

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 8 ✧ 2005

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Издается с 1999 г.

Главный редактор

Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В.

Редакционный совет:

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

Редакционная коллегия:

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

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Безменова М. Ю.
Григорин-Рябова Е. В.
Чугунова А. В.

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Алферов Ж. И. О состоянии и перспективах развития полупроводниковой электроники в России 2

Боресков Г. К. Стратегическое управление научной отраслью. Путь к возрождению 19

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Батурин А. С., Чуприк А. А., Шешин Е. П. Микроскопия латеральных сил: количественный подход 23

Дедков Г. В., Кясов А. А. Взаимодействие движущейся нейтральной наночастицы с равновесным электромагнитным излучением в вакууме . . . 28

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Карташев В. А., Бурухина Т. Ф. Влияние нерезонансных периодических возмущений на положение иглы туннельного микроскопа 31

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 39

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ 48

ИНФОРМАЦИЯ 55

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

УДК 621.38

Ж. И. Алферов, акад. РАН,
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе
РАН, г. Санкт-Петербург

О СОСТОЯНИИ И ПЕРСПЕКТИВАХ РАЗВИТИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ В РОССИИ*

Приведен краткий обзор состояния дел в мире и России в области микроэлектроники, оптоэлектроники, акустоэлектроники и СВЧ-электроники, а также рассматриваются некоторые предложения по развитию отечественной электроники.

Введение

Глобализация в XXI веке всех сфер человеческой деятельности: культуры, транспорта, науки, экономики, военных и террористических конфликтов, сопровождается существенным ростом потоков информации и, соответственно, необходимостью создания баз данных, ее обработки с целью принятия адекватных управленческих и иных решений. Наиболее очевидно влияния информационных технологий проявляются в экономике и военном деле. В глобальной экономике, в условиях жесточайшей конкуренции на рынке издержки производства являются основным фактором, определяющим благополучие/неблагополучие фирмы/страны. Опыт "успешных стран" конца XX века показал, что применение и развитие информационных технологий, автоматизация и роботизация производств, складского оборудования, сфер торговли, учета, электронная коммуникация, в разы увеличили производительность труда и обеспечили существенный "отрыв" в научно-технической и экономической сферах, в уровне жизни их народов от других стран. Опыт военных конфликтов конца XX, начала XXI века также показал преимущество "бесконтактной войны" с помощью "умного оружия".

Передовые информационные технологии возможны только на основе передовой элементной базы электроники. Эта база включает в себя мик-

роэлектронику, оптоэлектронику и СВЧ-электронику. Генеральной линией развития всех этих направлений является уменьшение размеров активных областей приборов до нанометрового диапазона.

Прогресс микроэлектроники обеспечивает решение задач обработки гигантских массивов информации в реальном масштабе времени. Оптоэлектроника обеспечивает надежную сверхскоростную передачу таких массивов, их запись, хранение и отображение. Важная функция оптоэлектроники — мониторинг окружающей среды и сенсорики для медицины и технологии. Использование мощного излучения полупроводниковых лазеров открывает принципиально новые возможности в оперативной медицине и в технологии обработки материалов. СВЧ-электроника призвана решать задачи локализации, навигации и беспроводной связи.

Однако к большому сожалению, технические средства внедряемых информационных систем, в основном, закупаются за рубежом, т. е. базируются на импортной электронике. При этом, что очень печально, производители систем и устройств все более и более адаптируются к импортной элементной базе, и теряют интерес к отечественной электронике. Получается, что вместо того, чтобы вкладывать средства в подъем собственной электронной промышленности, мы инвестируем миллиарды долларов в развитие высоких электронных технологий (и в науку, и в производство) высокоразвитых стран, способствуя их еще более быстрому развитию в ущерб своим интересам. В результате происходит разрушение отечественной электронной промышленности и связанной с ней науки, и соответственно, деградация научного, технологического и кадрового потенциала страны в этом приоритетнейшем научно-техническом направлении. Как следствие, имеют место сворачивание производства в электронной промышленности, невосполнимая потеря высококвалифицированных кадров, научного и технологического уровня разработок и производимой продукции, рост безработицы, со всеми вытекающими отсюда экономическими, социальными и тяжелейшими моральными последствиями (в особенности, для наиболее квалифицированной части научно-технической элиты Российского общества). Естественно, это приводит и к ослаблению оборонного потенциала и попаданию экономики страны в зависимость от импортных поставок стратегической высокотехнологической продукции.

Россия, с ее колоссальными транспортными и энергетическими издержками, очень ограниченными человеческими ресурсами и серьезными геополитическими рисками, просто не выживет в гло-

* Статья подготовлена на основании материалов 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. Информация представлена В. И. Бабкиным.

бальном мире без развития и применения самых передовых технологий, эффективность которых должна превысить климатические и транспортные издержки производства. Основой модернизации страны должно стать развитие информационных технологий, автоматизация и роботизация производств и управления.

Позитивные примеры такого подхода в действительности существуют и в новейшей истории России. Это и передовые (даже по мировым меркам) Государственная автоматизированная система "Выборы", и автоматическая система учета и контроля контейнерных перевозок по Транссибирской магистрали и др.

Для успешного развития страны подобные системы должны быть внедрены во всех сферах государственных, региональных, муниципальных и других систем управления, на каждом предприятии, сельской ферме и т. д.

Столь масштабные задачи, требующие колоссальных объемов электронного оборудования, очевидно, не могут быть решены только за счет импорта. Кроме того, существуют такие критические отрасли, как оборона и некоторые другие, где недопустимо ни отставание от потенциальных противников, ни зависимость от внешних поставщиков.

Статья содержит краткий обзор состояния дел в мире и в России и некоторые предложения по развитию отечественной электроники.

1. ОЦЕНКА ОБЪЕМА И СТРУКТУРЫ РОССИЙСКОГО РЫНКА ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

По данным Федерального фонда развития электронной техники РФ объем рынка электронных систем России в 2003 г. составил около 20 млрд долл. США. Объем покупок элементов современной полупроводниковой электроники по импорту в 2003 г. оценен Федеральным фондом развития электронной техники РФ в 2,2 млрд долл. и подтвержден в части 0,7 млрд долл. результатами статистики Государственного таможенного комитета РФ. Доля интегральных схем оценена в 1,6 млрд долл., полупроводниковых приборов — 0,4 млрд долл., приборов СВЧ техники — 0,15 млрд долл. Согласно отчетным статистическим данным предприятия Российского агентства по системам управления поставили потребителям электронных компонентов, в том числе полупроводниковой электроники, на сумму 230,7 млн долл. Анализ тенденций роста емкости внутреннего рынка полупроводниковой электроники России в последние годы показывает устойчивый рост от 20 до 50 % в год. По оценке Фонда емкость внутреннего рынка России к 2005 г. может составить около 2,5 млрд долл.

Общая оценка объема и структуры Российского рынка электроники дана компанией ООО "Электронинторг-С" (А. Курляндский, С. Орлов, еже-

годник "Живая электроника России", изд. Электронные компоненты, Москва, 2002, с. 10—14; 2004, <http://www.elcp.ru>). Использованы результаты анализа объема и структуры поставок в Россию изделий электроники и электронных компонентов из развитых стран, проведенные консалтинговой фирмой "Future Horizons" (Англия).

На рис. 1 (см. третью сторону обложки) из статьи А. Курляндского, С. Орлова показана схематически структура российского рынка электроники в 2003 г. Согласно этим данным доля рынка компьютерной электроники составляла в 2003 г. 32 %; доля рынка промышленной электроники — 23 %; сегмент коммуникационной (связной) электроники — 23 %; рынок бытовой электроники — 16 %; на долю остальных сегментов рынка российской электроники приходится суммарно 6 %. По этим данным общий объем отечественного рынка электроники в 2001 г. составил около 23 млрд долл. США. По результатам оценок в 2003 г. рынок электронных систем России и СНГ приблизился к 30 млрд долл.

