая — с модуляцией). Исследования показали, что сила трения скольжения кремниевого, сапфирового и стального шариков диаметром 2 мм по фторуглеродным пленкам, нанесенным на кремниевую подложку, значительно меньше, чем по естественному оксиду кремния, лучшие гидрофобные свойства проявились у частично кристаллической фторуглеродной пленки с ленточной наноструктурой, но она обладала большим коэффициентом трения.

Низкий коэффициент трения и хорошие гидрофобные свойства были получены при трении гладкого ($R_s = 7,3$ нм) кремниевого с естественным оксидом шарика по силановой пленке, нанесенной на кремниевую подложку из раствора.

Компания CSEM разработала самосмазывающиеся нанокompозитные твердые покрытия на основе $\text{TiAlCN} + \text{MoS}_2$, предназначенные для повышения скорости обработки, уменьшения коэффициента трения, повышения износостойкости и коррозионной стойкости режущего и деформирующего инструмента. Покрытие наносится методом реактивного ионно-плазменного осаждения при давлении 1–5 Па, температуре образца 473–573 К, напряжении смещения до 100 В. Толщина покрытия 1,5–3 мкм, объемное отношение $\text{TiAlCN} : \text{MoS}_2 = 70 : 30$, предполагаемая структура покрытия — мягкая аморфная фаза MoS_2 между твердыми гранулами TiAlCN . Результаты измерения коэффициентов трения и скретч-теста свидетельствуют о существенном повышении качества покрытия при добавлении дисульфида молибдена.

Заключение:

что изменила приставка "нано"?

Чтобы ответить на этот вопрос, были сформулированы следующие исходные положения:

- нанотехнология — это приближение к фундаментальным свойствам материи;
- ввиду малости размеров получение наноструктурированных материалов может быть эффективно только путем самоорганизации;
- наноэлектроника — при размерах элементов в диапазоне 10–100 нм проявляются квантовые эффекты при комнатной температуре.

Объекты нанотехнологии были разделены на 0-, 1-, 2- и 3-мерные:

Квантовые точки, наночастицы, нанопорошок — детектор ионизирующих излучений, одноэлектронный транзистор, катализатор химических реакций и физических явлений, полуфабрикат для получения изделий с новыми показателями качества.

Методы получения: сканирующая зондовая микроскопия в парах, жидкостях или твердом теле; эпитаксия на горячей стенке (HWE — Hot Wall Epitaxy); ионная имплантация; комбинирование сверхзвуковой вибрации и вращения электрода дугового источника; нетермический синтез наночастиц в плазме; химический синтез со звуковыми колебаниями (sonochemical synthesis); микроволновый химический синтез; импульсная лазерная абляция (ИЛА) в жидкой среде; золь-гель синтез; спрей-пиролиз; гидротермический метод; механохимический метод; газофазная конденсация и плазмохимический метод; химический синтез из газовой фазы (CVS).

Вывод: квантовые точки, наночастицы и нанопорошок были известны в основном как объекты физических опытов; за исключением сканирующей зондовой микроскопии, квантовые точки, наночастицы и нанопорошок получают

традиционными для микроэлектроники, но модернизированными методами.

Нанотрубки, нанопроволока — катоды с полевой эмиссией (автоэмиссией), решетки поляризатора в оптических выключателях, поляризаторы, модуляторы, плоские дисплеи, нанофотонные детекторы (наносветодиоды), углеродные нанотрубки (Carbon nanotubes' — CNTs). Они обладают уникальными физическими свойствами: высокой прочностью (предел прочности растяжения в 8 раз больше, чем у коррозионно-стойкой стали), малой массой, высокой термической (в 5 раз больше, чем у меди) и электрической проводимостью, большой площадью поверхности.

Методы получения: углеродные нанотрубки получают синтезом из газовой смеси в дуговом разряде; лазерным выпариванием, пиролизом, стимулированным плазмой или температурой CVD; методом высокотемпературной дуговой печи; дуговым разрядом между графитовыми электродами в вакууме; синтезом в пористом материале из раствора; золь-гель методом; методом быстрого нагрева; электроосаждением в пробитых тяжелыми ионами отверстиях в фольге толщиной 30 мкм; электроосаждением внутри прямолинейных пор диаметром 50 нм поликарбонатной мембраны.

Выводы: нанотрубки и нанопроволока являются принципиально новыми материалами для нанотехнологии, поэтому для их получения используются как традиционные для микроэлектроники, но модернизированные методы, так и новые, но достаточно очевидные приемы — формирование нанотрубок и нанопроволоки внутри пористых материалов.

Нанопленки — благодаря набору уникальных механических, электрических, магнитных и оптических свойств на основе нанопленок получают приборы с эф-

фектом гигантского магнитного сопротивления (ГМС), прозрачные проводящие оксиды (ТСО — transparent conductivity oxides) на стекле в качестве электродов для солнечных батарей или автомобильных стекол, сверхпроводящие тонкие пленки, перестраиваемые лазеры с большим КПД и высокой когерентностью, фотонные кристаллы и другие изделия с новыми показателями качества, например, сверхтонкая (10—30 нм) Si пленка лучше защищает металлическую посуду, чем традиционное хромирование.

Методы получения: реактивное магнетронное распыление; пиролиз при 500 °C; золь-гель метод; химическое осаждение из раствора; ВЧ распыление композитной мишени; дуговое осаждение; ионно-плазменное распыление.

Выводы: приставка "нано" сильно повлияла на показатели качества изделий на основе нанопленок, но не на методы их получения — традиционные для микроэлектроники и с минимальными изменениями.

Монолитный наноструктурированный и нанопористый материал — в качестве примеров изделий можно назвать ИК эмиттер в фотонном кристалле, сенсоры и оптоэлектронные устройства, высокоэффективные солнечные элементы; к готовым к промышленному применению результатам можно отнести "печатную электронику" (Printable Electronics), а также сплавы с уникальным сочетанием прочности и пластичности.

Методы получения: электрохимическое травление макропор в кристаллическом кремнии после процесса литографии и заполнения пор; гидротермальная реакция; метод равноканального углового прессования (Equal Channel Angular Pressing — ECAP); метод плавления с быстрым охлаждением (этим методом получен новый сплав $\text{Cu}_{60}(\text{Zr или Hf})_{30}\text{Ti}_{10}$); нанолитография — получение

трехмерных оттисков (реplik) с разрешением менее 20 нм.

Выводы: в получении и применении монолитных наноструктурированных и нанопористых материалов наиболее сильно перемешались традиционные и появившиеся в последнее время методы получения изделий с новыми показателями качества.

"Шансы и риски нанотехнологии"

Были сформулированы критерии отбора нанотехнологических проектов, достойных государственного финансирования и определены наиболее продвинутые разработки в области нанотехнологии и наноструктурированных материалов.

Среди них: **источники энергии, хранение водорода, газовые сенсоры, износостойкие и антифрикционные покрытия, краски с наночастицами, самоочищающиеся фильтры и стекла.**

Были выделены области, которым нанотехнология дала новый импульс развития:

- **нанобиотехнология** — ощущение и проверка биологических объектов с помощью наноструктурированных материалов, медицинские устройства и инструмент, биологическая и биомедицинская аналитика, искусственная кость, включенная в обмен веществ организма человека, косметика;
- **наноструктурированные материалы и покрытия** — уникальное сочетание сверхвысокой твердости и пластичности;
- **антиотражающие нанопористые полимерные пленки**, солнечные батареи на ультратонких слоях и т. п. в оптике и оптоэлектронике;
- **нано- и микроинтерфейсы:** микрореакторы, сенсоры ("электронный нос", "электронный язык" и др.);

- микро- и нанoeлектромеханические системы (МЭМС и НЭМС);
- магнитная запись с терабитной плотностью при размерах зерен 7–8 нм.

Наноаналитика — сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ); оптическая трехмерная (3D) микроскопия; сверхвысоковакуумный СЗМ с дополнительной аналитикой (рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия ХПС и др.); рентгеновская аналитика на основе нанокристаллов; непрерывная технологическая аналитика; кристаллография с нанометровым разрешением и количественным химическим анализом; измерение магнитных полей с помощью датчика Холла, ядерного магнитного резонанса (NMR), магнитного потока и др., наноиндентирование для измерения механических свойств (твердости, модуля Юнга и т. п.) мате-

риалов, просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), в том числе для изучения процесса коалесценции кластеров (10 нм) осаждаемой пленки или во время (in situ) отжига, эталоны нанометровых размеров.

Моделирование и компьютерная имитация процессов и устройств на нанометровом уровне — осаждение кластеров и изучение этого процесса методом Монте-Карло и молекулярной динамики на атомарном уровне; имитация начальной стадии золь-гель процесса путем расчета взаимодействия большого числа отдельных адсорбированных молекул с поверхностью твердого тела, выделенных из жидкой фазы; методика расчета поверхностной энергии как функции размера и формы нанокристалла.

Наноперемещения и нанотрибология. Известны два основных метода манипулирования мате-

риалами с помощью АСМ: непосредственным контактом иглы кантилевера с поверхностью объекта и возбуждением резонансной частоты (кГц) колебаний кантилевера (бесконтактный метод). Манипулятор для нанометрового масштаба с обратной связью "NanoFeel™ 300" предназначен для совместной работы с АСМ по перемещению нанообъектов, таких как углеродные нанотрубки, вирусы, кластеры и т. п. Zyvex S100 наноманипулятор предназначен для манипулирования и измерения нанообъектов, например, углеродных нанотрубок, нанопроволок и нанокатушек, МЭМС.

Литература

1. 7th International Conference on Nanostructured Materials / Book of Abstracts. June 20–24, 2004, Wiesbaden/Germany, 412 p.

УДК 537.533.2

С. К. Гордеев, д-р техн. наук, **С. Б. Корчагина**, ФГУП "Центральный НИИ материалов", г. Санкт-Петербург,
А. М. Ламанов, **М. М. Ламанов**, МФТИ, г. Москва,
А. М. Мойя, **С. П. Слепнев**, ФГУП НИИ "Полус", г. Москва,
Е. П. Шешин, МФТИ, г. Москва,

НОВАЯ МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ ИЗ ГРАФИТОВОЙ ФОЛЬГИ

Приведены результаты исследований автоэмиссионных свойств катодов, изготовленных из графитовой фольги. Эмиссионные центры на ее поверхности сформированы с помощью лазерного маркера. Для исследуемых катодов пороговое поле, при котором автоэмиссионный ток составляет 1 мкА, было ниже 3 В/мкм.

Введение

В настоящее время автоэмиссионные катоды (АЭК) из углеродных материалов находят все большее применение в различных областях электрони-

ки. В частности катоды такого типа часто используются при создании источников света и плоских дисплейных экранов [1, 2, 5]. При разработке плоских экранов необходимо использовать АЭК с большой площадью рабочей поверхности (от десятков до сотен квадратных сантиметров), причем важным требованием является однородность ее структуры.

Огромное число работ посвящено описанию методов создания таких катодов. Один из путей — приготовление порошков из углеродных волокон, из других графитов и последующее нанесение их на поверхность катода с использованием различных методов: трафаретной печати, электрофореза, аэрозольного напыления и др. [3]. Однако такому подходу присущ ряд недостатков: добавление в порошок составов, обусловленных технологией нанесения, может вызвать неконтролируемые химические реакции с углеродным порошком; отсутствует достаточная повторяемость геометрических параметров на поверхности катода. Другой способ — использование различных методов газофазного осаждения для изготовления катодов на основе углеродных нанотрубок, алмазных пленок и т. д. [4, 6] — делает невозможным применение подложек из стан-

дартных вакуумных стекол, поскольку большинство таких методик газофазного осаждения высокотемпературные.

В статье предлагается новый метод создания катодов большой площади с однородной структурой поверхности — с использованием графитовой фольги в качестве материала для автокатада и формированием эмиссионных центров на ее поверхности лазерным маркером. Производство графитовой фольги в промышленности налажено в больших объемах, поэтому ее использование при изготовлении АЭК решает проблемы, связанные с плохой повторяемостью свойств, труднодоступностью и дороговизной материала. А формирование эмиссионных центров на поверхности фольги с помощью лазера позволит создавать однородный развитый рельеф на поверхности катода любой площади и формы, что даст возможность использовать данный АЭК как в дисплейных экранах, так и в статических указателях.

Конструкции исследуемых образцов

При исследовании катод представлял собой подложку в виде обычного вакуумного стекла со слоем ИТО, на которую с помощью проводящей пасты наклеивали графитовую фольгу площадью 5×5 мм и толщиной около 200 мкм.

Далее с помощью установки лазерной маркировки КВАНТ-60М на поверхности фольги исследуемых образцов был нанесен рельеф двух типов: в виде кратеров диаметром ~60 мкм и расстоянием между центрами, равным диаметру, и в виде сетки с шириной ячейки 50 мкм. Схематически катодные образцы изображены на рис. 1. РЭМ изображение образцов представлено на рис. 2, а, б.

Экспериментальная установка

Изготовленные катодные образцы испытывались в диодных конструкциях. В качестве анода использовалась стеклянная пластина с нанесенным на нее проводящим слоем ИТО и люминофора. Расстояние между поверхностью фольги и анодом, задаваемое с помощью стеклянных спейсеров, составляло 350 мкм. Давление остаточных газов в ва-

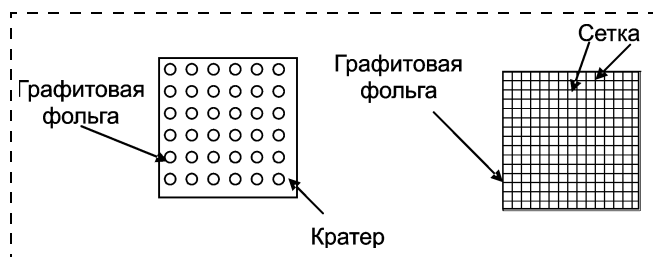


Рис. 1. Схематическое изображение катодных образцов

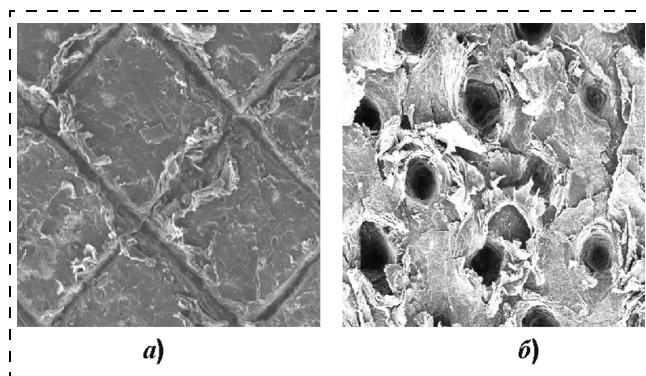


Рис. 2. РЭМ изображение образца с рельефом поверхности: а — в виде сетки; б — в виде кратеров

куумной камере во время проведения экспериментов было менее $3 \cdot 10^{-7}$ Торр ($4 \cdot 10^{-5}$ Па).

Для изучения эмиссионных свойств катодов использовался автоматизированный измерительный стенд, принципиальная схема которого приведена на рис. 3. Его основными элементами являются: управляющий компьютер, цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и высоковольтный источник питания. Данная система позволяет проводить измерения эмиссионного тока в пределах 0...1 мА с шагом 0,3 мкА, а напряжения — 0...10 кВ с шагом 2,3 В.

Испытания катодов проходили в режиме стабилизации автоэмиссионного тока. В качестве схемы эксперимента была выбрана методика ступенчатой тренировки катода. Суть данного метода заключалась в следующем. Каждый катод включали до уровня тока автоэмиссии 100 мкА в течение 5 ч, затем ток увеличивали на 20 мкА на заданный промежуток времени и т. д. вплоть до 250 мкА. Стабилизацию значения тока автоэмиссии осуществляли с помощью высоковольтного источника питания. В процессе исследований выполнялось ежесекундное измерение напряжения, необходимого для поддержания требуемого уровня тока. Для определения динамики изменения параметров АЭК (эффективной площади, форм-фактора и др.) в ходе испытаний измеряли серии из трех вольт-амперных характеристик с интервалом 10 мин.

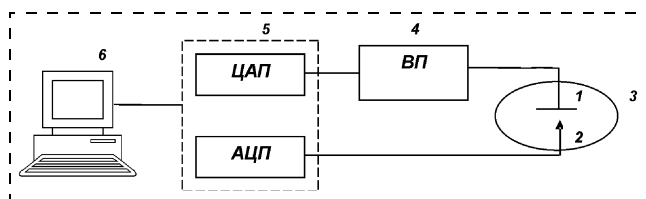


Рис. 3. Схема измерительного стенда:

1 — анод; 2 — катод; 3 — вакуумная камера; 4 — высоковольтный источник питания; 5 — цифроаналоговый и аналого-цифровой преобразователи; 6 — управляющий компьютер

Полученные результаты

Катод первого типа. Во время испытаний катода с нанесенным рельефом в виде сетки четко прослеживалось лишь несколько эмиссионных центров (рис. 4, а) вплоть до тех пор, пока ток автоэмиссии не стал равным 250 мкА, когда примерно через 1 ч работы началось лавинное разрушение активных эмиссионных центров. После этого произошло резкое увеличение напряжения до 3,5 кВ, при этом ток автоэмиссии не превышал 30 мкА, а автоэмиссионная картина стала равномерной (рис. 4, б). При этом значение форм-фактора для этого образца уменьшилось более чем в 3 раза (до увеличения напряжения оно составляло $1,4 \cdot 10^{-6}$ 1/Å, а после $5,1 \cdot 10^{-7}$ 1/Å). Наиболее вероятным объяснением данного эффекта является то, что во время прожигания сетки лазерный луч образует рваные неоднородные неровности. Это отчетливо видно на рис. 2, а. Именно с этих неровностей происходит первоначальная эмиссия. После их разрушения поверхность фольги становится равномерной, но рельеф перестает быть развитым (происходит резкое уменьшение форм-фактора, как было показано ранее). Поэтому метод изготовления катодов данного типа был признан неэффективным.

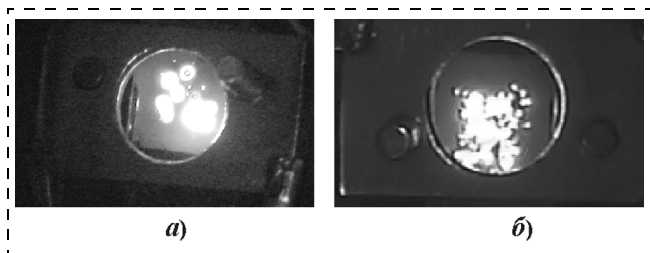


Рис. 4. Автоэмиссионное изображение катода с рельефом поверхности в виде сетки:
а — до разрушения; б — после разрушения

Катод второго типа. График зависимости напряжения от времени в процессе испытаний для катода с кратерами на поверхности представлен на рис. 5. Как видно из графика, примерно через 12 ч работы катода произошло резкое падение рабочего напряжения. В дальнейшем в ходе испытаний при увеличении тока происходило ступенчатое увеличение напряжения, но заметной деградации катода не происходило. Резкое изменение рабочего напряжения может быть легко пояснено на основе эмиссионного изображения данного катода (рис. 6). Из рисунка четко видно резкое увеличение числа эмиссионных центров примерно через 6 ч после начала испытаний и через 12 ч, что объясняет увеличение эффективно-

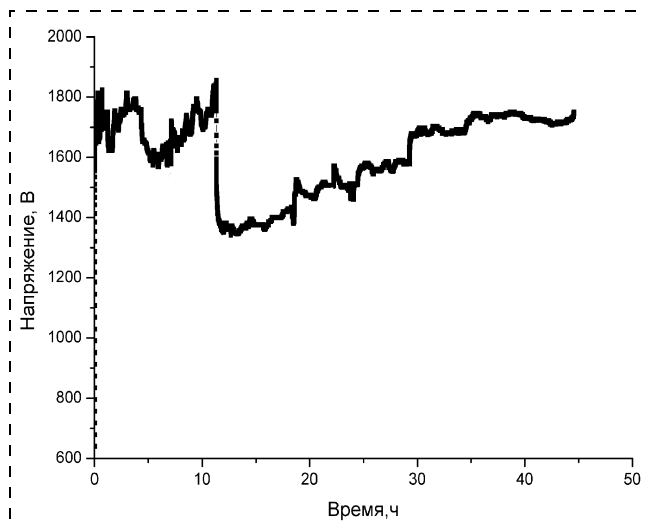


Рис. 5. Нарботка по напряжению в процессе испытаний:
область I соответствует току 100 мкА; II — току 120 мкА; III — току 140 мкА; IV — 160 мкА; V — 200 мкА; VI — 250 мкА

сти катода, а следовательно, и уменьшение напряжения в этих временных участках.

Выводы, сделанные из наблюдения эмиссионной картины, подтверждаются анализом графиков динамики изменения форм-фактора и эффективной площади (рис. 7, а и рис. 7, б соответственно). Из графиков можно заключить, что в процессе испытаний катода идет его тренировка. На графике рис. 7, б четко прослеживается тенденция увеличения эффективной площади эмитирующей поверхности. Через 40 ч видно, что параметры катода стабилизируются, это говорит об окончании процесса тренировки.

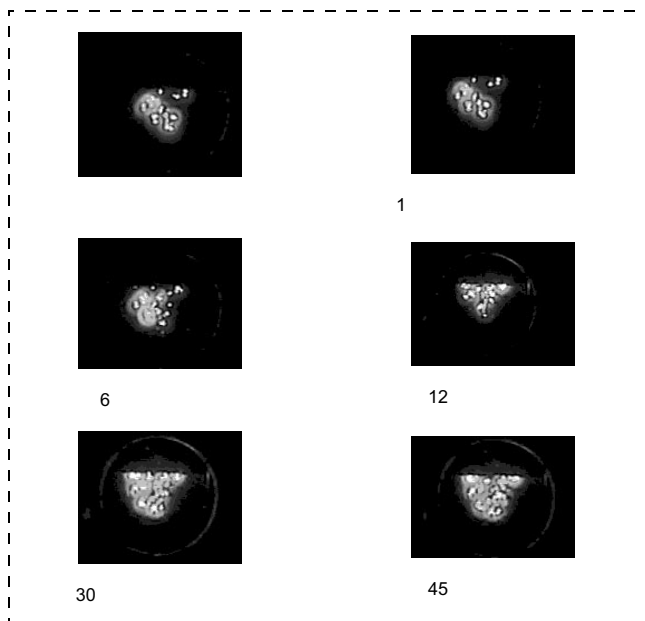


Рис. 6. Эмиссионная картина образца с кратерами

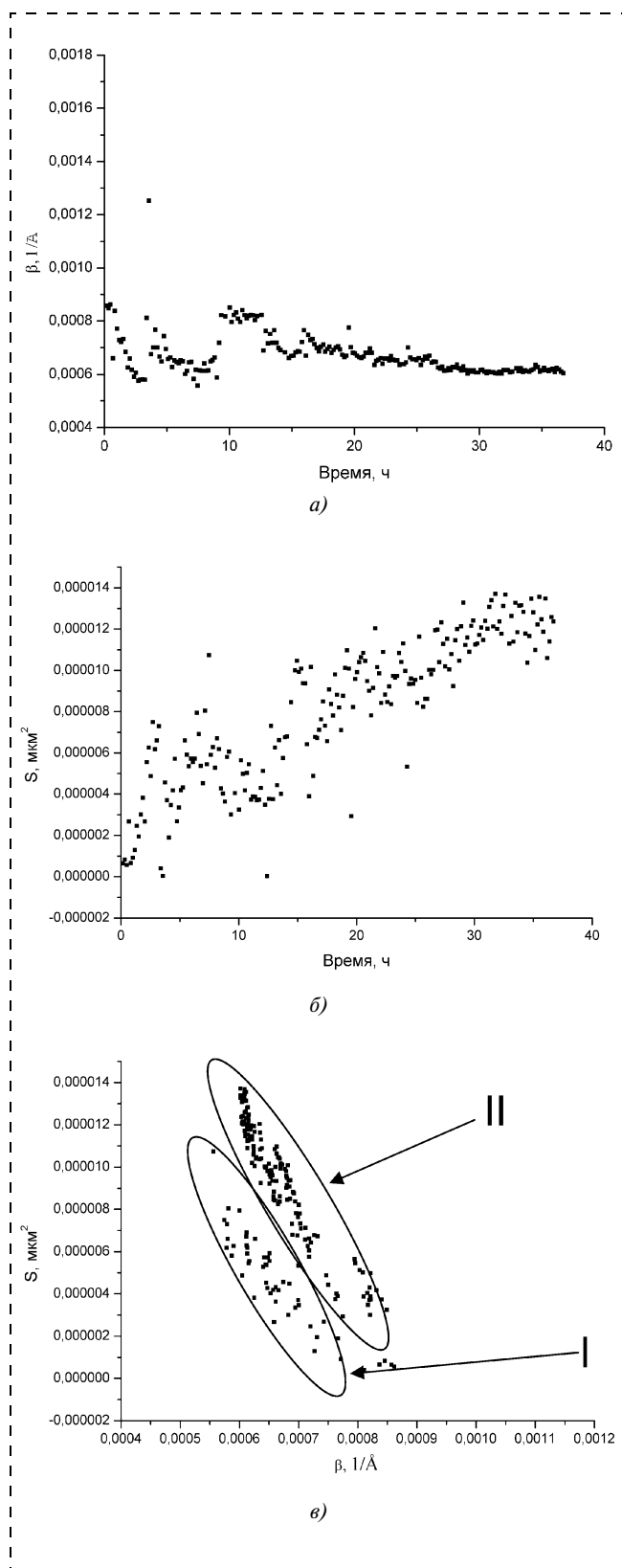


Рис. 7. Образец с кратерами:

a — динамика изменения форм-фактора; *б* — динамика изменения эффективной площади эмитирующей поверхности; *в* — зависимость эффективной площади эмитирующей поверхности от форм-фактора

Анализируя зависимость эффективной площади эмитирующей поверхности от форм-фактора (рис. 7, *в*), можно сделать вывод, что в процессе работы (а именно через 12 ч) произошла перестройка поверхности катода, так как на графике можно четко выделить две области, которые соответствуют эмиссионным центрам двух типов.

Выводы

Проведенные эксперименты показали возможность простого процесса изготовления автоэмиссионных катодов из графитовой фольги большой площадью с однородной структурой поверхности. С использованием данной методики были изготовлены образцы автоэмиссионных катодов, отличающихся различной топографией поверхности катода: кратеры диаметром ~60 мкм и расстоянием между центрами равным диаметру; сетка с шириной ячейки 50 мкм.

Исследования эмиссионных свойств показали, что наилучшими характеристиками обладают катоды с топографией в виде кратеров.

Результаты исследования стабильности катодов выявили, что эмиссионные параметры катода с топографией поверхности в виде кратеров стабилизируются при тренировке методом увеличения токовой нагрузки, после которой при плотности тока, отбираемого с катода, порядка 1 мА/см² исследуемые АЭК практически не подвержены деградации.

Список литературы

1. Talin A. A., Dean K. A., Jaskie J. E. Field emission displays: a critical review // *Solid-State Electronics*. 2001. 45. P. 963–976.
2. Dijon X. J., Fournier A., Goisard de Monsabert T., Montmayeul B., Zanghi D. Carbon Nanotubes for Field Emission Displays // *Molecular Nanostructures: XVII International Winterschool/Euroconference on Electronic Properties of Novel Materials*, 2003.
3. Yukui Li, Changchun Zhu, Xingui Liu. Field emission display with carbon nanotubes cathode: prepared by a screen-printing process // *Diamond and Related Materials*. 2002. 11. P. 1845–1847.
4. Ikuno Takashi, Yamamoto Tetsuro, Kamizono Motoki, Takahashi Syunji, Furuta Hiroshi, Honda Shin-ichi, Ohkura Shigeharu, Katayama Mitsuhiro, Hirao Takashi, Oura Kenjiro. Large field emission from carbon nanotubes grown on patterned catalyst thin film by thermal chemical vapor deposition // *Physica*. 2002. B 323. P. 171–173.
5. Choi Y. S., Kang J. H., Kim H. Y., Lee B. G., Lee C. G., Kang S. K., Jin Y. W., Kim J. W., Jung J. E., Kim J. M. A simple structure and fabrication of carbon-nanotube field emission display // *Applied Surface Science*. 2004. 221. P. 370–374.
6. Choi G. S., Son K. H., Kim D. J. Fabrication of high performance carbon nanotube field emitters // *Microelectronic Engineering*. 2003. 66. P. 206–212.

УДК 621.3

Ю. Ф. Адамов*, д-р техн. наук, проф.,
Я. С. Губин**,
С. А. Кокин, канд. техн. наук,
С. В. Макаров*, канд. техн. наук, О. А. Сомов**,
* ООО "Юник Ай Сиз";
** аспирант ИРЭ РАН

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ АНАЛОГОВЫХ БЛОКОВ ДЛЯ "СИСТЕМ-НА-КРИСТАЛЛЕ" ПРИ СМЕНЕ ТЕХНОЛОГИИ

Предложена новая методика параметризации аналоговых и аналогово-цифровых блоков путем масштабного преобразования при изменении спецификаций или технологии изготовления. Функциональная верификация масштабированных блоков выполняется с учетом паразитных емкостей и сопротивлений проводников. Для ускорения моделирования экстракции используется автоматическое упрощение схемы, уменьшающее число паразитных элементов. Адекватность применяемых преобразований проверяется на примере исследования СФ — блока программируемого высокочастотного синхрогенератора.

"Системы-на-кристалле" (СНК) — это метод проектирования заказных микросхем на основе заранее разработанных сложнофункциональных блоков (СФ-блоков). Возможность многократного использования СФ-блоков значительно повышает производительность проектных работ и снижает их стоимость. Основная проблема этого метода проектирования — отсутствие действительно универсальных СФ-блоков и необходимость их доработки для каждого проекта. Поэтому методика адаптации СФ-блока к требованиям конкретного проекта СНК является одной из актуальных задач современной схемотехники.

В классе полностью цифровых СФ-блоков расширение их функциональных возможностей достигается путем применения программируемых узлов и встроенных микропроцессорных ядер. Технологическая универсальность цифровых устройств обеспечивается наличием синтезируемой модели на языке высокого уровня (VHDL или Verilog). Электрическая схема и топология цифрового блока могут быть синтезированы автоматическими средствами САПР при наличии VHDL/Verilog мо-

дели и подробного описания. Управление быстродействием и потребляемой мощностью осуществляется при синтезе электрической схемы путем выбора специализированной библиотеки логических элементов.

Значительно сложнее создать унифицированные аналоговые и аналогово-цифровые СФ-блоки. Аналоговые блоки функционально менее разнообразны, чем цифровые, поэтому выбрать требуемый готовый функциональный блок не очень сложно. Проблема состоит в том, что параметры аналогового блока и технология его изготовления связаны в сложный единый комплекс. При изменении проектных норм, модернизации технологии или переносе проекта на другую фабрику приходится заново оптимизировать электрическую схему аналогового блока, чтобы достичь требуемых параметров. Совершенно не очевидно, что эта работа может завершиться успехом.

Авторами предлагается новая методика ускоренной параметрической оптимизации и функциональной верификации аналоговых и аналогово-цифровых блоков при смене технологии их изготовления.