Объем рынка электронных компонентов в 2001 г. по оценке ООО "Электронинторг-С" превысил 1 млрд долл. и вырос в соответствии с ростом ВВП на 30 % к 2004 г. Из рис. 2 видно, что преобладающей частью этого сегмента рынка являются полупроводниковые элементы. Объем рынка полупроводниковых элементов в 2004 г. оценен в размере около 1 млрд долл. (~1/250 мирового объема рынка полупроводников) (рис. 2).

Основываясь на данных правительственных учреждений, ведомств и предприятий РФ рассмотрим более подробно состояние и потенциал важнейших сегментов рынка электроники в России.

Компьютерный сегмент рынка практически целиком основан на поставках персональных компьютеров, микропроцессорных схем и схем памяти по импорту. Производство отечественной элементной базы лежит в основе программы выпуска ПК специального назначения серии "Багет", в котором ключевые элементы электроники изготавливают на

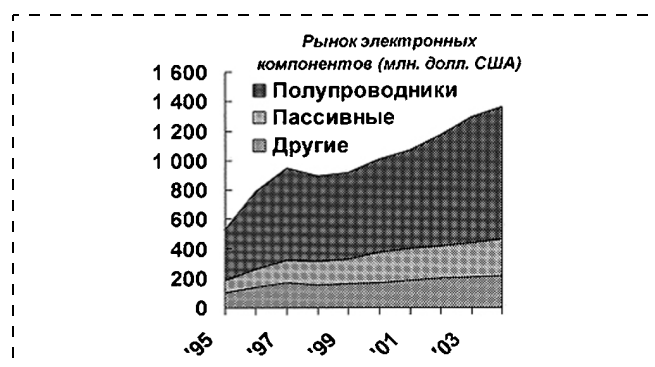


Рис. 2. Оценка объема и структуры отечественного рынка электронных компонентов (млн. долл.)

технологической линии НИИ системных исследований РАН. По данным НИИСИ РАН объем производства микропроцессоров и СБИС в интересах заказчика на 2006—2010 гг. составит до 100 тыс. шт. в год.

По предложению Международного центра по информатике и электронике в 1990-е годы на ряде российских предприятий были организованы лицензионные производства средств вычислительной и телекоммуникационной техники в информационно-безопасном исполнении в целях использования их, прежде всего, в органах государственной власти. При этом под гарантии Правительства РФ были получены иностранные кредитные средства в объеме около 90 млн долл. США. Были созданы высокотехнологические цеха и участки, позволяющие производить практически все компоненты вычислительной и телекоммуникационной техники (кроме СБИС), их тестирование и сборку. За короткий срок (2—3 года) было освоено современное производство в АО "Московский завод "САМ" (серверы на базе RISC и INTEL-платформах, мощностью 2 тыс. шт. в год), ФГУП НПО "Марс" в г. Ульяновске (персональные компьютеры и создаваемые на их основе АСУ специального назначения — 100 тыс. шт. в год), ФГУП "Калугаприбор" в г. Калуге (учрежденческие АТС — 250 тыс. номеров в год).

Однако опыт создания этих производств показал полную зависимость их загрузки от дальнейших поставок по импорту комплектующих, прежде всего микросхем. Высокая стоимость комплектующих и необходимость проведения дополнительных работ по обеспечению безопасности информации, включая входной контроль покупных изделий, не позволили достичь полной проектной мощности созданных лицензионных производств.

По данным ФГУП НПО "Марс", имеющего опыт производства микросхем, освоение новых технологий в России по проектированию и производству микросхем и других электронных компонентов специального назначения различной степени интеграции позволило бы снизить технологическую зависимость от импортеров и увеличить объем производства ПК и АСУ до проектной мощности, используя ежегодно только на одном заводе в г. Ульяновске примерно 3 млн микросхем 30 наименований и примерно 1 млн микросхем 10 наименований для аппаратуры передачи данных по АТМ технологиям.

По данным Федеральной адресной инвестиционной программы государственные капитальные вложения по ФЦП "Электронная Россия" в части Министерства РФ по связи и информатизации на 2004 г. составили 461,4 млн руб. (около 16 млн долл.), включая приобретение вычислительной техники и телекоммуникационного оборудования.

Важный потенциальный сегмент потребления электронных систем и компонентов связан с развитием финансовой и банковской систем, в том числе с электронной защитой вкладов и наличных средств. Другой важный сегмент рынка связан с планируемым в Правительстве РФ введением с 2006 г. электронных паспортов для граждан России. Поставка полупроводниковых элементов для указанных сегментов рынка может быть оценена в объеме до 100 млн долл.

Рынок телекоммуникационного оборудования, в особенности сектор беспроводной связи, является наиболее быстрорастущим. Как и компьютерный, этот сегмент рынка развивается также в основном за счет импортных поставок. Ожидается, что модернизация телекоммуникационных сетей проводной связи в России потребует до 35 млрд долл. в ближайшие 10 лет (данные компании "Электронинтерг").

Рынок промышленной электроники является наиболее быстроразвивающимся и его потенциал оценивается для ближайшего будущего в десятки миллиардов долларов.

Для обоснования этой позиции приведем оценку потенциального рынка сбыта устройств электроники потребителям электроэнергии, исходя из мировых тенденций развития энергосберегающих технологий. Оценка проведена ОАО "Силовая электроника Сибири" и Новосибирским государственным техническим университетом на основе данных РАО "ЕЭС России". В табл. 1 приведены предельные оценки стоимости электронного оборудования и полупроводниковых элементов (управляемые тиристоры, биполярные транзисторы с изолированным затвором, электронные драйверы, снабберы и др.), необходимых для реализации современного уровня энергосбережения для различных отраслей промышленности. Принят диапазон удельной стоимости устройств электроники 0,08—2,0 долл./Вт при обратной зависимости стоимости подлежащих установке устройств от их мощности.

Из табл. 1 следует, что предельная емкость рынка устройств промышленной (силовой) электроники при реализации программ энергосбережения в России составляет 18,1 млрд долл., а емкость рынка силовых полупроводниковых приборов — 5,8 млрд долл. При проведении оценки не учтен фактор роста генерирующих мощностей в ближайшие годы, а также затраты на электронные устройства при реконструкции и ремонте объектов энергетики.

По данным Департамента разработки и испытаний ядерных боеприпасов Министерства по атомной энергии РФ в перспективных изделиях Министерства на ближайшие годы предполагается применение около тысячи типов изделий отечественной полупроводниковой микроэлектроники, из них

Таблица 1

Применение устройств электроники

№	Область применения устройств электроники	Установленные мощности, кВт	Стоимость необходимых к установке устройств электроники, млн долл	Стоимость полупроводниковых приборов в составе устройств электроники, млн долл.
1	Преобразователи для снижения затрат на собственные нужды генерирующих электростанций	$1,2 - 10^7$	1200	400
2	Подстанции для экспорта электроэнергии за рубеж	$1,8 - 10^7$	1580	546
3	Промышленность в целом	$7,6 - 10^7$	7650	2296
3.1	Топливная промышленность		1690	505
3.2	Черная металлургия		1070	321
3.3	Цветная металлургия		1380	413
3.4	Химия и нефтехимия		918	273
3.5	Машиностроение и металлообработка		1080	344
4	Связь	$5,0 \cdot 10^6$	3900	1300
5	Железнодорожный и городской электрический транспорт	$1,0 \cdot 10^7$	490	195
6	Автомобильный транспорт		310	103
7	Жилищно-коммунальное хозяйство	$2,9 \cdot 10^7$	2940	980
7.1	Освещение		2400	800
7.2	Обогрев и бытовая электроника		540	180
	Итого		18100	5820

600 типов — радиационно стойких. На предприятиях Минатома осваивается около 50 типов радиационно стойких СБИС и 20 типов элементов радиационно стойкой микроэлектроники. Министерство использует около 350 типов изделий полупроводниковой микроэлектроники, импортируемых из дальнего зарубежья. Суммарная потребность предприятий ядерно-оружейного комплекса на 2004 г. составляет по полупроводниковым приборам около 120 тыс. шт., по интегральным микросхемам ~80 тыс. шт. Крупным сегментом потребностей предприятий Минатома являются системы силовой и управляющей электроники для реализации программ энергосбережения.