Методика рассчитана на применение унифицированных технологических процессов изготовления КМОП-микросхем с проектными нормами не менее 0,18 мкм. Унификация процессов по составу фотомасок и набору элементов физической структуры позволяет формально перенести проект с одной фабрики на другую, используя только автоматические преобразования топологической информации (коррекция размеров и масштабирование). Электрические параметры конструктивных элементов и всего блока могут при этом существенно измениться.

На первом этапе параметрической оптимизации выполняются два-три масштабных преобразования исходной топологической информации. Затем в автоматическом режиме вычисляются параметры элементов схемы для всех вариантов топологии блока.

На втором этапе выполняется расчет основных электрических параметров для всех вариантов. На основе расчетов строятся аппроксимирующие зависимости выходных электрических параметров от коэффициентов масштабирования. Далее определяется коэффициент масштабирования топологии, обеспечивающий комплекс электрических параметров, наиболее близкий к требованиям спецификации на проект СНК. При этом возможен вари-

ант, при котором разные фрагменты аналогового СФ-блока будут иметь разные коэффициенты масштабирования.

На *третьем этапе* выполняется подготовка топологии аналогового блока в соответствии с прогнозом, полученным на втором этапе, а также рассчитываются выходные электрические параметры. Решение о возможности использования масштабированного СФ-блока должно приниматься на основе результатов моделирования его работы в составе СНК.

Если расчетные параметры масштабированного блока не удовлетворяют требованиям спецификации на СНК, то потребуется повторение процедуры с другим проектом или разработка собственного оригинального СФ-блока. Однако в большинстве случаев путем масштабирования аналоговых блоков можно добиться удовлетворительного результата всего за несколько дней.

Этот простой и очевидный метод коррекции параметров аналоговых блоков не получил широкого распространения потому, что отсутствовала методика адекватного моделирования аналоговых схем с субмикрометровыми размерами элементов. Ключевым в методике является этап функциональной и параметрической верификации масштабированного аналогового блока. Моделирование схемы на этом этапе выполняется с учетом паразитных емкостей и сопротивлений проводников. При этом число узлов электрической схемы может возрасти многократно. Программа экстракции представляет каждый прямоугольный участок проводника и каждый переход между уровнями металлизации в виде отдельных резистивных и емкостных элементов. Модель проводника может содержать десятки и сотни последовательно включенных R/C ячеек. Моделирование электрической схемы требует много времени и огромных вычислительных ресурсов, поэтому схему следует упростить. После экстракции параметров паразитных элементов из топологии электрическая схема должна быть отредактирована автоматическими средствами. В модели первого приближения сопротивление проводников вообще не учитывается, а емкости всех участков одного проводника объединяются в одном конденсаторе. В этом приближении число узлов в схеме вообще не увеличивается. Однако в субмикрометровых технологиях влияние сопротивлений проводников на параметры аналоговых блоков может быть очень значительным. До недавнего времени отсутствовала проверенная методика подготовки электрической схемы к моделированию с одновременным учетом емкостей и сопротивлений проводников. В настоящей статье предложена ме-

тодика учета сопротивлений проводников при моделировании аналоговых схем.

На первом этапе коррекции электрической схемы объединяются все резисторы в каждой ветви проводника. Если ветвления проводника нет, то резистор остается всего один. На втором этапе обнуляются сопротивления, которые много меньше выходных сопротивлений управляющих каскадов. Пороговые величины для обнуления резисторов могут быть заданы пользователем или определены автоматически. Например, при ширине n -канального МОП-транзистора, равной 10 мкм, его сопротивление не может быть меньше 300 Ом. Сопротивление проводника, подключенного к истоку или стоку, может не учитываться, если оно меньше 30 Ом. На третьем этапе ветви проводников с резисторами заменяются П-образной эквивалентной схемой с одним последовательным резистором и двумя конденсаторами, подключенными к проводнику и общей шине. Далее все конденсаторы в одном узле схемы объединяются. Так мы получаем более точную модель второго приближения. Однако остается открытым главный вопрос — в каких случаях второе приближение является адекватным? Ответ на этот вопрос мы попытаемся дать на примере исследования СФ-блока программируемого высокочастотного синхрогенератора.

Первоначально блок синхрогенератора был разработан для КМОП-технологии с проектными нормами 0,25 мкм. Диапазон рабочих частот — от 300 до 600 МГц. Блок включает достаточно сложную цифровую часть и три аналоговых узла:

- управляемый кольцевой генератор;
- цифроаналоговый 8-разрядный преобразователь;
- функциональный термозависимый источник тока.

Стабилизация частоты генератора достигается использованием системы фазовой автоподстройки частоты с кварцевой стабилизацией. Блок изготовлен в тестовом кристалле на одной из фабрик Юго-Восточной Азии и аттестован.

Задание на модернизацию СФ-блока требовало изменить диапазон рабочих частот (от 200 до 400 МГц) и обеспечить совместимость с КМОП-технологией другой фабрики, характеризуемой проектными нормами 0,18 мкм.

При модификации блока цифровая часть была синтезирована заново на основе другой библиотеки элементов. Аналоговая часть настроена на заданный диапазон частот путем обратного масштабирования (увеличением размеров элементов). Функциональная и параметрическая верификация выполнены с учетом только емкостей проводников (первое приближение). СФ-блок был изготовлен в составе тестового кристалла, результаты измерений

которого показали большое отличие от компьютерной модели. Диапазон программируемых частот уменьшился (от 200 до 300 МГц), а на частотах выше 300 МГц генератор работал нестабильно.

Для повторного анализа схемы синхрогенератора был использован новый программный продукт — система AVOCAD [1]. В составе системы имеется программный модуль, осуществляющий автоматическое редактирование электрической схемы после извлечения паразитных параметров проводников из топологии. С использованием этого модуля получена модель второго приближения электрической схемы в соответствии с предложенной методикой. Расчет второго приближения для схемы синхрогенератора в системе AVOCAD показал хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов. Причиной снижения диапазона рабочих частот стал недостаточный коэффициент передачи в цепи обратной связи системы фазовой автоподстройки частоты. Необходимая коррекция электрической схемы потребовала только изменения ширины двух выходных транзисторов цифро-аналогового преобразователя. В дальнейшем расчетные данные были подтверждены экспериментально.

Для оценки необходимых ресурсов приведем **основные характеристики процесса моделирования синхрогенератора:**

- число транзисторов в СФ-блоке — более 3000;
- число узлов в схеме второго приближения — более 100 000;

- число рассчитанных циклов выходной частоты — 8000—12 000;
- используемый компьютер — Pentium IV (2800 МГц);
- используемая программа моделирования — AVOCAD;
- время расчета одного варианта схемы в модели второго приближения — менее 1 ч;
- время расчета одного варианта схемы в модели первого приближения — менее 20 мин.

Выводы

Исследования синхрогенератора подтверждают адекватность модели второго приближения при анализе аналоговых схем с проектными нормами не менее 0,18 мкм и работающих на частотах до 500 МГц. Очевидно, что модель второго приближения имеет еще резервы по уменьшению проектных норм и повышению рабочих частот аналоговых блоков. С увеличением производительности компьютеров возможно применение еще более сложных моделей.

Предложенная методика позволяет проводить параметризацию аналоговых блоков путем масштабного преобразования топологии при изменении спецификаций или технологии изготовления.

Литература

1. <http://www.avocad.com>.

ВТОРАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

"ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ"

(Научно-технологические, экономические, юридические, политологические, социальные и международные аспекты)

07—09 февраля 2006 г. Санкт-Петербург, Россия

Организаторы: Институт оптики атмосферы СО РАН, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Военная академия связи им. С. М. Буденного МО, Балтийский государственный технический университет "Военмех" им. Д. Ф. Устинова, Академия стратегических исследований, информации и высоких технологий, Институт телекоммуникаций, Общенациональный конгресс молодежи, Санкт-Петербургский торгово-промышленный дом и другие институты, университеты и организации.

На пленарных и секционных заседаниях Конференции предлагается рассмотреть, в частности, следующие вопросы:

- Информационные и компьютерные технологии, робототехника, радиоэлектроника, телекоммуникационные системы, прикладная математика, прямые и обратные задачи, программирование и научное приборостроение.
- Физика и техника электрических разрядов, оптических, лазерных, плазменных, пленочных и нанотехнологий, электроники.
- Порошковая металлургия, материаловедение, композиционные материалы и упрочняющие технологии.
- Биотехнология, медицина, генетика, цитология, сельское хозяйство, экология.
- Высокие технологии и высокотехнологическая промышленность в XXI веке. Состояние, аналитика, прогноз.

Подробную информацию можно получить на сайте: <http://htfi.ru>.

УДК 537.876.23, 537.874.6, 537.874.2

М. Ю. Барабаненков, д-р физ.-мат. наук,
В. В. Старков, канд. техн. наук,
Институт проблем технологии микроэлектроники
и особочистых материалов (ИПТМ) РАН,
г. Черноголовка, Московская область

МИКРОЗЕРКАЛА НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР ИЗ МЕТАЛЛО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТРУБОК

Двумерные периодические структуры, состоящие из полых трубок диоксида кремния, упакованных в квадратную решетку, изготовлены методом микроstructuring с использованием макропористого кремния. Теоретически исследованы спектры отражения и пропускания в среднем ИК диапазоне ТЕ-поляризованных электромагнитных волн диэлектрических и металло-диэлектрических структур, получаемых в результате виртуальной металлизации внутренней поверхности трубок. Установлена зависимость спектральной ширины и амплитуды фотонной запрещенной зоны в спектре структур от толщины стенки диэлектрических трубок. Показано, что металло-диэлектрические структуры проявляют свойства делителя пучков и микрзеркала с высоким коэффициентом отражения.

Введение

Существенную часть кремниевой микрофотоники [1] — направления в физике и технологии, объединившего фотонику и микроэлектронику, составляют технологические аспекты изготовления микро- и наноразмерных фотонных кристаллов или, в более общем случае, фотонных структур (ФС) и исследования их оптических свойств. Несмотря на разнообразие конструкций и используемых материалов, уникальные оптические свойства этих искусственных "рукотворных" кристаллов определяются пространственно периодическим расположением некоторого элементарного рассеивателя и внутренним устройством рассеивателя ("атома"). Периодическое изменение "оптических" свойств может воздействовать на электромагнитное (ЭМ) поле, т. е. на фотоны, тем же образом, каким кристаллическое поле воздействует на электроны. ЭМ поле приобретает модальную структуру; дисперсионное соотношение для фотонов становится нелинейным; в зонной диаграмме появляется фотонная запрещенная зона (ФЗЗ), а в час-

тотной зависимости плотности состояний — щель [2]. ФЗЗ в энергетической диаграмме, например, двумерных (2D) ФС обуславливает, в частности, функционирование структур в режиме зеркала или поляризатора по отношению к внешнему ЭМ излучению из частотного диапазона ФЗЗ.

Наличие частотных диапазонов блеска в спектрах прозрачности 2D ФС позволяет разработать на их основе планарные микрзеркала для микрооптоэлектромеханических систем (МОЭМС), интегрирующих электронные, механические и оптические устройства микрометровых размеров.

Другое актуальное предназначение микрзеркал с малыми потерями — это торцевая оптическая изоляция [3, 4] полупроводниковых гетероструктур светоизлучающих диодов ($\lambda \approx 0,15...0,17$ мкм) и квантовых каскадных лазеров, генерирующих излучение в средней ИК области частот ($\lambda = 9$ мкм [5]) или в прилегающем к этой области высокочастотном крае терагерцового диапазона $\nu < 30$ ТГц, $\lambda > 10$ мкм (см., например, [6]).

Как известно, плоский слой со свойствами 2D ФС может быть образован однородными по сечению стержнями, окруженными, например, воздухом, или представлять собой слой диэлектрика с воздушными или заполненными порами. Оба типа ФС имеют преимущества и недостатки. В частности, ФЗЗ в спектре системы диэлектрических стержней устойчива по отношению к деформации их формы [7]. Вместе с тем, максимальная (в теории) ширина ($\Delta\omega$) ФЗЗ в спектре прохождения системы регулярных пор ($\Delta\omega/\omega^* = 0,35$, где ω^* — частота середины ФЗЗ) превышает аналогичное значение в случае системы стержней ($\Delta\omega/\omega^* = 0,25$). При этом слой пор, толщина которого равна длине образующей пор, в 4 раза тоньше слоя стержней [8].

В серии работ [9—12] предложен метод формирования 2D ФС, состоящих из полых стержней (трубок) диоксида кремния, образующих, например, квадратную решетку. Упорядоченные системы трубок являются промежуточной конструкцией между стержневыми и пористыми ФС и могут наследовать их лучшие свойства. Кроме того, оптические свойства пористых ФС могут быть изменены посредством заполнения (инфильтрации) объема пор или покрытия поверхности пор подходящим веществом. В частности, поры могут быть заполнены металлом.

Целью данной работы является исследование возможности изготовления микрзеркал на основе двумерных периодических структур, состоящих из металлизированных трубок диоксида кремния.

Метод формирования упорядоченной системы полых диэлектрических трубок

Формирование 2D ФС методом полного окисления макропористой матрицы Si было предложено в работах [9, 10]. Отрицательное влияние разбухания Si при окислении описано в работе [12]. Согласно [12] периодическая система полых трубок формируется методом электрохимического травления кремния (*p*-Si, (100), 80—100 Ом·см) с последующим частичным термическим окислением макропористой матрицы. На поверхности кремния формируется топологический рисунок затравок, которые при последующем глубоком анодном травлении растравливаются в поры. Затравки в виде инверсных пирамид создаются стандартной фотолитографией и щелочным травлением. Далее кремний подвергается частичному термическому окислению. Критерием степени окисления служит толщина слоя оксида, при которой возникающие в месте расположения пористой структуры напряжения не приводят к короблению пластины, не препятствуя, тем самым, проведению двухсторонней фотолитографии. Вскрытие окон в маске SiO₂ под областями расположения пор проводится в режиме стандартного процесса фотолитографии с обратной стороны пластины. Полученные периодические структуры изображены на рис. 1.

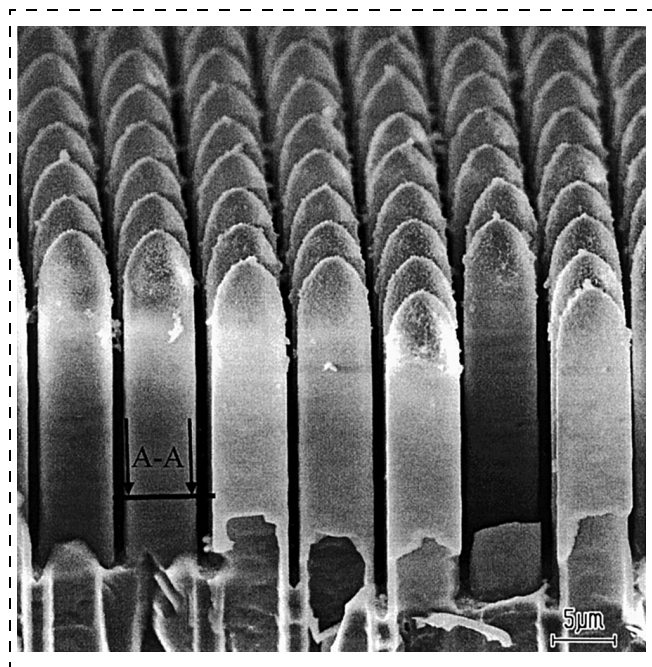


Рис. 1. РЭМ изображение (вид сбоку) периодической структуры, состоящей из полых стержней SiO₂, образующих квадратную решетку с периодом $\Lambda = 7,3$ мкм. Макушки стержней имеют профиль, близкий к параболическому. Внешний и внутренний диаметры трубок (см. сечение AA трубки на вставке рис. 2) равны $2\rho_1 = 6,3$ и $2\rho_2 = 4,3$ мкм, соответственно. Толщина ρ_{12} стенки трубок и зазор между ними равны 1 мкм. Высота трубок 27 мкм

Оптические свойства 2D металло-диэлектрических ФС

Моделирование оптических свойств систем упорядоченных трубок (рис. 1) проведено на основе метода работы [13]. Рис. 2 иллюстрирует схему расчета. Двумерная ФС рассматривается как стопка дифракционных решеток, разделенных воздушными зазорами. Каждая решетка представляет собой ряд латерально эквидистантно расположенных трубок. Расчет отражения по мощности падающего излучения проводится последовательно для каждого ряда трубок с учетом набег фазы волны при ее распространении между рядами. Начиная с двух слоев, трубки образуют квадратную решетку с постоянной решетки $\Lambda = 7,3$ мкм. Диэлектрическая проницаемость SiO₂ в среднем ИК диапазоне равна $\epsilon_{12} = (1,4)^2 = 1,96$.

Рассмотрим, во-первых, оптические свойства системы диэлектрических ($\rho_3 = \rho_2$) трубок с различной толщиной стенки $\rho_{12} \equiv \rho_1 - \rho_2$. Внешний радиус фиксирован $\rho_1 = 3,15$ мкм. Внутренний радиус ρ_2 изменяется от значения 2,15 мкм (реальная

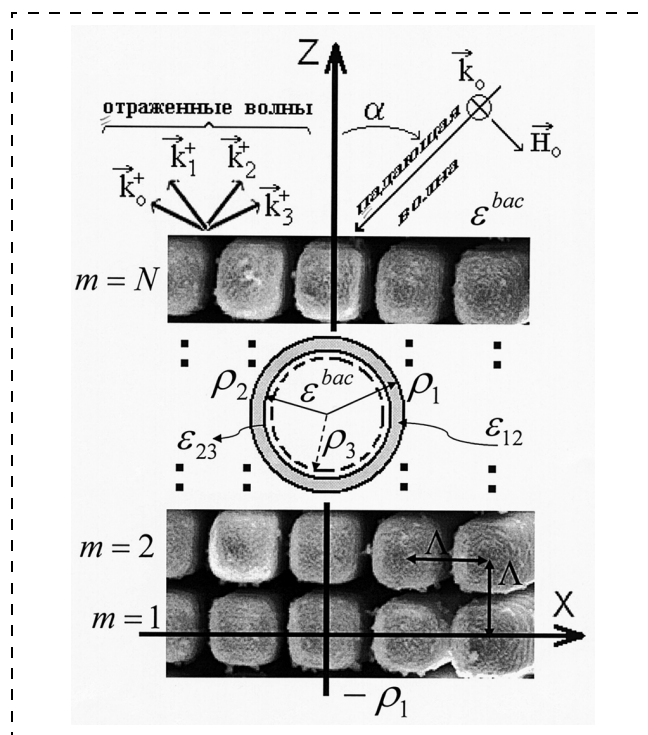


Рис. 2. Схема расчета отражения монохроматической электромагнитной волны от $m = 1, \dots, N$ параллельных рядов, начиная от одного ряда, бесконечных полых двуслойных цилиндрических трубок (вид сверху структуры, изображенной на рис. 1), вытянутых вдоль оси y декартовой системы координат x, z и образующих квадратную решетку (начиная с двух слоев). Вектор напряженности электрического поля E_0 плоской волны, падающей под углом α , параллелен оси y (ТЕ-поляризация). Волновой вектор k_0 и магнитный вектор H_0 падающей волны лежат в плоскости падения xz : k_μ^+ — волновой вектор отраженного μ -го спектрального порядка. На вставке показано сечение AA (см. рис. 1) полого стержня

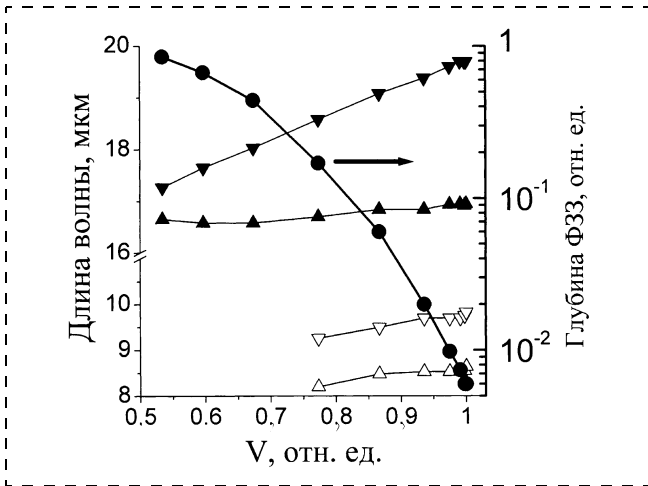


Рис. 3. Изменение спектральной ширины основной (▲; ▼) и дополнительной (▽; △) ФЗЗ, а также глубины (●) основной ФЗЗ в спектрах прохождения $N = 20$ рядов трубок SiO_2 в зависимости от удельной доли SiO_2 в трубках $V = 1 - (\rho_2/\rho_1)^2$. Глубина дополнительной ФЗЗ порядка 10^{-4} . Расчеты проведены на основе метода [13] для нормально $\alpha = 0$ падающей из воздуха ТЕ-поляризованной волны при следующих значениях параметров: $\rho_1 = 3,15$ мкм; ρ_2 изменяется от 2,15 мкм до нуля; $\Lambda = 7,3$ мкм; $\epsilon_{12} = 1,96$

структура рис. 1) до нуля. Случай $\rho_2 = 0$ соответствует сплошным стержням SiO_2 .

Результаты расчетов представлены на рис. 3–9. Рис. 3 суммирует результаты расчетов прозрачности диэлектрической структуры в зависимости от удельной доли SiO_2 в трубках. Удельная доля SiO_2 определяется как отношение объема оксида в трубке к объему сплошного цилиндра $V = 1 - (\rho_2/\rho_1)^2$.

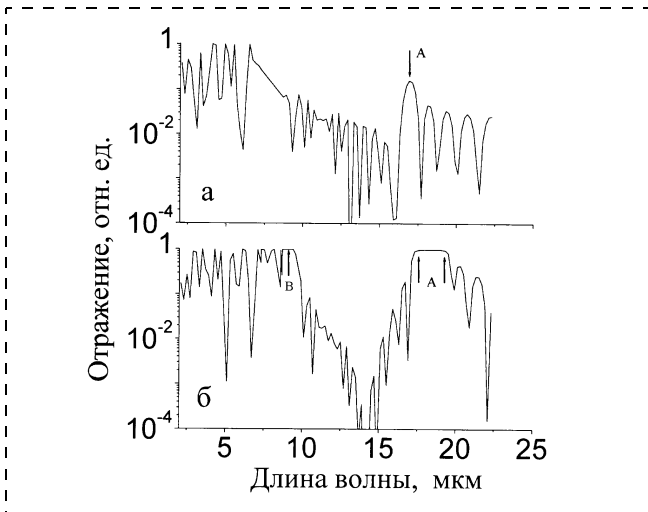


Рис. 4. Рассчитанные на основе метода [13] спектры отражения по мощности ТЕ-поляризованной волны от $N = 20$ рядов SiO_2 трубок (а) и однородных SiO_2 стержней (б). Значения параметров при расчетах: $\rho_1 = 3,15$ мкм, $\rho_2 = \rho_3$, т. е. $\rho_{23} = 0$, $\epsilon_{12} = 1,96$; $\rho_2 = 2,15$ мкм (а), $\rho_{12} = 1$ мкм, $\rho_2 = 0$ (б). Период структуры фиксирован $\Lambda = 7,3$ мкм

Левый край рис. 3 относится к тонкостенным трубкам, правый — к сплошным цилиндрам. Как видно, система тонкостенных трубок SiO_2 проявляет свойства так называемых слабых ФС ($V = 0,53$, см. крайние левые значения кривых ▼; ▲; ●). В спектре прохождения имеется малый по глубине провал на длине волны $\lambda = 16,9$ мкм. В спектре отражения этому провалу соответствует локальный максимум (пик А с амплитудой 0,16 на рис. 4, а). Однако по мере утолщения стенки диэлектрических трубок, ФЗЗ в спектре прозрачности ФС уширяется в длинноволновую сторону и углубляется. Кроме того, появляется дополнительная зона (см. ▽; △ рис. 3 и пик В на рис. 4, б). Трансформация ФЗЗ (пики А) и появление дополнительной зоны блеска (пик В) видно из сопоставления спектров отражения, приведенных на рис. 4, а и б. Спектральная ширина ФЗЗ структуры из сплошных стержней SiO_2 составляет $\Delta\lambda/\lambda^* = 0,15$ на средней длине волны $\lambda^* \sim 18,5$ мкм (пик А на рис. 4, б).

Увеличения отражательной способности диэлектрических структур с малым контрастом можно ожидать при формировании на их основе систем типа "прозрачная пленка на поглощающей подложке" (см., например, [14]). Системы такого рода получают при металлизации внутренней поверхности диэлектрических трубок. Пусть металлизация осуществляется нанесением слоя Ag или Au на внутреннюю поверхность трубок или, как предельный случай, однородным заполнением трубок. В расчетах металло-диэлектрические (МД) трубки аппроксимируются неограниченными вдоль оси y полыми двуслойными круговыми цилиндрами. Радиусы $\rho_1 = 3,15$ мкм и $\rho_2 = 2,15$ мкм двуслойных трубок постоянны, что обеспечивает постоянство толщины диэлектрической стенки двуслойных трубок $\rho_{12} \equiv \rho_1 - \rho_2 = 1$ мкм (см. рис. 2). Толщина металлической стенки $\rho_{23} \equiv \rho_2 - \rho_3$. Внутренний радиус ρ_3 изменяется от ρ_2 до нуля. Случай $\rho_3 = 0$ соответствует однородному металлическому стержню в оболочке из SiO_2 . Коэффициенты преломления Ag и Au в диапазоне длин волн $\lambda > 5$ мкм равны $(\epsilon_{23})_{\text{Ag}}^{1/2} = 0,192 + i \cdot 6,83$ [15] и $(\epsilon_{23})_{\text{Au}}^{1/2} = 10,87 + i \cdot 54,7$ [5].

Обсуждение спектров отражения МД структур предварим следующим замечанием. В работе [16] проведен теоретический анализ спектров прохождения (T) и отражения ($1 - T$) 2D ФС, состоящих из металлических (в частности, серебряных) стержней в диэлектрике. Рассматривается диапазон длин ЭМ волн от ультрафиолета (0,33 мкм) до ближнего ИК (1,24 мкм) (от 3,7 до 1 эВ [16]), в котором мнимая часть диэлектрической проницаемости Ag мала: $\text{Im}(\epsilon)_{\text{Ag}} \approx 0,3$. Малый объемный

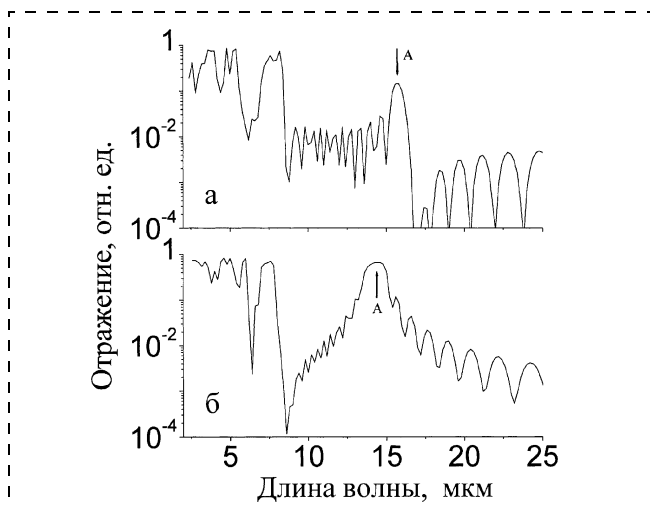


Рис. 5. Теоретически [13] спектры отражения ТЕ-поляризованной волны от 20 рядов полых двуслойных металло-диэлектрических SiO_2/Ag трубок:

$\rho_1 = 3,15$ мкм, $\rho_2 = 2,15$ мкм, $\rho_{12} = 1$ мкм; $\varepsilon_{12} = 1,96$, $\varepsilon_{23} = -46,61 + i \cdot 2,623$ (Ag) [15]; а — $\rho_3 = 2,14$ мкм, $\rho_{23} = 0,01$ мкм; б — $\rho_3 = 2,12$ мкм, $\rho_{23} = 0,03$ мкм. Период структуры $\Lambda = 7,3$ мкм

фактор $f \approx 0,15$ уменьшает мнимую часть до эффективного значения $\text{Im}(\varepsilon)_{\text{Ag}} \cdot f \approx 0,045$, что позволяет рассматривать композитную структуру (серебряные стержни в диэлектрике) как практически прозрачную среду [16]. В среднем ИК диапазоне, рассматриваемом в настоящей работе, это приближение [16] неприменимо.

Действительно, спектры прохождения (на рисунках не показаны), рассчитанные в приближении $\text{Im}(\varepsilon_{23})_{\text{Ag}} = 0$ характерны для спектров ярко выраженной ФС при толщине слоя Ag порядка глубины скин-слоя ($\sim 0,01$ мкм). Спектральная ширина и глубина Ф33 в спектрах составляет $\Delta\lambda/\lambda^* = 0,3$ и 10^{-8} , соответственно. Однако учет поглощения ($\text{Im}(\varepsilon_{23})_{\text{Ag}} \approx 0$) драматически изменяет спектры (см. рис. 5 и 6).

При толщине слоя Ag порядка глубины скин-слоя происходит некоторое "просветление" структуры, т. е. уменьшение коэффициента отражения в диапазоне длин волн $\lambda > 10$ мкм (сравните рис. 4, а и 5, а). Максимум пика А уменьшается незначительно: от значения 0,16 (рис. 4, а) до 0,145 (рис. 5, а), вследствие поглощения энергии ЭМ поля, обусловленного мнимой частью диэлектрической проницаемости Ag (детали даны при обсуждении рис. 8). Коэффициент отражения в спектральной окрестности пика А падает в несколько раз. По мере утолщения слоя Ag (см. рис. 5, б и 6, а, б) эффективность отражения возрастает в результате все более существенного вклада в процесс отражения действительной и отрицательной по значению части диэлектрической проницаемости Ag. Одновременно с увеличением амплитуды происходит "фио-

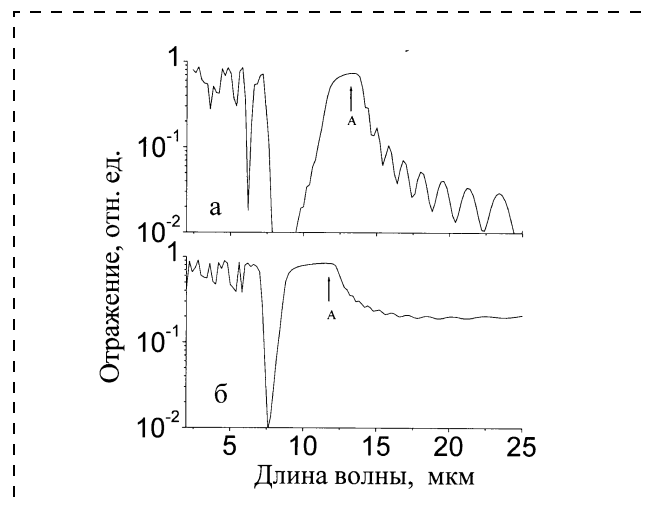


Рис. 6. См. подпись рис. 5, за исключением (а) $\rho_3 = 2,1$ мкм, $\rho_{23} = 0,05$ мкм; (б) $\rho_3 = 2,05$ мкм, $\rho_{23} = 0,1$ мкм

летовое" смещение и уширение пика А. Например, толщинам стенки $\rho_{23} = 0,03$, $0,05$ и $0,1$ мкм соответствует эффективность отражения в пике 0,66 (на длине волны 14,4 мкм), 0,74 (13,4 мкм) и 0,88 (11 мкм). Как видно из рис. 6, вместе с пиком А увеличивается и эффективность отражения длинноволновой части спектра. Причем при толщине слоя Ag, большей 0,05 мкм, осцилляции коэффициента отражения сглаживаются (см. рис. 6, б).