Для Министерства путей сообщения РФ важнейшие области применения электронных систем связаны с созданием нового поколения электровазов, автоматизацией учета вагонного парка, созданием автоматизированных систем технического диагностирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики (АСТД СЖАТ), систем дистанционного контроля технического состояния

подвижного состава. По данным КТИ вычислительной техники СО РАН оборудование Российских железных дорог системами АСТД СЖАТ потребует не менее 20 млн изделий полупроводниковой электроники (микроконтроллеры, схемы памяти, операционные усилители, АЦП, преобразователи постоянного тока, драйверы интерфейсов, устройства выборки-хранения и др.).

Сеть медицинских учреждений **Министерства здравоохранения РФ** имеет большой потенциал с точки зрения оснащения современными системами для радиометрической, тепловизионной, томографической, акустической, биочиповой и других видов диагностики и лечения. Номенклатура и объем необходимого электронного оборудования и полупроводниковых элементов подлежит определению.

Геополитическое и внутреннее положение России обуславливает особую важность использования современных электронных систем при решении задач силовых ведомств Российской Федерации, а также Российского авиационно-космического агентства и Российского агентства по обычным вооружениям. Специфика работы указанных ведомств затрудняет оценку потребности в электронных системах и полупроводниковых элементах. Один из путей оценки данного сегмента для потребления электронных устройств состоит в использовании данных по объему экспорта вооружений. По опубликованным данным ФГУП "Рособоронэкспорт" (см. Независимое военное обозрение. № 41(356) за 21—27 ноября 2003 г.) портфель заказов по экспорту вооружений в 2003 г. превышает 15 млрд долл. Долю электронных систем и компонентов можно оценить в размере 5—10 % от указанного объема, что составляет 0,8—1,5 млрд долл. Доля полупроводниковых элементов может быть оценена в объеме 100 млн долл. Можно предположить, что данная оценка является оценкой по нижнему пределу в связи с многообразием стоящих перед силовыми ведомствами России задач (оснащение и переоснащение сухопутных войск, авиации, флота, космических систем современными средствами доставки к цели, связи, радиолокационной борьбы, радиационно стойкой электроникой; разработкой новых средств противодействия терроризму; освоение возможностей нанотехнологий и многое другое).

Приоритетной для России проблемой признана задача оборудования государственной границы на современном уровне. В соответствии с разработанными **Федеральной пограничной службой РФ** программами предусмотрено оснащение пограничных застав стационарными и носимыми комплексами радиолокационных, оптико-электронных и навигационно-связных систем. Их данные вместе с данными работающих в автономном режиме электронных систем наблюдения и регистрации обста-

новки и средствами автоматизации надлежит связать в локальные вычислительные сети опорных пунктов пограничной службы. В настоящее время ведется работа по окончательному формированию проектных заданий, на основе которых будет определен объем необходимых расходов на оборудование государственной границы электронными системами и оценена потребность в полупроводниковых элементах.

В заключение этого раздела отметим, что можно считать достоверной оценку рынка полупроводниковых элементов в объеме не менее 1 млрд долл. в год. В структуре рынка преобладают полупроводниковые элементы для компьютерной, телекоммуникационной, промышленной и бытовой электроники. Российский рынок электронных систем и полупроводниковых компонентов имеет несомненный потенциал развития, связанный с реализацией программ энергосбережения, оснащением современными АСУ ТП и средствами диагностирования и учета предприятий Министерства путей сообщения, Министерства по атомной энергии, нефте- и газовой промышленности и других отраслей промышленности страны. Особое значение имеют программы применения новейших электронных систем при решении задач силовых ведомств России. Крупные сегменты рынка электронных систем и полупроводниковых элементов связаны с охраной здоровья населения, программой информатизации общества, включая введение современных систем банковского и финансового учета, защиту финансовых средств и введение электронных паспортов граждан.

Приведенные выше данные позволяют оценить потенциал российского рынка полупроводниковых элементов в несколько миллиардов долларов ежегодно.

2. СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРОНИКИ В РОССИИ И В МИРЕ

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

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

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

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

До 1985 г. в СССР развитию микроэлектроники уделяли необходимое внимание. К этому времени отставание от США составляло 1,5—2 года. Эта цифра относится к производству, в то время как в разработках новых изделий микроэлектроники отставания практически не было.

Начиная с 1986 года, объемы финансирования НИОКР начали резко сокращаться что, естественно, повлекло наращивание отставания от ведущих стран, таких как США и Япония (рис. 3, см. третью сторону обложки). Совершенно иная ситуация наблюдается там, где электроника вообще и микроэлектроника в частности усиленно поддерживаются государством, например, в Китае (рис. 4, см. третью сторону обложки). Более того, можно сказать, что Китай ставит задачу через 5 лет стать мировым лидером по производству интегральных схем, а в дальнейшем не только занять лидирующие позиции в производстве, но и стать и законодателем в области разработок. Ожидается, что через четыре года китайская электронная промышленность будет обеспечивать около 30 % мировой потребности в интегральных схемах. Китайское правительство постоянно поддерживает национальный приоритет электроники в исследовательских центрах, ежегодно технические университеты выпускают 450 тыс. инженеров. Естественно, электроника и микроэлектроника, как главная ее составляющая, выступают в роли локомотива научно-технической революции и выводит другие отрасли на все новые и новые рубежи (рис. 5).

Усилия правительств всех передовых промышленных стран — США, Японии, Германии, Англии, Франции, Китая, Южной Кореи, Тайваня — направлены на развитие производства и повышение конкурентоспособности электронной техники.

Производство электронной техники на душу населения показано на рис. 6 (см. третью сторону обложки).

Что дают вложения в электронику?

- 1 доллар вложений дает 100 долларов в конечном продукте;

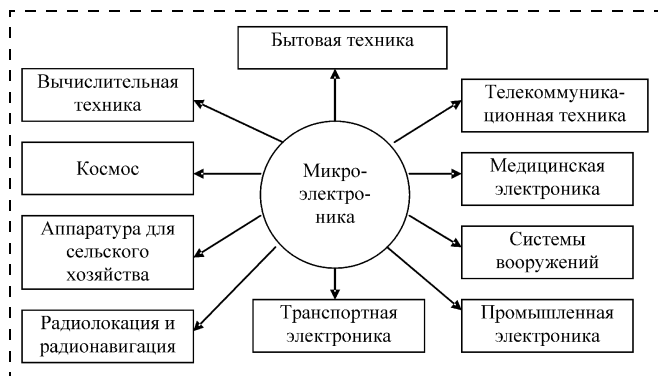


Рис. 5. Области применения микроэлектроники

- уровень рентабельности ~40 %;
- среднемировой срок окупаемости вложений в электронику ~2—3 года;
- темпы роста в 3 раза выше темпов роста ВВП;
- 1 рабочее место в электронике дает 4 рабочих места в других отраслях;
- 1 кг изделий микроэлектроники по стоимости эквивалентен стоимости 110 тонн нефти.

Непрерывно растет доля полупроводниковых компонентов в электронной аппаратуре с 5 % в 1960 году до 20 % в 2000 году. Если рассмотреть структуру производства интегральных схем по типам изделий в мире (рис. 7), то можно сказать что наш уровень технологии позволяет делать только класс изделий уровня 0,8—1,0 мкм — это аналоговые ИС и дискретные полупроводниковые приборы. Необходимо отметить, что несмотря на большой объем производства технологий уровня 0,8—1,0 мкм, основная прибыль получается при производстве изделий уровня технологии 0,1—0,5 мкм. Здесь, как видно из рис. 7, лежит все многообразие интегральных схем. Поэтому сюда полностью можно отнести оценку Миннауки РФ — 40 % мирового рынка высоких технологий сегодня контролируется США. Доля России составляет меньше 0,5 %. Между тем, у нас работает около 12 % всех ученых и инженеров-разработчиков, а в Америке — всего в 2 раза больше — 25 %.