При толщине слоя Ag порядка или более толщины SiO_2 стенки спектр отражения МД структур трансформируется к виду, приведенному на рис. 7 и соответствующему полному заполнению Ag трубок SiO_2 . Как видно, уже один ряд МД стержней является ИК зеркалом с эффективностью отражения 0,95, 0,96 и 0,97 для длин волн, больших 7,6; 8,1 и 9,6 мкм, соответственно (см. значки $\bullet$; $\blacktriangle$; $\blacktriangledown$ на рис. 7). Вставка рис. 7 показывает, что утолщение слоя Ag обуславливает "красное" смещение края эффективного отражения.

Рис. 8 иллюстрирует роль поглощения энергии ЭМ поля в металлической части МД трубок. Как видно, эффективность отражения падает по мере утолщения слоя металла. Немонотонный ход зависимости отражения от толщины слоя особенно заметен для Au, вследствие существенно больших значений действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости Au по сравнению с Ag. При малых толщинах стенки Au трубки наблюдается увеличение отражения за счет $\text{Re}(\varepsilon_{23})_{\text{Au}} = -2875$ ($\lambda = 9,6$ мкм [5]). Кроме того, нет отличия результатов расчетов, проведенных при условии $\text{Im}(\varepsilon_{23})_{\text{Au}} = 1186$ [5] (кривая 2, рис. 8) или

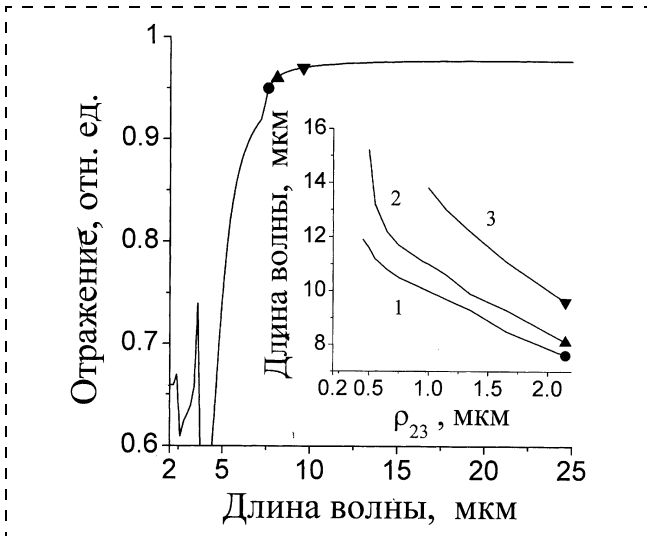


Рис. 7. Теоретический [13] спектр отражения ТЕ-поляризованной волны от одного ряда Ag стержней в SiO₂ оболочке:

$\rho_1 = 3,15$ мкм, $\rho_2 = 2,15$ мкм, $\rho_3 = 0$, $\rho_{12} = 1$ мкм, $\rho_{23} = 2,15$ мкм. На вставке показано смещение по длине волны эффективности отражения от одного ряда металло-диэлектрических трубок, соответствующей значениям 95 (кривая 1), 96 (2) и 97 % (3), по мере утолщения слоя Ag. Значки (●; ▲; ▼) иллюстрируют соответствие значений на вставке спектру отражения

$\text{Im}(\epsilon_{23})_{\text{Au}} = 0$ (кривая 2'). При толщине слоя золота $\rho_{23} > 0,05$ мкм превалирует роль $\text{Im}(\epsilon_{23})_{\text{Au}}$ и эффективность отражения уменьшается, выходя на некоторое стационарное значение. Отметим большую эффективность отражения МД ФС с вставкой из серебра по сравнению со вставкой из золота, что обусловлено большим поглощением в золоте $\text{Im}(\epsilon_{23})_{\text{Au}} \gg \text{Im}(\epsilon_{23})_{\text{Ag}} = 2,6$ [15].

В спектре отражения двух (см. рис. 9) и более рядов МД стержней появляется локальный минимум (87 % отражения) в диапазоне длин волн $10,4 \pm 0,4$ мкм. Глубина этого минимума и эффективность отражения двух рядов МД трубок зависят от удельной доли Ag. Наиболее глубокий провал наблюдается в спектрах отражения систем трубок с тонкой вставкой из серебра. При утолщении Ag стенки провал на спектре мельчает (например, 53 и 49 % отражения соответствуют толщинам $\rho_{23} = 0,5$ и 1 мкм), а эффективность отражения в спектральной окрестности минимума растет (96 и 97 %, соответственно).

Рассмотренная МД структура превращается в чисто металлическую посредством растворения диэлектрической оболочки металлических стержней. Спектр одного ряда стержней из серебра (период $\Lambda = 7,3$ мкм, радиус стержней 2,15 мкм; SiO₂ оболочка удалена) отличается от спектра рис. 9 глубиной минимума, падающей до 40 %. Однако увеличение радиуса стержней до внешнего радиуса

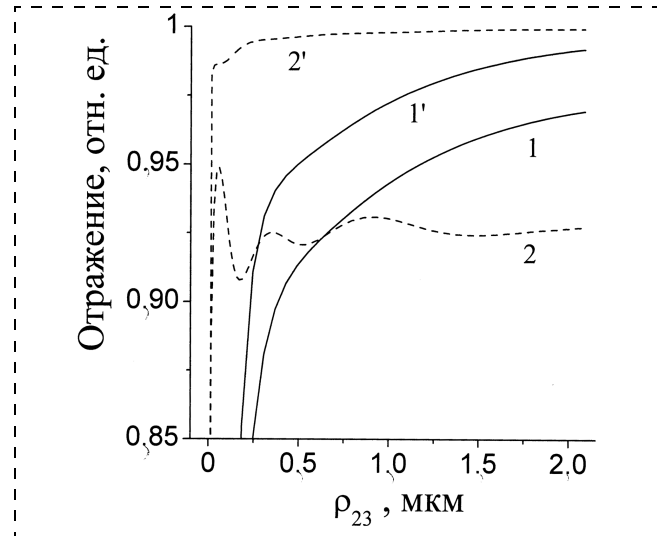


Рис. 8. Эффективность [13] отражения ТЕ-поляризованной волны (длина волны 9,6 мкм) от одного ряда металло-диэлектрических SiO₂/Ag (кривые 1, 1') и SiO₂/Au (кривые 2, 2') трубок в зависимости от толщины металлического слоя ρ_{23} при фиксированной толщине ($\rho_{12} = 1$ мкм, $\rho_1 = 3,15$ мкм, $\rho_2 = 2,15$ мкм) слоя SiO₂. Кривые 1 и 2 отображают результаты расчетов при $\epsilon_{23}(\text{Ag}) = -46,61 + i \cdot 2,623$ (кривая 1) и $\epsilon_{23}(\text{Au}) = -2875 + i \cdot 1186$ (кривая 2) [5]. Кривые 1' и 2' получены в случае $\text{Im}\epsilon_{23}(\text{Ag}) = \text{Im}\epsilon_{23}(\text{Au}) = 0$

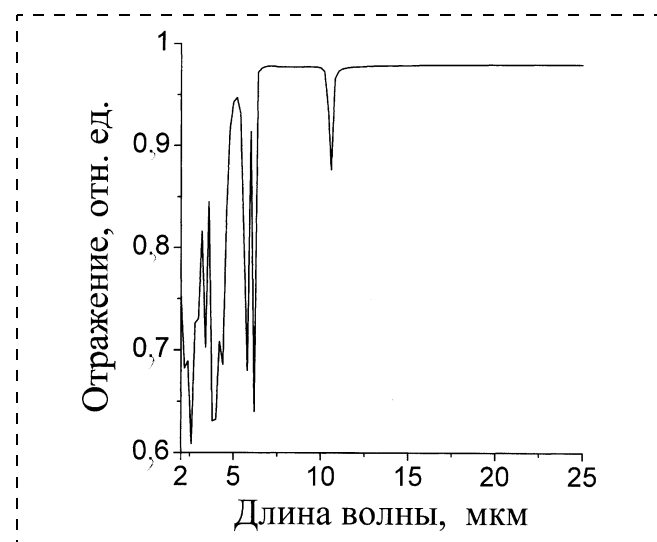


Рис. 9. Теоретический [13] спектр отражения ТЕ-поляризованной волны от двух рядов Ag стержней ($\rho_{23} = 2,15$ мкм) в SiO₂ оболочке ($\rho_1 = 3,15$ мкм, $\rho_2 = 2,15$ мкм, $\rho_{12} = 1$ мкм)

диэлектрической трубки (3,15 мкм) полностью устраняет этот провал в спектре и повышает эффективность отражения до 95, 97 и 98 %, начиная с длин волн 3; 4,8 и 9,8 мкм, соответственно.

Заключение

В работе теоретически исследована возможность создания микрозеркал для среднего ИК диа-

пазона длин волн ЭМ излучения на основе периодических структур, состоящих из полых стержней, упакованных в квадратную решетку. Оказалось, что регулярная система тонкостенных трубок диоксида кремния проявляет свойства слабых ФС, т. е. почти прозрачна в среднем ИК диапазоне. Появление практически значимой ФЗЗ можно ожидать только при значительном утолщении стенок трубок. Вместе с тем, металлизация внутренней поверхности трубок обуславливает существенную трансформацию спектров отражения структур. Например, при толщине слоя Ag, составляющей 10 % от толщины диэлектрической стенки трубок, МД структура может функционировать в качестве разделителя пучков, отражающего 20 % падающего излучения с длиной волны более 17 мкм. Полное заполнение трубок металлом (например, Ag, Au) придает структуре свойства эффективного микрозеркала для среднего ИК диапазона, даже если структура состоит из одного ряда МД трубок (стержней). Для сравнения приведем данные работы [5], где сообщается, что 95 % отражения достигается при толщине сплошной пленки Au, равной 0,08 мкм. Аналогичное значение отражения от одного ряда МД трубок, рассмотренных в настоящей работе, достигается при толщине Au стенки трубок порядка 0,05 мкм (0,1 мкм на один ряд трубок).

Работа поддержана грантом научных программ РАН "Создание и исследование свойств новых типов фотонных кристаллов на базе полупроводниковых и

магнитных материалов для развития оптоэлектронных элементов инфокоммуникационных сетей"; грантом Фонда содействия отечественной науке.

Список литературы

1. Kimerling L. C. // Appl. Surf. Sci. 2000. V. 159/160. P. 8.
2. Busch K., John S. // Phys. Rev. E. 1998. V. 58. P. 3896.
3. Boroditsky M., Krauss T. F., Coccioli R. et al. // Applied Phys. Lett. 1999. V. 75. N. 8. P. 1036–1038.
4. Charvolin T., Hadji E., Picard E. et al. // Microelectronic Engineering. 2002. V. 61–62. P. 545–548.
5. Page H., Collot P., De Rossi A., Ortiz V., Sirtori C. // Semicond. Sci. Technol. 2002. V. 17. N. 12. P. 1312–1316.
6. Kohler R., Tredicucci A., Beltram F. et al. // Nature. 2002. V. 417. P. 156–159.
7. Barabanenkov M. Yu., Aristov V. V., Mordkovich V. N. // NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry // V. 185. Science and Technology of Semiconductor-On-Insulator structures and devices operating in a harsh environment (Ed. D. Flandre, A. N. Nazarov, P. L. F. Hemment) Kluwer Academic Publishers, 2005. P. 27–37.
8. Jonson S. G., Fan Sh., Villeneuve P. R. et al. // Phys. Rev. B. 1999. V. 60. N. 8. P. 5751.
9. Старков В. В., Цейтлин В. М., Конли И. и др. // Микросистемная техника. 2001. № 8. С. 34.
10. Старков В. В., Аристов В. В., Желтиков А. М. и др. // Микросистемная техника. 2001. № 9. С. 37.
11. Starkov V. V. // Laser Physics. 2004. V. 14. N. 5. P. 664.
12. Старков В. В. // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 2. С. 28.
13. Барабаненков Ю. Н., Барабаненков М. Ю. // ЖЭТФ. 2003. Т. 123. Вып. 4. С. 763.
14. Борн М., Вольф Э. // Основы оптики. М.: Наука. 1973. С. 585.
15. Ахманов С. А., Семиногов В. Н., Соколов В. И. // ЖЭТФ. 1987. Т. 93. С. 1654.
16. Garcia N., Ponizovskaya E. V., Xiao J. Q. // Applied Physics Letters. 2002. V. 80. N. 7. P. 1120.

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

УДК 621.38:615.478

Л. В. Осипов, Ассоциация производителей медицинской техники

МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА*

Рассматриваются вопросы обеспечения электронными компонентами медицинской промышленности, развивающейся сравнительно высокими темпами в России.

* Статья подготовлена на основании стенограммы совещания Межфракционного депутатского объединения "Наука и высокие технологии" совместно с Комитетом по образованию и науке и Комитетом по промышленности, строительству и наукоемким технологиям на тему: "Состояние и перспективы развития полупроводниковой электроники в России" в Государственной Думе 20 мая 2004 г. под председательством лауреата Нобелевской премии академика Ж. И. Алферова. Стенограмма подготовлена и представлена В. И. Бабкиным.

Учреждения здравоохранения РФ каждый год покупают большое число приборов для диагностики, терапии и мониторинга пациентов. Объем рынка только по государственным учреждениям здравоохранения составляет в год не менее 2,5 млрд долл. США. В настоящее время потребности рынка на 70 % удовлетворяются за счет импорта. Производство отечественной медицинской техники сдерживается в том числе и отсутствием отечественных современных изделий микроэлектроники. В первую очередь требуются микросхемы ПЛИС высокой степени интеграции, микропроцессоры и микроконтроллеры, схемы памяти, высокоскоростные АЦП и операционные усилители, системы отображения информации, а также средства автоматизированного проектирования. Указанные электронные компоненты используются не только в совре-

менных цифровых рентгеновских, ультразвуковых, магниторезонансных системах, которые насыщены самыми передовыми изделиями микроэлектроники, но также и в широко распространенных приборах функциональной диагностики, лабораторной технике, стерилизационном оборудовании, наркозно-дыхательной аппаратуре, физиотерапевтических аппаратах и т. д.

Помимо электронных компонентов универсального назначения для развития отечественной медицинской техники очень важны разработка и изготовление специализированных электронных компонентов, таких как пьезоэлектрические матричные пьезопреобразователи, используемые при изготовлении датчиков для ультразвуковых диагностических систем. Ультразвуковые исследования являются самым распространенным методом визуализации в медицинской диагностике, и для нужд российского здравоохранения ежегодно по импорту закупается ультразвуковые диагностические приборы на сумму 150—200 млн долл. США. В России имеются необходимые заделы для изготовления отечественных приборов и датчиков к ним (в частности, на предприятиях Москвы, Зеленограда и Ростова).

Все большую роль в медицине играет лазерная техника, которая используется не только в терапии, но и в диагностике. Российская промышленность (ПО "Полус", "Инжент" и пр.) сохранила высокий потенциал в этой области, который при соответствующей поддержке позволит полностью обеспечить замещение импорта.

Существует задел по разработке и изготовлению рентгеновских диагностических трубок с неподвижным и вращающимся анодом. При соответствующей модернизации производства имеется реальная возможность обеспечить выпуск современных металлокерамических рентгеновских трубок с характеристиками, отвечающими современному уровню. Потребность в таких трубках составляет — 20—50 тыс. трубок в год при ориентировочной стоимости каждой 2—3 тыс. долл.