Ситуация в отечественной электронной промышленности уже давно вызывает у специалистов тревогу. Бурное развитие микроэлектронных технологий (сейчас это технологии с минимальными размерами элементов меньше 0,1 мкм), постоянное уменьшение минимальных размеров элементов и, как следствие, рост интеграции, все большее количество окончательных функций в одном кристалле, постоянное совершенствование и развитие систем автоматизированного проектирования ультрабольших ИС и средств программного обеспечения, сложности программ позволяют ведущим американским, японским, европейским, южнокорейским, тайваньским полупроводниковым ком-

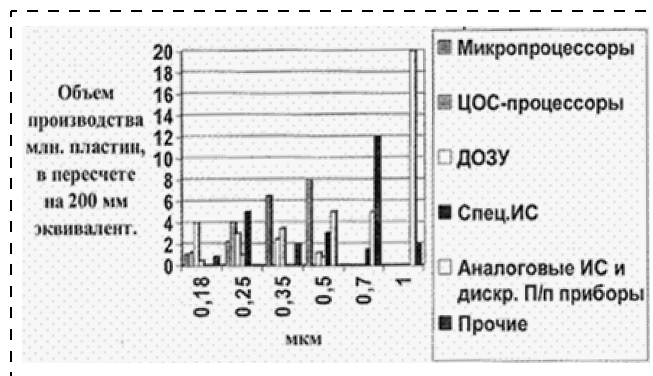


Рис. 7. Структура производства полупроводниковых приборов по типам изделий

паниям выбрасывать на рынок все новые и новые изделия микроэлектроники и на их основе все новые и новые телекоммуникационные, компьютерные, автомобильные, бытовые и другие системы и устройства, прочно завоевывая рынки высоких технологий. Это объясняется крупными капиталовложениями в развитие современных технологий. Следует отметить, что с некоторым отставанием это происходит и в Китае, который успешно развивает электронную промышленность как за счет собственных средств, так и за счет привлечения инвестиций ведущих зарубежных фирм (*Motorola, NEC, Fillips* и др.). Это позволило Китаю уже сегодня выйти на уровень микроэлектронных технологий с минимальными размерами 0,2...0,25 мкм.

Об объемах вложений на развитие технологии можно составить представление на следующем примере. Одна только американская фирма *Intel* — мировой законодатель в области микропроцессоров — запланировала в 2000 г. потратить 7,5 млрд долл. на программу освоения 0,13 мкм-технологии и перехода к кремниевым пластинам диаметром 300 мм.

Совершенно иная ситуация сложилась у нас в стране. Финансирование микроэлектронной (электронной) компонентной базы в рамках Федеральной программы Национальная технологическая база (НТБ) дает возможность лишь частично проводить НИОКР, но не позволяет осуществлять проекты по созданию современных производств микроэлектроники в отсутствие инвестиций. Следует отметить, что финансирование таких программ, как НТБ по программе "микроэлектронные технологии", основывается на остаточном принципе и не позволяет добиться существенного прорыва в исследованиях и разработках современных технологий, т. е. прежде всего создания промышленных технологий и производств.

Примером могут служить даже те направления, в которых наши специалисты добились успехов, соответствующих мировому уровню в исследованиях. Это технологии создания:

- полупроводниковых приборов на GaAs гетероструктурах;
- структур "кремний на изоляторе";
- приборов и устройств микросистемной техники, где на одной подложке представлены и механические устройства и система управления;
- полимерной электроники — это приборы отображения информации, различные видеомодули и ИС управления на основе собственно органических полупроводников.

Следует отметить, что в 2002 г. в мире было введено 28 фабрик, в 2003 г. — 26 (из них 10 на размер 0,09—0,15 мкм), в 2004 г. планировалось ввести 22 фабрики, в 2005 г. — 21 (все фабрики на размер менее 0,1 мкм и 300 мм пластины). Объем капитальных вложений в полупроводниковую промышленность составил в 2003 г. 29,7 млрд долл., а в 2004 г. — 37,5 млрд долл. В 2005 г. ожидается начало внедрения в производство кремниевых пластин диаметром 450 мм.

Развитие микроэлектроники подразумевает развитие трех составляющих: оборудования; технологии, электронных материалов.

Оборудование. Наиболее сложным видом оборудования, в котором мы отстаем, является оборудование литографическое. Для того чтобы транзисторы сделать меньше, необходимо уменьшить геометрические размеры линий, наносимых на слой фоторезиста. Переход к все меньшим и меньшим размерам происходит за счет совершенствования оптики и вспомогательных процессов. Изменение длины волны источника в литографических процессах с минимальными размерами элементов показано на рис. 8.

Разработка оборудования связана непосредственно с разработкой **технологии** и результатом является создание каждый раз нового поколения интегральных схем. Наиболее ярко это можно продемонстрировать на таких изделиях, как микропроцессоры. На рис. 9 показано развитие микро-

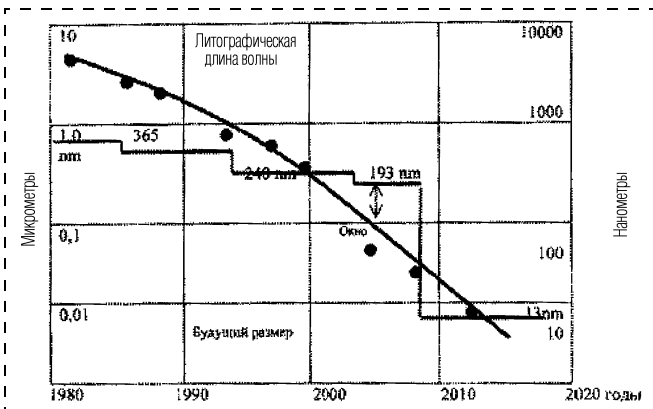


Рис. 8. Изменение длины волны источника в литографическом процессе

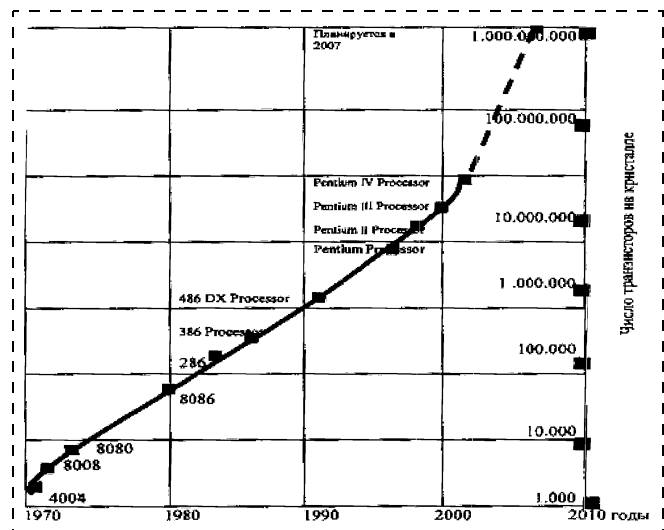


Рис. 9. Рост числа транзисторов в процессорах фирмы Intel

процессорной техники на примере американской фирмы *Intel*. Так, широко выпускаемый с 2002 г. микропроцессор *Pentium IV* с минимальными размерами элементов 0,13 мкм имеет степень интеграции на уровне 50 млн транзисторов на кристалле.