Особенностью отечественного здравоохранения является то, что основной объем закупок медицинских изделий для нужд медицинских учреждений осуществляется чиновными структурами, чего нет ни в одной стране с развитой экономикой. По известным причинам при этом отдается предпочтение зарубежным изделиям перед отечественными.

Следует сказать, что развитие отечественной медицинской промышленности происходит не благодаря, а скорее вопреки государственной экономической политике, излишне, на наш взгляд, зарегулированной. Тем не менее, меди-

цинская промышленность России развивается сравнительно высокими темпами. Однако доля электронных компонентов, закупаемых за рубежом, неуклонно увеличивается. Наиболее быстро развиваются малые и средние предприятия, в то время как многие из крупных предприятий и институтов, лишённые государственной поддержки, заметно теряют позиции.

Для развития полупроводниковой электроники в России в интересах отечественной промышленности, в том числе медицинской промышленности, необходимо:

- определить приоритетные направления развития отдельных областей полупроводниковой электроники, выделив те из них, в которых имеется научный и технологический задел, а также области, определяющие экономическую независимость России;
- разработать предложения, устанавливающие здоровый протекционизм при закупке импортных комплектующих и готовых изделий с ориентированием на максимальное импортозамещение аналогично тому, как это реализуется в Китае, Южной Корее и Японии. Для этого должны быть внесены корректировки в законы, регулирующие налоговую и таможенную сферы, а также внешнеэкономическую деятельность, порядок государственных закупок и условия доступа готовых изделий на рынок;
- стимулировать с помощью предоставления государственных гарантий создание совместных высокотехнологичных производств с зарубежными партнерами на паритетных началах с тем, чтобы указанные производства не только удовлетворяли потребности отечественной промышленности, но и работали на экспорт;
- при больших объемах закупок электронных компонентов или готовых изделий для государственных нужд у зарубежных производителей проводить тщательный анализ экономической целесообразности такого рода сделок с участием представителей промышленности и независимых экспертов, выделенных профессиональными ассоциациями отечественных производителей. Должны быть исключены зарубежные поставки по кредитам, когда под флагом оснащения новыми технологиями по существу проводится оптовая поставка не очень новой продукции и устаревшей технологии по завышенным ценам. Для этого ввести персональную ответственность за принятие решений по государственным закупкам;
- организовать работу над проектом ускоренного развития отечественной полупроводниковой электроники на условиях открытого доступа к

необходимой информации для всех сторон, участвующих в его реализации, с обязательным обсуждением и оппонированием принимаемых решений в целях использования научно-технического задела, кадрового потенциала и финансовых средств.

Для реализации перечисленных мер при межфракционном депутатском объединении должна

быть создана функционирующая на регулярной основе рабочая группа с участием представителей соответствующих отраслей промышленности.

В состав группы должны входить признанные профессионалы, делегируемые соответствующими научными объединениями и ассоциациями и проявившие свои деловые и организационные качества в последнее десятилетие.

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Память объемом в 100 Гбайт благодаря нанотехнологиям

Исследователи при лондонском Imperial College объявили о том, что разработали новую технологию, которая позволит создавать трехмерные микрочипы (рис. 1), — на их основе можно будет создавать модули памяти очень высокой, по сегодняшним меркам, емкости.

Новый чип может вмещать большой объем данных на малой площади, для этого используется сложная сеть взаимосвязанных нанообъектов — узлов сети. В этих же узлах могут быть задействованы базовые вычислительные функции, т. е. имеем дело с чем-то весьма напоминающим нейронную сеть с ее нейронами и аксонами.

Последние исследования ученых из Университета Шеффилд (University of Sheffield) и Университета Дурхэм (Durham University) позволяют рассчитывать на то, что на основе данной технологии в скором времени можно будет создавать носители памяти, сравнимые по емкости с современными жесткими дисками, но при материальных затратах на производство таких же, как у микросхем памяти.

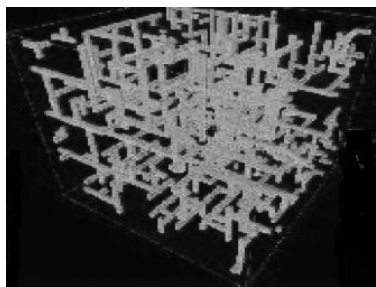


Рис. 1. Пример трехмерного чипа по типу нейросети

ти. Таким образом, емкость микросхем памяти можно будет увеличить до 0,5—100 Гбайт!

Рассел Коуберн, профессор нанотехнологии при Imperial College, отметил: "Новые мобильные телефоны со встроенным видео очень популярны сейчас, но им очень не хватает того объема памяти, которой они сейчас комплектуются или которым могут быть расширены. Наша технология позволит превратить их в полноценные многофункциональные устройства".

Технология основана на исследованиях Коуберна и его коллег. Они обнаружили, что с помощью нанотехнологий можно репродуцировать ключевые функции современных и привычных полупроводниковых продуктов. При этом используется лишь спин электрона, который отвечает за магнетизм. Сейчас команда профессора Коуберна работает над воплощением технологии в реальных продуктах.

Источник: IXBT: Память объемом в 100 Гб благодаря нанотехнологиям!

Хламидомонада в качестве грузовика

Американские ученые из Гарварда "запрягли" зеленые водоросли и заставили их переносить "полезный груз" вверх и вниз по крошечным микроканалам. Зачем это нужно? Как говорят ученые, в будущем клетки водорослей и другие микроорганизмы будут обучены таким образом, чтобы выполнять простейшую механическую работу по перемещению микро- и наноконтейнеров.

В своих экспериментах исследователи использовали одноклеточные зеленые водоросли *Chlamydomonas reinhardtii* длиной около 10 мкм. Для передвижения они используют пару жгутиков и плывут подобным брассу стилем. Молекулярный мотор этой водоросли достаточно изучен для того, чтобы знать, как он устроен, но недостаточно для

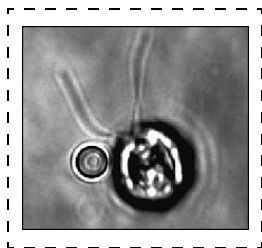


Рис. 2. Хламидомонада "везет" бусину полистирола

того, чтобы создать его искусственный аналог. Поэтому ученые решили использовать творения природы, а не делать искусственный наномотор. Посредством химической связи ученые дали водорослям груз — "бусинки" полистирола, а затем, используя свет различной интенсивности, заставили клетки перемещаться по микроканалам тестовых камер (рис. 2). Любопытно, что груз никак не повлиял на скорость движения клеток. Чтобы разгрузить водоросли, исследователи подвергали их ультрафиолетовому излучению. Команда исследователей даже придумала новый термин, обозначающий "грузовые" микроорганизмы: мисгоохен, т. е. микробык.

"Мы в основном уже разработали систему перемещения объектов микроорганизмами, — сообщил доктор Дуглас Вейбель. — Теперь мы используем их двигатели для выполнения нетрадиционных задач". По словам ученого, технология найдет применение в молекулярной медицине. Например, груз водоросли представляет собой наноконтейнер, чувствительный к определенным белковым маркерам раковых клеток, или токсинам. И затем клетки помещают в контейнер с тестовой тканью. После путешествия хламидомонад в ткани ученые узнают, содержатся ли те или иные токсины в образце по их грузовым отсекам.

Источник: BBC: Cells made to haul tiny cargoes.

Штампуют наносистемы

В арсенале нанотехнологов появилась новая технология производства микро- и наноструктур. Ее предварительное название — печать микросмещением (microdisplacement printing). Она позволяет с высокой точностью наносить на микро- и нанокомпоненты отдельные молекулы. В первую очередь печать микросмещением будет применяться в наноэлектронике, производстве чипов и наносенсоров. Новая технология удобна еще и тем, что в процессе производства можно создавать библиотеки молекулярных шаблонов, которые значительно упростят конструирование наносистем.

Новая технология основана на методе микроконтактного печатания (рис. 3). Изготовление наноструктур этим способом не требует наличия сверхчистой комнаты или других специфических дорогостоящих условий. Оба метода "штампуют" молекулярные шаблоны раствором молекул на поверхности. Процесс можно сравнить с тем, как чиновник ставит печать на бумагу.

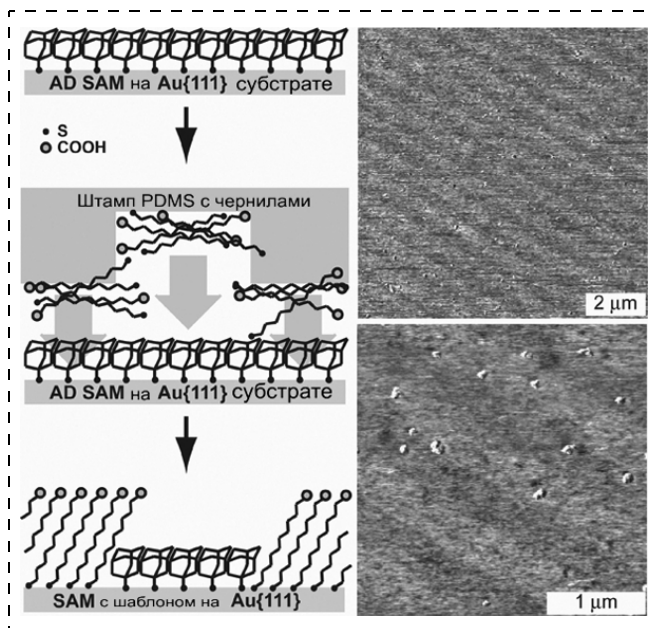


Рис. 3. Демонстрация печати микросмещением

"Печать микросмещением позволит нам использовать различные типы молекул для производства наносистем", — говорит Пол Вайс, один из исследователей.

Один из недостатков микроконтактной печати — уменьшение точности печатания вблизи углов штампа — отсутствует в новом методе производства. Эта проблема решена путем использования самособирающихся мономерных пленок, содержащих молекулы адамантана.

"Мы обрабатываем субстрат раствором, содержащим эти молекулы, и вскоре они собираются в цельный мономолекулярный слой", — поясняет Вайс.

Кроме того, что печать микросмещением обеспечивает высокую точность, "печати" можно заряжать различными типами "чернил". Так можно составлять большие библиотеки готовых образцов, а затем быстро наносить их на поверхность.

Провести исследования определения точности молекулярных оттисков Вайсу и его команде помогла коллекция высокоточных сканирующих электронных микроскопов, находящаяся в их лаборатории.

"Сейчас мы заняты разработкой стратегий использования новой технологии, которые позволят применить ее не только в химии нанопленок и супрамолекулярных структур, но и в наноэлектронике, — объясняет Вайс. — Мы хотим преодолеть барьер точности в 1—100 нм и при этом сделать производство наносистем более быстрым и дешевым".

Источник: Nanotech-Now: New Microprinting Technique Improves Nanoscale Fabrication.

Новый тип РНК-нанокапсул излечит от рака

Ученые из института Пэрдью, США, сконструировали новый тип наночастиц для доставки лекарств, с помощью которых была проведена успешная терапия онкологических заболеваний в лабораторных условиях.

Новые нанокапсулы, доставляющие лекарства внутрь клетки, состоят из трех цепей РНК (рис. 4), соединенных друг с другом в структуру, напоминающую по форме треугольник. РНК-нанокапсулы имеют такой размер, чтобы проникать внутрь клетки, а их строение позволяет поместить внутрь них цепочки РНК, отвечающие за остановку роста раковой клетки. Команда ученых, разработавших новое лекарство против роста раковых опухолей, недавно провела тесты РНК-наночастиц на мышах и культуре клеток человека. Результаты тестов показали, что лекарство способно бороться с онкологическими заболеваниями.

"Молекулярные структуры на основе РНК — идеальное решение для создания лекарства от рака. Вообще, некоторые молекулы РНК способны эффективно бороться с онкологическими заболеваниями, но до сих пор было невозможно доставить их точно в раковую клетку, — говорит исследователь Пейхуан Гу, профессор молекулярной вирусологии из университета Пэрдью (Гу проводил исследования по созданию РНК-нанокапсул совместно с центром исследования онкологических заболеваний в Пэрдью, школой ветеринарной медицины и биомедицинской инженерии). — В по-

следнее время большинство медиков надеется на то, что нанотехнологии помогут доставлять противораковые агенты в клетку. И с помощью РНК-нанокапсул это более чем возможно".

Ранее доктор Гу уже создавал различные наноструктуры на основе РНК. При изучении вирусного мотора вируса phi29 он узнал, что РНК формирует наноблоки, способные соединяться в различные наноструктуры. Так, из этих наноструктур создан сам наномотор вируса, доставляющий свою ДНК в клетку.

"С помощью наночастиц доктор Гу смог доставить в опухолевые клетки три различных типа противораковых агентов, — говорит Джим Чин, ученый из Национального института медицины США. — Это уникальное достижение. Ранее удавалось доставить только один тип агента".

Группа исследователей построила из молекул РНК несколько различных "матриц" размерами от сотен нанометров до нескольких микрометров. При этом их структура может быть задана, что существенно упрощает конструирование будущих наномашин. Самосборка шла в нанометровом масштабе, но конечные "продукты" в ряде опытов достигали и микрометровых размеров.

"Наша работа показала, что мы можем управлять структурой трехмерных матриц, полученных с помощью самосборки молекул РНК. При этом мы можем делать матрицы различных размеров, — объясняет Гу. — В дальнейшем после проведения дополнительных исследований с помощью молекул РНК можно будет конструировать сложные наномшины".

Пока исследователи собрали из молекул РНК "кольца", "треугольники" и "стержни". Исследователи говорят, что эти структуры можно интегрировать с нанотранзисторами, нанопроводниками, нанотрубками, биосенсорами и другими уже существующими наноструктурами, чтобы получить сложные НЭМС-системы, возможно, даже наноробототехнику.

Практическое применение в доставке лекарств пока нашли только треугольники из РНК. Для борьбы с опухолями ученые начали поиск таких форм РНК, которые могут убивать раковые клетки. В процессе исследований были найдены три формы РНК. Например, siRNA деактивирует отдельные гены в раковых клетках, другие фрагменты РНК присоединяются к белковым маркерам, характерным только для раковых клеток.

"С помощью технологии синтеза РНК-наноструктур, которую мы разработали еще при исследовании вируса phi29, была создана наноструктура-треугольник, состоящая из трех фрагментов различных РНК, размером от 25 до 40 нм", — объясняет далее Гу.

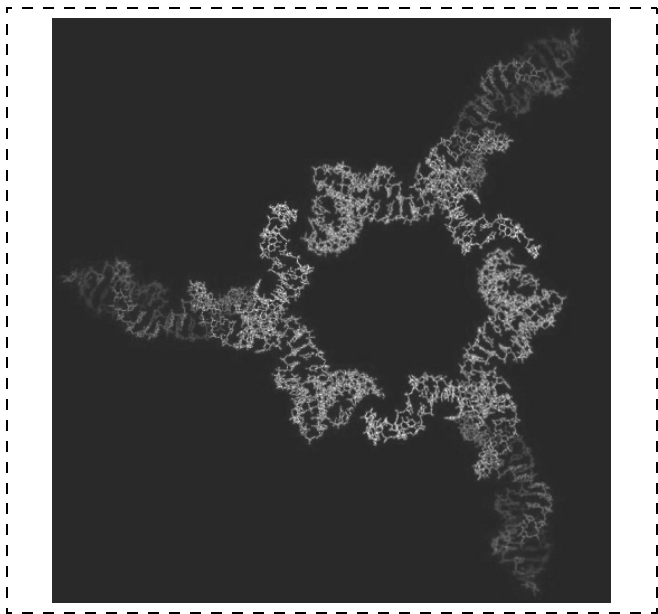


Рис. 4. Нанокапсула, состоящая из трех РНК-структур

Частицы, размер которых около 100 нм, достаточно большие для того, чтобы проникнуть через клеточную мембрану. Вот почему треугольники идеально подходят для доставки лекарств внутрь клеток.

"Одна из особенностей раковых клеток — это то, что они не перестают делиться. А молекула siRNA останавливает процесс деления клеток. Затем мы попробовали наноструктуру в деле. И оказалось, что наночастицы справились с опухолью рака груди за несколько дней".

Но и это еще не все. Команда исследователей добилась полной остановки ракообразования у подопытной мыши. Говоря простым языком, мышь вылечили от рака.

"Результаты очень обнадеживающие, однако следует провести еще несколько дополнительных исследований, прежде чем мы станем использовать наночастицы в клинических тестах на людях". Ученым необходимо исследовать все возможные подобные эффекты от использования наночастиц. Одной из таких исследовательских задач — присоединение наночастиц непосредственно к раковым клеткам, оставляя здоровые неповрежденными. Однако ученые надеются, что наночастицы в будущем радикально изменят терапию онкологических заболеваний и помогут миллионам людей.

Источник: Purdue News: Purdue scientists treat cancer with RNA nanotechnology.

Создана прозрачная наноткань с прочностью стали

Нанотрубки, похоже, становятся открытием № 1 в области нанотехнологий. Две различные команды исследователей из США и Австралии создали прозрачную ткань, состоящую из нанотрубок длиной 1 (!) м и шириной 5 см. Ранее ученым удавалось получить нанотрубки длиной только несколько сантиметров.

Как и ожидалось, лента обладает высокой прочностью. Соотношение прочность/масса материала ленты выше, чем у стали высокой закалки. При этом ткань возможно оборудовать органическими светодиодами, превратив ее в гибкий сверхтвердый OLED-экран. Это похоже не на "рядовое" открытие, а на научную фантастику. Тем не менее, это так. Давно известно, что нанотрубки по прочности превосходят сталь и при этом способны проводить электричество. Вся загвоздка состояла в том, что до сих пор их не могли производить длиннее 2 см и тем более не могли прясть из них ткань.

"Наноткань ожидает масса применений: строительные материалы, снаряжение, бронежилеты, OLED-дисплеи; всего и не перечислить... — говорит Рэй Бохман из Техасского университета. — То,

что это очень ценный и востребуемый продукт, ускорит его коммерциализацию, и, я уверен, мы увидим уже скоро в различных продуктах использование нанотекстиля".

Наноткань (рис. 5) — это, конечно, не массив "цельных" нанотрубок, а композит, состоящий из переплетенного "леса" многослойных нанотрубок длиной 245 мкм и диаметром 10 нм. Образец таких спутанных нанотрубок длиной всего 1 см может "развернуться" в трехметровую ленту 18-микронметровой толщины. Если же использовать пластиковый цилиндр в качестве валка, по которому протягивается лента, то исходный материал можно раскатать до десятиметровой длины. Оборудование ученых обеспечивало "разворачивание" леса до 1 м/мин.

В результате первого цикла производства у ученых получился анизотропный аэрогель на основе нанотрубок с плотностью 0,0015 г/см³. Этот лист выдерживал миллиметровые капли, которые были в 50 000 раз тяжелее места контакта с аэрогелем.

Но ученые решили сделать наноткань более прочной. Для этого они поместили пленку из нанотрубок на плоскость и вертикально погрузили ее в раствор этанола. При этом погружение велось в направлении соединения нанотрубок между собой. После того как пленку вытащили, испарение этанола вызвало сокращение толщины пленки до 50 нм из-за эффектов поверхностного натяжения. При этом плотность пленки стала равна 0,5 г/см³.

Усиленная нанопленка и есть конечный продукт. Она прозрачна и проводит электричество. Вдоль направления нанотрубок сопротивление ткани составляет 700 Ом/м². При этом сопротивление остается постоянным при изгибе пленки в любом направлении.

Как говорят ученые, наноткань может исполь-



Рис. 5. Наноткань из нанотрубок. Эмблема снизу показывает прозрачность ткани

зоваться даже в системах освещения, заменяя традиционные лампы дневного света и лампочки. Прочность пленки — 160 МПа/(г/см³). Прочность полимерных пленок майлар и каптон, использующихся в сверхлегких самолетах — 140 МПа/(г/см³), а прочность закаленной стали — 125 МПа/(г/см³).

Новый метод производства нанотрубок, названный технологией "развертки", имеет ряд преимуществ перед химическим синтезом наноструктур, так как до сих пор удавалось получить нанотрубки длиной только 2—3 сантиметра.

Возможно, благодаря этому открытию запуск коммерческого космического лифта в 2018 году может-таки состояться. Напомним, что основная составляющая космического лифта, транспортирующего грузы на орбиту Земли и гораздо дальше — сверхпрочная и легкая лента на основе нанотрубок.

Источник: Nanotechweb.org; Carbon-nanotube fabric measures up.

Светоизлучающие нанотрубки в телевизорах и дисплеях

Углеродным нанотрубкам уже найдено немало разнообразных применений, в том числе в качестве элементной базы для будущих наноэлектронных схем, однако в компании Applied Nanotech полагают, что могут предложить еще одно — в плоскоэкранных телевизорах и дисплеях нового поколения.

Напомним, что нанотрубки из углерода, используемые в качестве полупроводниковых приборов, были впервые обнаружены в лаборатории NEC, которой принадлежат права на коммерческое использование этих технологий и которая собирается выпустить первый чип на нанотрубках к 2010 г.

Нанотрубки, как было открыто в конце 1990-х годов, проявляют себя как проводники или как полупроводники в зависимости от ориентации шестиугольников, состоящих из атомов углерода, относительно направления оси нанотрубки (хиральности), а также от различных примесей, входящих в состав нанотрубки.

Ранее созданные микроскопические твердотельные излучающие нанотрубки электрически управлялись "модулятором" из одной-единственной молекулы. Новые светоизлучающие нанотрубки (light-emitting nanotube, LEN) (рис. 6) излучают в диапазоне 1,5 мкм, что в перспективе делает потенциально возможным создание оптических коммуникационных элементов на кремниевых подложках с интегрированными LEN-излучателями диаметром всего 1,4 нм.

В телевизорах нового поколения Applied Nanotech предлагает использовать нанотрубки в качестве источников света, чтобы заменить лампы подсветки в жидкокристаллических телевизорах боль-

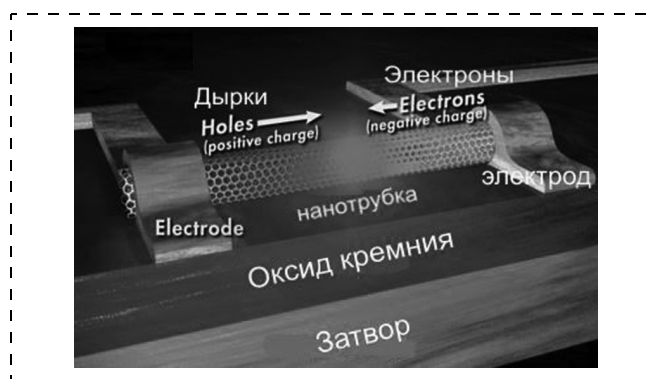


Рис. 6. Принцип работы светоизлучающих нанотрубок

шой диагонали (40—60 дюймов). Причем компания надеется это сделать к 2007 г., т. е. всего через четыре года после того, как светоизлучающие нанотрубки были впервые созданы.

Как сообщает источник, Applied Nanotech, являющаяся дочерней фирмой Nano-Proprietary, создала лампу подсветки, используя технологии печати чернилами на основе нанотрубок. В отличие от обычных ламп в новой разработке используются фосфоросодержащие покрытия и катод, в буквальном смысле напечатанный чернилами на основе металлической краски и собственно нанотрубок.

Себестоимость созданных таким образом ламп подсветки очень невысока (в отличие от, скажем, катодов, в которых нанотрубки бы выращивались), что очень важно для безумно дорогих на сегодняшний день больших дисплеев.

Утверждается, что созданная по новой технологии лампа подсветки для 32-дюймовых телевизоров потребляет от 50 до 60 Вт. Как ожидается, Applied Nanotech продемонстрирует подробности своей технологии на выставке NanoEurope 2005, которая пройдет в Швейцарии в следующем месяце.

Стоит также отметить, что кроме Applied Nanotech возможностями применения технологий нанотрубок в дисплеях в качестве источников света также интересуются и такие производители как, например, Samsung.

Источники:

1. EE Times.
2. IXBT: Светоизлучающие углеродные нанотрубки.

Нанотехнологии выходят на корт

В конце августа, когда лучший теннисист мира Роже Федерер выйдет на корт U. S. Open, у него будет ракетка, снабженная наночастицами, благодаря которым она при сохранении своей массы станет прочнее. Ракетка Андре Агасси при сопри-



Рис. 7. Серию наноракеток от фирмы Babolat можно купить в России

косновении с мячом будет "принимать его форму", что слегка усиливает контроль во время игры.

Но производители этих ракеток делают технологию доступной и для тех, кто играет в теннис на досуге. Фирмы Head, Prince, Babolat, Wilson и Fischer, использующие нанотехнологии, снабжают ракетки (рис. 7) магнитной силой, аэродинамическими и другими свойствами, которые позволяют игрокам увеличить мощь и точность удара.

Австрийская фирма Fischer GmbH, известный производитель лыжного снаряжения, в сентябре представит высокотехнологичную ракетку, обладающую магнитными свойствами. Ракетка, получившая название Magnetic Speed, оснащена однополярными магнитами, установленными на ободе. Магниты отталкиваются друг от друга, что позволяет ракетке сохранять форму после столкновения с мячом. Идея в том, что быстрое восстановление увеличивает скорость полета мяча. Чтобы магниты заряжались, в ручке ракетки установлены пьезоэлектрические кристаллы. Ракетка стоимостью 189 долл. появится в продаже нынешней осенью. В Европе ею уже пользуются такие спортсмены, как Андрей Павел и Вера Звонарева.

Новые ракетки призваны вызвать новый прирост интереса у любителей. Продажи теннисного снаряжения в последние годы выросли, но они ниже, чем десятилетие назад. По данным Ассоциации теннисной индустрии, в 2004 г. компании продали около 3,9 млн ракеток. Это больше, чем 3,1 млн в 2003 г. и 3,3 млн — в 2002-м, но меньше, чем 4,4 млн в 1992 г.

"Технологические новшества заставляют потребителей покупать новые модели", — говорит Марк Мейсон, владелец специализированного

магазина Mason's Tennis на Манхэттене, который продает почти 2 тыс. ракеток в год. Поэтому компании и мудрят с формами и материалами. Ракетка Flexpoint голландской компании Head NV, которую предпочел Агасси, снабжена отверстиями и "впадинами" на обеих сторонах обода. Компания утверждает, что впадины увеличивают гибкость, и ракетка принимает форму мяча.

Компания разработала девять моделей для игроков разного уровня. Ракетка стоит около 200 долл. Частная компания Prince Sports Inc. из Нью-Джерси изменила форму отверстий для струн. На смену крошечным круглым отверстиям пришли крупные овальные, что делает струны более чуткими. Компания утверждает, что увеличивается также аэродинамичность, и игроку легче посылать ракеткой мяч.

Созданы четыре модели стоимостью от 220 до 300 долл. Ими играют аргентинцы Гильермо Коррия и Паола Суарес. Компании меняют не только дизайн, но и материалы. Французский производитель Babolat в 2003 г. начал с того, что вмонтировал в свои ракетки углеродные нанотрубки. Трубки в 10 раз плотнее графитовых и служат очень долго. Ракетка кажется более жесткой, что увеличивает силу удара. Стоимость ракеток для любителей — 199 долл.

Крупнейший в США производитель ракеток, чикагская компания Wilson Sporting Goods Inc., начала снабжать свои ракетки nCode — выбор Федерера — кристаллами двуокиси кремния прошлой весной. Ими играют Серена и Винус Уильямс.

Звезды тенниса не всегда охотно берутся за высокотехнологичные ракетки. Но соглашения между производителями и профессионалами нередко подразумевают, что известные игроки вооружатся новейшими технологиями.

Правила тенниса разрешают пользоваться множеством вариантов ракеток. Международная теннисная федерация не занимается оценкой ракеток, она лишь проверяет их на предмет соответствия правилам, когда с такой просьбой обращаются производители или когда поступают жалобы на то, что правила нарушены.

Все ускоряющийся темп изменений иллюстрирует тот факт, что Международная теннисная федерация меняла правила, касающиеся ракеток, 14 раз с 1978 г., когда они впервые были облечены в слова. И похоже, что в ближайшее время эта тенденция не замедлится.

Источники:

1. Pittsburgh Post-Gazette: Nanotechnology hits the tennis court.
2. Перевод: Inopressa: Нанотехнологии выходят на корт.

Указатель статей, опубликованных в журнале "НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА" в 2005 г.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

- Алферов Ж. И.** О состоянии и перспективах развития полупроводниковой электроники в России. № 8.
- Боресков Г. К.** Стратегическое управление научной отраслью. Путь к возрождению. № 8.
- Быков В. А.** Развитие производственной базы нанoeлектроники в Зеленограде. № 12.
- Варшавский А. Е.** Показатели результативности науки России. № 9.
- Вернер В. Д.** К терминологии в микросистемной технике. № 9.
- Мальцев П. П.** О терминологии в области микро- и наносистемной техники. № 9.
- Назаренко В. А.** Нейтронные методы в исследовании структуры и свойств материалов. № 12.
- Петрунин В. Ф.** Российская ниша наноматериалов как перспективная база нанотехнологий. № 12.
- Урличич Ю. М., Данилин Н. С.** Проблемы взаимодействия высоких космических электронных технологий РФ и ЕС в области элементной базы. № 10.
- Чаплыгин Ю. А.** Проблемы подготовки кадров для разработки нанотехнологий и производства наноструктур. № 12.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

- Аксенов А. И., Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Симуний М. М.** Химические сенсоры на основе пучков углеродных нанотрубок для обнаружения низких концентраций молекул хлора в атмосфере. № 12.
- Алексеев П. А.** Системы с сильными электронными корреляциями: рентгеновская и нейронная спектроскопия. № 6.
- Асеев А. Л.** Наноматериалы и нанотехнологии. № 3.
- Батурич А. С., Чуприк А. А., Шешин Е. П.** Микроскопия латеральных сил: количественный подход. № 8.
- Быстров С. Г.** Применение методов ХСМ и РФЭС для исследования особенностей локальной химической структуры поверхности блоксополимера $PS_{39}EO_{61}$. № 6.
- Валах М. Я., Джаган В. Н., Красильник З. Ф., Литвин О. С., Лобанов Д. Н., Новиков А. В., Юхимчук В. А.** Особенности роста самоиндуцированных SiGe nanoостровков на SiGe буфере. № 6.
- Вернер В. Д., Мальцев П. П., Сауров А. Н., Чаплыгин Ю. А.** Технологии миниатюризации "сверху — вниз" или "снизу — вверх". № 1.
- Гапонов С. В.** Экстремальная ультрафиолетовая литография — будущее нанoeлектроники. № 2.