По разработанной фирмой *Intel* технологии 0,065 мкм (65 нм) с 2005 г. планируется выпуск изделий со степенью интеграции свыше 100 млн транзисторов, а это уже сверхсложная микропроцессорная техника, применение которой в вычислительной технике, системах управления дает новое качество конечных изделий.

Прогноз тенденции уменьшения минимальных топологических размеров цифровых интегральных схем на период до 2020 года представлен в табл. 2.

Следующим важным фактором в производстве и совершенствовании современной электронной компонентной базы являются **специальные материалы**. Такими материалами являются:

- кремний и структуры на его основе;
- соединения A_3B_5 и соответствующие структуры;
- материалы, необходимые для проведения процесса фотолитографии (фоторезисты, фотошаблоны);
- целый ряд химических соединений (газообразных и жидких), используемых при очистке поверхности, в процессах диффузии, ионной имплантации, травлении рельефа и др.

В области микроэлектроники по этому поводу можно сказать — у нас нет соответствующих производств и мы не можем выпускать передовую микроэлектронную технику, хотя наши ученые и разработчики способны сегодня эту технику делать, имеются научно-технические заделы.

Необходима государственная поддержка в создании новейших производств микроэлектроники, нужно поэтапно, ускоренными методами создавать эти производства.

Таблица 2

Прогноз тенденций уменьшения минимальных топологических размеров (мкм) цифровых интегральных схем на период до 2020 г.

Годы									
1995	1997	1999	2000	2001	2003	2005	2010	2015	2020
<i>Мировые достижения в промышленном производстве</i>									
0,35	0,25	0,18	0,18	<u>0,13</u>	0,09	0,07	0,05	0,03	0,02
<i>Закупка микроэлектроники Минобороны США</i>									
1,0			0,5		0,35	0,25	0,18	0,13	0,09
<i>Российские достижения</i>									
1,0	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8	0,5 0,35	0,35 0,25	0,18 0,13	0,07
Отсутствие необходимого государственного финансирования на развитие микроэлектроники и обеспечение технологическим оборудованием и материалами с 1990 по 2000 гг.					Возможный вариант развития при выделении необходимого финансирования на <u>закупку зарубежного технологического оборудования и материалов</u>				

3. СОСТОЯНИЕ ДЕЛ И ПЕРСПЕКТИВЫ УФ И ЭУФ ЛИТОГРАФИИ

Основой информационных (компьютерных) технологий является передовая элементная база для создания компьютеров, устройств автоматики и коммуникации и т. п.: диоды, транзисторы, элементы опто- и нанoeлектроники, большие и сверхбольшие интегральные схемы, процессоры и др.

Создание большой интегральной схемы представляет собой сложный технологический процесс, включающий ряд основных технологических стадий.

1. **Подготовка**, включающая: резку кремниевых подложек из болванки чистого кремния; химические материалы и газы для процесса изготовления чипа; металлы, такие как алюминий, медь и золото, для проводников в чипе; источник УФ излучения, для экспонирования фоторезистов; маски.

2. **Изготовление**, включающее следующие технологические процессы: окисление кремния высокотемпературным нагревом в атмосфере газа; нанесение и растворение фоторезиста; облучение фоторезиста источником УФ излучения через маску с желаемой топологией чипа; химическое травление оксида кремния и напыляемых материалов; ионная имплантация (допирование) кремния; нанесение поликристаллического кремния и металлических пленок (проводники).

В целом, при производстве чипа, описанные выше процедуры выполняются примерно на 20 слоях, формируя 3D структуру. Общее число операций при производстве одного чипа превышает 250. С целью увеличения производительности (уменьшения стоимости изделия), одновременно на одной кремниевой пластине изготавливаются сотни идентичных чипов, а стандартные пластины достигают в диаметре 300 мм.

3. **Тестирование, резка и упаковка чипов.** После изготовления чипов на пластине все электрические цепи каждого чипа тестируются. Затем пластина разрезается алмазным инструментом, и каждый чип отделяется. Чип устанавливается в герметичный корпус, вновь тестируется и после этого готов к использованию.

4. **Испытания изготовленных изделий** с целью выяснения их надежности и вероятности отказов.

Основные технические характеристики чипа, такие как плотность информации, скорость передачи данных, энергопотребление во многом определяются размерами электронных компонентов, прежде всего транзисторов. Для минимизации этих размеров ключевым звеном в технологическом процессе является литографическое оборудование, включающее в себя источник УФ излучения (эксиммерный лазер), оптическую систему переноса изображения, систему позиционирования, сканирования и совмещения маски и фотошаблона.

В настоящее время основные успехи в области субмикрометровой литографии связаны с применением излучения эксимерных лазеров с длинами волн 248 и 193 нм. Мировым лидером по производству литографического оборудования является компания ASM Lithography, Нидерланды. Выпускаемая ими литографическая установка TWINSKANTM AT: 1200 В, оснащенная ArF эксимерным лазером мощностью 20 Вт, с рабочей длиной волны 193 нм, обеспечивает пространственное разрешение 80 нм на пластинах с диаметром 300 мм.

В табл. 3 приведены параметры интегральных схем, достигнутые к настоящему времени и прогнозируемые, с использованием различных технологий. В табл. 4 представлены технологии экспонирования фоторезистов, которые должны в пер-

Таблица 3

Прогнозы параметров ультрабольших интегральных схем

Параметры	1999 г.	2001 г.	2003 г.	2006 г.	2009 г.	2012 г.	2015—2020 гг.
Минимальные размеры, нм	180	150	130	90	70	50	10
Емкость памяти на чипе, Гбит (экспериментальные образцы)	1		4	16	64	256	
Емкость памяти на чипе, Гбит (производство)	0,256	1	1	4	16	64	
Транзисторов/см ²	$6,2 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^6$	$18 \cdot 10^6$	$39 \cdot 10^6$	$84 \cdot 10^6$	$180 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^9$
Частота на чипе, МГц	500—1250	600—1500	700—2100	900—3500	1200—6000	1500—10000	5000—30000
Максимальная рассеиваемая мощность (радиатором), Вт	90	110	130	160	170	175	250—500
Размер чипа, мм ²	400	445	560	820	1120	1580	
Число уровней соединений	6—7	7	13	20	22—25	20—25	

Таблица 4

Тенденции развития литографии

Емкость памяти на чипе, бит	Год	Разрешение, мкм	Технология экспонирования фоторезиста
64 М	1995	0,3—0,35	Излучение эксимерных KrF лазеров ($\lambda = 248$ нм)
256 М	1998	0,25	Излучение эксимерных ArF лазеров ($\lambda = 193$ нм)
1 Г	2001	0,18—0,13	Излучение эксимерных KrF ($\lambda = 248$ нм) и ArF ($\lambda = 193$ нм) лазеров
4 Г	2004	0,13—0,1	Излучение эксимерных ArF лазеров ($\lambda = 193$ нм) EUV-литография
16 Г	2007	0,1	Излучение эксимерных F2 лазеров ($\lambda = 157$ нм) EUV-литография
64 Г	2010	0,07	EUV-литография
256 Г	2013	0,03—0,04	EUV-литография

спективе обеспечить производство интегральных схем, приведенных в табл. 2. К данным таблицам нужно относиться весьма осторожно, так как практика показала, что как раз в области совершенствования технологии микроэлектроники все происходит существенно быстрее, чем планируется.

Как видно из таблиц, использование УФ излучения позволило получить минимальный размер элемента чипа на уровне 0,1 мкм. Фундаментальным препятствием на пути уменьшения размеров элементов интегральных схем является дифракционное искажение изображения УФ излучения на линзах, апертурах и масках литографической установки. К настоящему времени увеличение размера линз практически исчерпало, как экономические возможности (стоимость высокоапертурных линз), так и технологические возможности их изготовления. Поэтому ведущими мировыми производителями больших интегральных схем (*Intel*, *AMD*), рассматривается (и реализуется) следующая стратегия. Для корректировки изображения маски используются дополнительные прямоугольники

таким образом, что распределение освещенности на подложке соответствует желаемому, несмотря на дифракцию излучения. Другое решение заключается в применении специальных, так называемых фазосдвигающих масок. В этих масках на их поверхность селективно наносятся материалы, перекрывающие пучки, приводящие к размытости изображения, вызванной дифракцией.

Оба этих метода заметно усложняют конструкцию масок, что приводит к существенному браку при их производстве (от 30 до 50 %), а также удорожанию конечного продукта. Помимо экономической возникают и чисто технические проблемы, как с расчетами корректирующих элементов (например, расчет 22—25 масок с коррекцией изображения для процессора, построенного по технологии 90 нм уже требует более 200 Гбит данных), так и с точностью их изготовления. Таким образом, эта стратегия, направленная на уменьшение минимального размера элемента интегральных схем, также имеет ограниченные возможности.

Перспективной стратегией в рамках УФ литографии является уменьшение длины волны излучения, в частности, переход к длине волны 157 нм (излучение эксимерного р2 лазера). Однако возможности этой технологии для перехода к размерам элементов нанометрового диапазона также ограничены (см. табл. 2)

Кардинальный переход, к которому реально готово мировое сообщество, связан с освоением диапазона экстремального ультрафиолетового излучения с длиной волны 13 нм. В США, учитывая практическую важность создания технологии EUV-литографии (область экстремального ультрафиолетового излучения), большую стоимость и сложность разработки, в сентябре 1997 г. для решения этой проблемы была создана, так называемая, Виртуальная национальная лаборатория (VNL), включающая, кроме национальных лабораторий Министерства энергетики (*Lawrence Berkley, Livermore and Sandia National Laboratories*), частные компании, такие как *Intel, Motorola, Advanced Micro De-*

vices (AMD). Уже в марте 1999 г. года в фирме Motorola с применением этой технологии были получены рисунки с пространственным разрешением до 30 нм. В 2000 г. в Ливерморской национальной лаборатории был изготовлен первый вариант (*a-tool*) установки совмещения и экспонирования (так называемого степпера) и в настоящее время проходит стадия выпуска малой серии (*p-tool*).

В Европе фирмой координатором работ в области EUV-литографии является фирма *ASM Lithography (ASML)* (Нидерланды), которая в дальнейшем и будет изготавливать степперы. Можно также отметить, что основным изготовителем степперов *ASML* построен специальный корпус, где проходят монтаж и испытания узлов степпера. Фирма *Carl Zeiss* отвечает за оптику, *ASM Lithography* практически отвечает за выбор источника излучения. Изготовление и испытания *a-tool* степпера должны быть закончены в 2004 г., *p-tool* — в 2005 г., *y-tool* в 2007 г. Предполагается, что Европа будет очень незначительно отставать в области проекционной литографии от США. Подобные исследования активно проводятся в Японии. Существует национальная программа "*EUVL Research Program at ASET*", в которую включены многие исследовательские группы. Планы создания полной технологии EUV-литографии практически совпадают с планами США.

Следует отметить широкое использование западными фирмами и фирмами Японии российских ученых по различным контрактам, которые, без преувеличения, занимают ведущее положение в разработке техники и технологии EUV-литографии.

В России технология субмикронной микроэлектроники осталась на уровне середины 1980-х годов. Если в мире изготавливают интегральные схемы с топологическим размером 0,13—0,16 мкм (см. табл. 2), то у нас — на уровне 0,8—1,2 мкм. Ситуация существенно изменится в 2005 г. с запуском в Зеленограде ("Ангстрем") линии по производству чипов с топологией 0,25 мкм, однако и это будет мировой уровень 1995 г. (табл. 3).

Для вывода России на передовой мировой уровень в области создания интегральных схем, вследствие 20 лет практического отсутствия эволюции этой технологии в стране, единственно возможным вариантом является закупка современного завода по производству чипов с топологией 0,1—0,13 мкм. Этот шаг, во-первых, позволит наладить производство в стране современных уже на данный момент чипов, во-вторых, даст возможность нашим технологам и разработчикам электронных компонентов и производителям аналогичного оборудования напрямую "приобщиться" к самым передовым технологиям в области производства чипов, в-третьих, даст мощный толчок для исследований в области нанотехнологий в стране. Ведь не секрет, что из-за

физической невозможности создания наноструктур в России, в настоящее время многие научные идеи и разработки отечественным ученым приходится проводить в западных фирмах, а это ведет как к потере интеллектуальной собственности самими этими учеными, так и к потере самых передовых технологий Россией.

При наличии такого завода в стране параллельно с реальным производством чипов будут проводиться научно-технологические работы по созданию фазовых масок и использованию иммерсионных веществ с целью уменьшения минимальных топологических размеров элементов ИС со стандартных 0,1—0,13 мкм до 0,07—0,09 мкм.

Сейчас силами ИФМ РАН, ФТИ им. Иоффе РАН, ТРИНИТИ, НИИИС и некоторых других институтов успешно развивается EUV-литография, которая обеспечит уменьшение топологических размеров от 0,04 до 0,01 мкм.

Объединение этих технологий обеспечит России до середины XXI века ведущие позиции в мире в области производства больших и сверхбольших интегральных схем.

Основным направлением по прогнозам SEMI-TECH, которое будет определять развитие электроники (наноэлектроники) с 2010 года будет EUV-литография на длине волны 13,5 нм. Это направление очень динамично развивается в США, Европе и Японии. В научной части проектов задействована значительная группа российских институтов и отдельных ученых. Многие годы ИФМ РАН принимает участие в зарубежных проектах и сейчас имеет передовые позиции и понимание проблемы. С 2003 года в ИФМ РАН ведется проект по созданию макета литографа. Благодаря появлению небольших денег удастся объединить находящихся в России и за рубежом исследователей. Сейчас проектируется литограф малой производительности для спецпроизводства. В случае приобретения передового микроэлектронного производства можно начать разработку литографа, который впоследствии заменит штатный. По нашим оценкам, работа при соответствующем финансировании (100—150 млн долл. в год) займет 5 лет. По нашему мнению такие действия позволят России вернуться на общий путь развития и закрепиться в мировой микроэлектронике и наноэлектронике.

4. ГЕТЕРОСТРУКТУРНАЯ СВЧ ЭЛЕКТРОНИКА

Сферы применения наногетероструктурной электроники. В отличие от технологии кремниевых БИС и СБИС, доминирующей в системах обработки информации, *наногетероструктурная электроника становится доминирующей в системах передачи информации, передачи данных.* Эта новейшая наукоемкая электронная технология определяет стремительный прогресс современных средств связи,

включая сотовую цифровую телефонию 3-го поколения, высокоскоростной интернет, спутниковую связь, цифровое ТВ, сверхскоростную оптоволоконную связь, беспроводные системы связи широкополосного доступа с предоставлением услуг мультимедиа (передача сложных изображений, видеоконференции, дистанционное обучение, дистанционное управление и т. д.), автомобильные радиолокаторы, а также развитие *современных электронных средств вооружений* (бортовых и наземных радиолокаторов, средств радиоэлектронной борьбы и т. д.).

Основные преимущества наногетероструктурной технологии. Эта технология, базирующаяся на высокопрецизионных наногетероструктурах, обеспечила наивысшие скорости полета электронов в приборах и наименьшие диссипативные потери, позволила управлять шириной запрещенных зон в наногетероструктурах и сделала возможным создание самых высокоскоростных и высокочастотных из всех известных твердотельных приборов с рекордным усилением, с минимальными шумами (для приемных устройств), максимальной выходной мощностью и КПД (для передающих устройств).

Физика наногетероструктур — основа уникальных характеристик приборов на их основе. *Квантово-размерные эффекты*, обусловленные нанометровыми толщинами слоев в транзисторных гетероструктурах, определяют характеристики приборов на их основе. Это открыло уникальную возможность, посредством варьирования толщиной приборного канала и его составом, управлять его основными характеристиками, включая:

- эффективную ширину запрещенной зоны и, соответственно, пороговое напряжение для ударной ионизации электронов и пробивное напряжение транзистора;
- электронную плотность, подвижность и дрейфовую скорость насыщения, а также температуру электронного газа $T_{эл}$.