- Дедков Г. В.** О диссипации механической энергии в динамическом режиме силового зондового микроскопа в вакууме. № 5.
- Дедков Г. В., Кясов А. А.** Взаимодействие движущейся нейтральной наночастицы с равновесным электромагнитным излучением в вакууме. № 8.
- Дедков Г. В., Кясов А. А., Дедкова Е. Г.** О бесконтактном трении и теплообмене в наноструктурах. № 6.
- Деспотули А. Л., Андреева А. В., Рамбабу Б.** Наноника суперионных проводников — основа создания новых приборов для МСТ. № 2.
- Евдокимов Ю. М.** Нанотехнологии на основе двухцепочечной ДНК. № 10.
- Запорожкова И. В.** Нанотубулярные структуры: строение, свойства и перспективы. № 10.
- Корнилов В. М., Лачинов А. Н., Логинов Б. А.** Создание и исследование квазиульмерных структур методами сканирующей туннельной микроскопии. № 7.
- Левонян Л. В.** Формирование рентгеновского фазового контраста в условиях дифракционной фокусировки сферической волны. № 9.
- Левонян Л. В., Азизян С. Л.** Формирование фазового контраста в трехблочном ЛЛЛ-интерферометре. № 11.
- Левонян Л. В., Кочарян В. Р.** Рентгеновская френелевская топография кристалла с вогнутой поверхностью в скользящей геометрии при наличии поверхностной акустической волны. № 7.
- Лучинин В. В.** Введение в индустрию наносистем. № 5.
- Максимов Г. А., Николичев Д. Е., Филатов Д. О.** Локальный анализ нанокластеров GeSi/Si методом растровой Оже-микроскопии. № 5.
- Стрельчук В. В., Валах М. Я., Гуле Е. Г., Коломыс А. Ф., Лисица М. П., Mazur Yu. I., Wang Z. M., Salamo G. I.** Модификация свойств многослойных наноструктур (In, Ga)As/GaAs с квантовыми нитями при термическом отжиге. № 9.
- Сулис Р. А.** Нанотехнологии в электронике. № 11.
- Трушин В. Н., Маркелов А. С., Жолудев А. А., Чупрунов Е. В.** Экспериментальные методы термоиндуцированного управления параметрами рентгеновских дифракционных максимумов кристаллов. № 7.
- Чеховой А. Н.** Ключевые приоритеты нанотехнологии в инновационном промышленном производстве. № 11.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

- Гайкович К. П., Дряхлушин В. Ф., Николичев Д. Е.** Деконволюция изображений в сканирующей Оже-

микроскопии и в сканирующей электронной микроскопии. № 5.

Голубь Б. И., Гусев А. Н. Процессная модель управления качеством измерителя теплового излучения. № 7.

Дряхлушин В. Ф., Гайкович К. П., Левичев В. В., Мишкин В. П. Тонкий анализ пространственной структуры излучения двухцветного полупроводникового лазера в ближней зоне. № 6.

Карташев В. А., Бурухина Т. Ф. Влияние нерезонансных периодических возмущений на положение иглы туннельного микроскопа. № 8.

Карташев В. А., Бурухина Т. Ф. Исследование зависимости отклонений иглы туннельного микроскопа от наклона его оси. № 9.

Козлов А. Г. Моделирование распределения температуры в структуре теплового микроакселерометра с инерционной массой. № 6.

Козлов А. Г. Моделирование нестационарного режима работы микроэлектронного теплового приемника излучения консольного типа. № 12.

Космодемьянская Г. Н., Сорокина С. И. Особенности определения поля давления при движении микрокапсулы в трубках малого диаметра. № 2.

Мамедов А. К. Аппроксимация частотных характеристик структур с барьером Шоттки. № 7.

Фомин Л. Ф. Моделирование пульсирующих колебаний гибких микрообъектов для целей нанотехнологий. № 1.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Белянин А. Ф., Самойлович М. И., Житковский В. Д., Пашенко П. В., Тимофеев М. А., Ковальский К. А., Клещева С. М., Борисов В. В., Петухов К. Ю. Слоистые ненакаливаемые катоды. № 8.

Бескровный И. М. Технологические поколения современной электроники. № 1.

Бучин Э. Ю., Денисенко Ю. И. Использование процессов термомиграции в технологии МЭМС. № 9.

Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Кульчицкий Н. А., Кульчицкий А. Н., Мельников А. А. Анализ пороговых характеристик GeSi/Si дефекторов на основе гетероперехода с внутренней фотоэмиссией в спектральном диапазоне 8...12 мкм. № 3.

Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Кульчицкий Н. А., Кульчицкий А. Н., Мельников А. А. Пороговые характеристики детекторов на основе GeSi/Si гетероструктур с внутренней фотоэмиссией в спектральном диапазоне 8...12 мкм. № 4.

Гордеев С. К., Корчагина С. Б., Ламанов А. М., Ламанов М. М., Мойя А. М., Слепнев С. П., Шешин Е. П. Новая методика изготовления автоэмиссионных катодов из графитовой фольги. № 12.

Козлов Ю. Ф. Современное состояние и проблемы обеспечения электронной промышленности России специальными материалами. № 11.

Купряшкин А. С., Шешин Е. П., Щука А. А. Методы изготовления автоэлектронных катодов из углеродных материалов. № 3.

Ламанов А. М., Ибрагимов Р. М., Никольский К. Н., Редькин А. Н., Чесов Р. Г., Шешин Е. П. Автоэмиссионные катоды, изготовленные методом низкотемпературного газофазного осаждения из паров этанола. № 9.

Ландышев А. В., Лаврентьев А. А., Ландышев В. А. Электронно-зондовые исследования микромодульных термоэлектрических блоков. № 2.

Мятев А. А., Дьяченко Н. И., Помадчик А. Л., Страумал П. Б., Прохоренков Д. В. Синтез нанокристаллического материала системы $\text{Ge}_{1-x}\text{—Bi}_x\text{—O}_y$. № 3.

Мятев А. А., Помадчик А. Л., Кудачев Т. М., Прохоренков Д. С. Синтез нанокристаллического никелата лантана $\text{La}_2\text{NiO}_4 + \delta$. № 11.

Панфилов Ю. В. Наноструктурированные материалы и нанотехнология: анализ современного состояния. № 11, 12.

Рембеза Е. С., Рембеза С. И., Домашевская Э. П., Гречкина М. В., Агапов Б. Л. Влияние атомного состава оксидных нанокompозитов на основе SnO_2 на их структуру. № 7.

Рябко М. В., Никитов С. А., Чаморовский Ю. К. Микроструктурные волокна. № 5.

Смирнова И. В., Мошников В. А., Шилова О. А., Ярославцев Н. П., Ильин А. С. Исследование методом внутреннего трения состава и структуры стекловидных боросиликатных пленок, полученных из золей. № 7.

Старков В. В. Структурирование с применением окисленного макропористого кремния. № 2.

Шаров В. Б., Шешин Е. П., Щука А. А. Автоэлектронные катоды из графита для диодных источников света. № 3.

Шилов И. П., Григорьянц В. В., Кочмарев Л. Ю., Ключник Н. Т., Яковлев М. Я. Высокоапертурные оптоволоконные структуры на основе кварцевого стекла, легированного фтором. № 2.

СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

Адамов Ю. Ф., Губин Я. С., Кокин С. А., Макаров С. В., Сомов О. А. Параметризация и верификация аналоговых блоков для "систем на кристалле" при смене технологии. № 12.

Ерохин В. В. Элементная база систем на кристалле: процессоры. № 1.

Завьялов А. В., Коломенская Н. Г., Молчанова Е. Д. Сверхбольшие интегральные схемы типа "системы на кристалле" и сложные функциональные блоки: основные нюансы при разработке нормативных документов. № 10.

Мальцев П. П. Системы на кристалле: терминология и новые книги. № 5.

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

- Абрамов И. И., Дворников О. В.** Тенденции и проблемы проектирования прецизионных аналоговых интерфейсов. № 10.
- Алексенко А. Г., Балан Н. Н.** Анализ эффекта схлопывания электродов электростатических актюаторов (PULL-IN INSTABILITY) в MEMS- и NEMS-устройствах. № 7.
- Барабаненков М. Ю., Старков В. В.** Микрозеркала на основе двумерных периодических структур из металло-диэлектрических трубок. № 12.
- Бархоткин В. А., Минаков Е. И.** Интеллектуальные вибродатчики. № 2.
- Деспотули А. Л., Андреева А. В., Мальцев П. П.** Наноионные суперконденсаторы с гигантской емкостью для НМСТ. № 11.
- Каштанкин И. А., Гурин Н. Т.** Фоточувствительные кремниевые биполярные N-приборы с управляемой вольт-амперной характеристикой. № 6.
- Каштанкин И. А., Гурин Н. Т.** Динамические характеристики фоточувствительных биполярных N-приборов с управляемой вольт-амперной характеристикой. № 10.
- Кондратьев А. С., Митренин В. Б., Сенчик К. Ю., Васильев Н. Ф., Юхнев А. Д.** Насос для мехатронных перфузионных медицинских систем. № 4.
- Мальцев П. П.** О классификации в области микро-системной техники. № 1.
- Поломошнов С. А., Чаплыгин Ю. А., Амеличев В. В., Годовицын И. В., Иванова О. М., Крутоверцев С. А.** Преобразователь датчика взрывоопасных газов на диэлектрической мембране. № 10.
- Рышков Д. О., Чеча В. В., Щука А. А.** Одноэлектронные приборы. № 4.
- Татмышевский К. В.** Механолюминесцентные датчики давления: классификация и информативность. № 1.
- Федорин В. Н.** Микрооптоэлектромеханические системы для приемников инфракрасного диапазона волн. № 1.
- Якимов А. И., Двуреченский А. В., Никифоров А. И.** Фотоприемники на базе гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge для волоконно-оптических линий связи. № 5.

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

- Бирюков В. И., Панков В. В.** Многоточечный блок для измерения перепада давления. № 3.

- Бочаров Л. Ю.** Анализ тенденций развития исследований и разработок в области создания подводных микроаппаратов. № 3.
- Бурдаков С. Ф., Кириченко В. В., Коротынский А. В., Смольников Б. А., Чистяков В. М.** Классификация зарубежных мини- и микроробототехнических систем военного назначения на основе структурно-функционального подхода. № 4.
- Градецкий В. Г., Князьков М. М., Кравчук Л. Н., Семенов Е. А.** Методы движения миниатюрных управляемых внутритрубных роботов. № 9.
- Даринцев О. В., Мигранов А. Б.** Манипуляционные микроробототехнические системы и проблемы производства гибридных МЭМС. № 2.
- Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Гарцев И. Б., Колядин К. С.** Тенденции развития беспилотных летательных аппаратов мини- и микро-классов. № 2.
- Марков В. Н., Степанов Д. Н.** Распознавание протяженных ферромагнитных объектов на основе полей остаточной намагниченности. № 7.
- Осипов Л. В.** Медицинская электроника. № 12.
- Трошин Е. В.** О проблеме классификации космических аппаратов, порожденной миниатюризацией. № 1.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

- Альтшуллер Г. М., Вакс В. Л., Гайкович К. П.** СВЧ зондирование динамики глубинной температуры при нагреве и охлаждении живых тканей. № 4.
- Заседателев А. С.** Нанобиотехнологии с макро- и микропериферией. Биологические микрочипы. № 11.
- Подурец К. М., Погорелый Д. К., Манушкин А. А., Недорезов В. Г., Соменков В. А., Щетинкин С. А.** Рефракционная интроскопия для медицины и материаловедения на Курчатовском источнике синхротронного излучения. № 6.
- Соборовер Э. И., Ткаченко С. В.** Химические сенсоры на поверхностно-акустических волнах для мультисенсорной системы атмосферного мониторинга. № 1.

ОБСУЖДАЕМ ПРОЕКТЫ

- Спасский С. В.** Вентильный двигатель. № 4.

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ. № 1—12.

НОВОСТИ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ. № 3.

СТРАНИЧКА РФФИ. № 4—7, 9—11.

CONTENTS

Petrinin V. F. *The Nanotechnologies of Nanomaterials* 2
Perspectives of ultra disperse (nano-) powders for the nanotechnologies development in Russia.

Nazarenko V. A. *Neutron Methods on Investigation of Structure and Properties of Materials* 4

This article considers the properties of neutron radiation and the field of its application in fundamental science and applied research. The present status of the construction works of the high-flux research reactor PIK is described.

Chaplygin Yu. A. *Problems of Specialists Training for Nanotechnology Development and Nanostructures Production* 8

The features of training of specialists at nanotechnologies in Russian Federation are considered.

Bykov V. A. *The Nanoelectronics Manufacturing Basis Development in Zelenograd* 11

We consider on development and production of scanning probe microscopes and accessories for nanotechnologies.

Axenov A. I., Bobrinetskii I. I., Nevolin V. K., Simunin M. M. *Carbon Nanotube Bundle Chemical Sensors for Low Concentration of Chlorine Molecules Detection in Air* 12

The electrical characteristics of carbon nanotube bundle structure placed in air containing chlorine molecules was studied. It was shown the structure conductivity increases by up to an order of magnitude when chlorine concentration changes by 0.5 ppm.

Kozlov A. G. *Modelling of Non-Steady Operating Mode of Thermal Cantilever Radiation Microsensor* 16

An analytical method is presented that allows one to model the non-steady operating mode of the thermal cantilever radiation microsensor. In the microsensor, two regions with equivalent parameter are marked out. For each region the non-steady-state heat conduction equation is obtained that is solved by means of the Fourier integral transform by time. The heat flux density between the regions is determined using an adjoint boundary condition. The analytical expression for the frequency response of the thermal subsystem of the microsensor is obtained. Based on the presented method, for the concrete thermal cantilever radiation microsensor the modulus and the angle of the frequency response and the time dependencies of the temperature of hot thermojunctions for the step, harmonic and impulse input actions are determined.

Panfilov Yu. V. *Nanostructured Materials and Nanotechnology: State of the Art. Part II* 26

Analysis of "7th International Conference on Nanostructured Materials" proceedings as well as state of the art in the nanostructured materials and nanotechnology field are carried out. The main attention is paid to chances and risks of activities in the nanostructured materials and nanotechnology fields.

Gordeev S. K., Korchagina S. B., Lamanov A. M., Lamanov M. M., Moia A. M., Slepnev S. P., Sheshin E. P. *New Method for Preparation the Field Emission Cathodes from Graphite Foil* 33

At this paper investigation results of emission properties field cathodes are presented. These cathodes were made of graphite foil. The emission centers on the foil surface were produced by the laser radiation. Threshold field strength of cathodes is under 3 V/ μm .

Adamov Yu. F., Gubin Ya. S., Kokin S. A., Makarov S. V., Somov O. A. *Abstract to Article "Parametrisation and Verification of Analog Blocks for "System on Chip" when Changing Technology"* 37

New parametrisation methods for analog and analog-to-digital blocks by way of the scale transformation when changing specification or fabrication technology have been offered. Functional verification of scaled blocks is executed taking into account parasitic capacitances and resistances of conductors. For acceleration of modeling extractions automatic simplification of the scheme is used, reducing number of parasitic elements. Adequacy of the applicable transformations is checked on example of programmed high-frequency clock oscillator IP-block.

Barabanenkov M. Yu., Starkov V. V. *Micromirrors from Periodical Two Dimensional Metal-Dielectric Hollow Pins* 40

Two dimensional square lattice of hollow silicon dioxide pins is fabricated by a method of macroporous silicon microstructuring. It is proposed to form metal-dielectric structures by metallization of the inner surface of the hollow pins. Mid-infrared reflection and transmission spectra are computed for dielectric and metal-dielectric structures. A dependence of photonic band gap spectral width and magnitude is investigated upon wall thickness of the dielectric pins. It is shown that square lattice of metal-dielectric two-wall pins can function as beam splitter and micromirrors with high reflectivity.

Osipov L. V. *The Electronics of Medicine* 45

Perspectives the Electronics of Medicine use, which is the direction of developed of Russia.

For foreign subscribers:

"NANO and MICROSYSTEMS TECHNIQUES" Magazine (Nano- i mikrosistemnaa tehnika, ISSN 1684-6419)
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, Стромынский пер., 4/1. Телефон редакции журнала (095) 269-5510. E-mail: it@novtex.ru

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

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

Сдано в набор 03.10.2005. Подписано в печать 11.11.2005. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,93. Заказ 2010. Цена договорная

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