В свою очередь, это позволило управляемо задавать значения рабочих токов, частотные характеристики, усиление, шумовые характеристики, выходную мощность, КПД и т. д.

В отличие от глубокого фундаментального поиска, сосредоточенного на электронных системах низкой плотности при низких температурах в слабых электрических полях, когда разыгрываются такие уникальные явления, как вигнеровская кристаллизация электронного газа и др., физика транзисторных наногетероструктур базируется на электронных системах с высокой плотностью носителей, т. е. когда заполнено несколько электронных подзон или уровней, при комнатных и более высоких температурах, и их поведении в сильных электрических полях (вплоть до ударной ионизации). По-

скольку характерная энергия размерного квантования здесь порядка 100 мэВ, т. е. существенно больше, чем энергия, соответствующая комнатной температуре, $kT_{комн} = 26$ мэВ, эффекты размерного квантования проявляются при реальных рабочих условиях функционирования приборов.

Наногетероструктурная электроника — первая приборная электронная нанотехнология. Объединение физики и технологии наногетероструктур с технологией изготовления приборов на их основе и привело к созданию наногетероструктурной электроники. Успешное применение здесь последних достижений электронной литографии для формирования транзисторов с длиной затвора до $L_3 = 20...30$ нм, т. е. меньшей, чем дебройлевская длина волны электрона, позволяет отнести эту технологию, первую среди других транзисторных технологий, к нанотехнологии.

Элементная база наногетероструктурных интегральных схем:

- униполярные полевые транзисторы с электронным газом высокой подвижности, т. е. *HEMT* (*High Electron Mobility Transistor*);
- гетеробиполярные транзисторы;
- туннельно-резонансные приборы на квантовых ямах, обладающие наряду с рекордным быстродействием уникальными функциональными возможностями;
- гетероструктурные транзисторы на квантовых точках.

Промышленное производство наногетероструктурных приборов за рубежом. Созданный в последние десятилетия научный и технологический задел по физике и технологии наногетероструктур и по технологии изготовления приборов на их основе дал мощный импульс стремительному промышленному освоению этой новейшей технологии, пока, к сожалению, за рубежом. Объем мировых ежегодных продаж только самих гетероструктурных транзисторов и МИС уже приблизился к 7—8 млрд долл., ежегодно увеличиваясь более чем на 30 %. По всем прогнозам рынок этих изделий на ближайшие 12—15 лет, и далее будет оставаться наиболее привлекательным для инвестиций.

К настоящему времени налажено массовое производство гетероструктур на пластинах диаметром до 150 мм и гетероструктурных транзисторов и монокристаллических интегральных схем (МИС) для различных применений.

Наиболее массовой областью применения этой технологии является сотовая связь, сейчас это цифровая сотовая связь 3-го поколения. Она занимает около 57 % "гетероструктурного" рынка. Гетеротранзисторы содержатся почти в каждом выпускаемом в мире сотовом телефоне.

Около 23 % занимает быстро прогрессирующая высокоскоростная волоконно-оптическая связь,

потребляющая гетероструктурные МИС миллиметрового диапазона на частоты до 60 ГГц и выше. Ведутся разработки приборов на частоты до 100 ГГц и выше.

Около 12 % рынка принадлежит так называемой потребительской электронике, связанной с цифровым ТВ (частоты от 12 до 30–40 ГГц).

Наблюдается быстрый рост рынка гетероструктурных МИС на частоты 70–77 ГГц для автомобильных антистолкновительных радаров.

Быстро развивается и рынок СВЧ МИС для спутниковой связи на частоты до 60 ГГц.

Перспективной областью применения гетероструктурной СВЧ-электроники является беспроводная связь широкополосного доступа на частоты до 40–60 ГГц и выше (точка–точка, точка–много точек) с предоставлением услуг мультимедиа (передачи сложных изображений, видеоконференций, дистанционное обучение, высокоскоростной Интернет и т. д.).

3–4 % рынка принадлежит военной электронике — это, в основном, бортовые и наземные радиолокаторы на активных фазированных антенных решетках (АФАР) X-диапазона, т. е. на частоту около 10 ГГц, для ведения разведки, обнаружения целей, наведения и сопровождения ракет, а также для радиоэлектронной борьбы.

Жизнь показывает, что там, где требуются рабочие частоты выше 4–5 ГГц, наногетероструктурная технология быстро вытесняет кремниевую технологию и классическую арсенид-галлиевую MESFET-технологию, завоевывая все большую и большую долю СВЧ-телекоммуникационного и радиолокационного мирового рынка.

Ситуация в России

Состояние дел в промышленности. В России современной промышленной гетероструктурной технологии пока нет, ни в части массового производства наногетероструктур, ни в части производства гетеротранзисторов, ни тем более микросхем. Сквозного, унифицированного и лицензированного СВЧ САПР также нет. Коммерческий рынок в стране не сформирован, и доминирует оборонный госзаказ. Т. е. ситуация близка к тому, что было за рубежом в 1980-х годах. Текущее финансирование полностью расходуется на НИОКР, и необходимого обновления технологической базы не происходит уже в течение более 15 лет.

Тем не менее, промышленные предприятия имеют отработанную инфраструктуру и многолетний опыт по выполнению ОКР и организации производства. Имеются технологические корпуса, почти готовые, или такие, что могут быть быстро подготовлены для проведения НИОКР и развертывания производства.

Отрадно, что в последние годы ситуация начинает меняться к лучшему. В ФГУП "Исток" на выделенные Правительством инвестиции идет создание современной промышленной технологической линии по производству СВЧ микросхем с проектными нормами до 0,1 мкм и с объемом выпуска до 1 млн шт. в год. Ее введение в эксплуатацию планируется в ближайшие 2–3 года.

Отечественный рынок для гетероструктурной электроники. К настоящему времени сформировался, хотя и относительно небольшой (с потребностью около 200 тыс. приборов в год), внутренний рынок, связанный с потребностью в гетероструктурных СВЧ приборах для приемо-передающих модулей АФАР X- и К-диапазонов. Наиболее крупными их заказчиками и потребителями являются: ОАО ОКБ "Сухой", Корпорация "Фазотрон" и Концерн ПВО "Алмаз-Антей". К сожалению, коммерческий (не "оборонный") рынок для отечественной гетероструктурной электроники пока практически отсутствует.

Состояние научных и технологических исследований в РАН. В Российской Академии наук (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Институт СВЧ полупроводниковой электроники, Институт физики полупроводников СО РАН и др.), где работы не прекращались даже в самые тяжелые времена, создан достаточно мощный научный и технологический задел по всем направлениям наногетероструктурной электроники: от физики и технологии самых современных гетероструктур до исследований в области моделирования и проектирования приборов и технологии изготовления наногетероструктурных СВЧ МИС с размерами элемента до 0,2 мкм. И что особенно важно, имеются высококвалифицированные кадры ученых (известные научные школы), способные, в кооперации со специалистами промышленности, в кратчайшие сроки (3–5 лет) решить сложнейшую задачу создания в России промышленной наногетероструктурной электроники мирового уровня.

Однако для достижения этой цели, необходимо создание в стране нескольких специализированных научных и промышленных центров, оснащенных самым современным технологическим и исследовательским оборудованием: центров для разработки современной технологии гетероструктурных СВЧ МИС с размерами элементов до 20–50 нм в С.-Петербурге (на базе ФТИ им. А. Ф. Иоффе), в Москве (на базе ИСВЧПЭ РАН) и возможно в других городах.

Эти центры необходимо оснастить комплектом современного импортного технологического и исследовательского оборудования и чистыми технологическими помещениями (класс чистоты до 100). Стоимость одного полного комплекта составляет около 20–25 млн евро.

5. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Электронные и оптоэлектронные приборы на основе полупроводниковых гетероструктур являются основной элементной базой для ряда динамично развивающихся направлений современной электронной техники. К числу важнейших областей использования гетероструктурных приборов относятся:

- системы связи и телекоммуникаций различного типа (спутниковые, мобильные, волоконно-оптические);
- навигационные и радиолокационные системы;
- космические системы различного назначения, в том числе источники энергии для космических аппаратов;
- сверхбыстродействующие вычислительные устройства и системы обработки информации;
- датчики и сенсоры различного типа.

Производство полупроводниковых гетероструктурных приборов в наиболее технологически развитых странах (США, Япония, Франция, Германия, ряд восточно-азиатских государств) вышло из фазы лабораторных исследований и в настоящее время представляет собой самостоятельное направление полупроводниковой промышленности. Российской науке принадлежит ряд приоритетных результатов в области физики полупроводниковых гетероструктур. К сожалению, по известным причинам, широкого внедрения соответствующих технологий в отечественную промышленность не произошло. На сегодняшний день отставание российской промышленности от передового зарубежного уровня в области полупроводниковых гетероструктурных приборов весьма существенно. Однако по сравнению с технологией кремниевых СБИС, его преодоление потребует на порядок меньших средств.

Ниже приводится краткий обзор ряда основных направлений современной гетероструктурной электроники, а также представлены предложения по их развитию в России.

Солнечные элементы на гетероструктурах. Фотоэлектрический метод преобразования солнечной энергии является наиболее перспективным среди нетрадиционных методов получения электроэнергии. Солнечные батареи в настоящее время являются основными источниками электроэнергии на космических аппаратах и получают все большее применение на Земле. Наиболее перспективным путем увеличения эффективности солнечных батарей является использование гетероструктурных солнечных элементов из арсенида галлия и родственных ему соединений A^3B^5 . Такие солнечные элементы были впервые в мире предложены и созданы в ФТИ им. А. Ф. Иоффе в 1969 г. С тех пор в ФТИ был выполнен большой объем исследований и разработок, многие из которых имеют при-

оритетный характер. Одним из результатов этих работ явилась организация в стране производства гетероструктурных солнечных батарей, установленных на ряде космических аппаратов, в том числе на орбитальной станции "Мир".

Разработанные в последние годы каскадные солнечные элементы обеспечивают: повышенное значение КПД, достигающее в условиях космоса значения 30 %; увеличение удельного энергосъема с солнечных батарей до 300 Вт/м²; улучшение радиационной стойкости, обеспечивающее увеличение срока эксплуатации таких батарей до 10—15 лет на геосинхронной орбите; возможность работы при высокой кратности концентрирования солнечного излучения. Объем производства (в основном в США) гетероструктурных космических батарей превышает 1 тыс. м²/год. В РФ выпуск гетероструктурных батарей в настоящее время прекращен из-за отсутствия в стране современного технологического оборудования и недостаточного финансирования разработок перспективных типов солнечных батарей.

КПД "наземных" каскадных солнечных элементов, разработанных в ФТИ и в мире, достигает в настоящее время значений более 33 % при концентрированной засветке. При степени концентрирования излучения 100—1000 крат площадь солнечных элементов, необходимая для выработки эквивалентной электрической мощности, пропорционально уменьшается. Это обеспечивает существенное снижение стоимости электроэнергии, вырабатываемой солнечными батареями с концентраторами. В ФТИ разработаны высокоэффективные концентраторы — линзы Френеля, выполненные из композиции силикон—стекло, обладающие высокой устойчивостью к воздействию ультрафиолетового облучения и хорошими термическими и механическими свойствами. На основе разработанных каскадных фотопреобразователей и линз Френеля в ФТИ созданы высокоэффективные концентраторные модули наземного и космического базирования и энергоустановки. В дальнейшем ожидается увеличение КПД гетероструктурных фотопреобразователей до 40 % при 100—1000-кратном концентрировании солнечного излучения.

Организация в России производства гетероструктурных солнечных элементов и батарей позволит существенно увеличить энерговооруженность отечественных космических аппаратов, что будет способствовать укреплению обороноспособности страны, а также даст значительный технико-экономический эффект, так как обеспечит автономное энергообеспечение наземных изделий специальной техники и других энергопотребителей, лишенных централизованного энергоснабжения. При этом потребности в наземных солнечных энергоустановках практически не ограничены.

К числу основных потребителей солнечных элементов относятся Российское авиационно-космическое агентство, Космические войска и РВСН МО РФ и Минэнерго РФ.

Сверхъяркие светодиоды. Полупроводниковые светоизлучающие диоды (СИД) являются исторически первыми гетероструктурными приборами, получившими широкое практическое использование. В последние годы появилось новое направление, связанное с созданием так называемых сверхъярких СИД видимого диапазона.

Основные области применения приборов на основе сверхъярких светодиодов включают:

- устройства освещения и подсветки;
- автомобильную светотехнику;
- светодиодные экраны и табло;
- сигнальные устройства;
- мобильные телефоны, фото- и видеокамеры.

Быстрое внедрение твердотельных источников света в различные области промышленности объясняется их принципиальными преимуществами по сравнению с традиционными источниками. К ним относятся: длительный срок службы, экономичность, экологическая безопасность, быстрое срабатывание, широкие возможности по управлению световым потоком и цветом излучения.

Объем мирового рынка сверхъярких светодиодов в 2002 г. составил 1,8 млрд долл. США, планируемый объем в 2003 г. равен 2,5 млрд долларов. По прогнозу компании *Strategies Unlimited* (США) к 2007 г. рынок сверхъярких светодиодов достигнет 4,5 млрд долл., а в 2010 г. в США и Японии начнется повсеместная замена ламп накаливания светодиодными источниками света.

Сине-зеленые светодиоды и белые светодиоды на основе сочетания синего излучения чипа и желтого люминофора или ультрафиолетового чипа и RGB люминофора изготавливаются на основе гетероструктур нитрида галлия (AlInGaN), желто-красные — на основе гетероструктур фосфида галлия (AlInGaP) и частично арсенида галлия. Основными производителями светодиодов и приборов на их основе в мире являются японские (*Nichia Chemical, Toyoda Gosei*) и американские (*Lumiled, Cree*) компании. Быстрыми темпами растет производство светодиодов в странах Юго-Восточной Азии, прежде всего на Тайване, в Южной Корее и Китае.

Российский рынок светодиодов сегодня составляет около 100 млн светодиодов в год, и более половины из них покупаются за рубежом. Основными препятствиями развития светодиодных технологий в России являются полное отсутствие роста промышленного производства светодиодных гетероструктур и практически полное отсутствие современных технологических линеек для изготовления чипов.

В России есть несколько предприятий, осуществляющих сборку светодиодов на основе покупных кристаллов: ОАО "ОКБ "Планета" (г. Новгород), ЗАО "Протон" (г. Орел), ЗАО "Корвет-Лайтс" (г. Москва). Изготовление чипов на основе нитрида галлия начато в ЗАО "Светлана-Оптоэлектроника" (г. Санкт-Петербург). Однако изделия на основе покупных материалов заведомо неконкурентоспособны на мировом рынке в связи с высокой ценой или невозможностью приобретения высококачественных светодиодных пластин или чипов.

Вместе с тем, уровень научных разработок в области *MOCVD* роста гетероструктур на основе нитрида галлия в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН в целом сопоставим с мировым уровнем, а в некоторых направлениях опережает его. Это касается ряда "ноу-хау" в области повышения эффективности и интенсивности электролюминесценции, что является основной тенденцией развития светодиодных технологий. В частности, для применения светодиодных источников в освещении необходимо создавать белые светодиоды с высокой световой отдачей и высоким значением светового потока с одного светодиода. Поэтому ряд крупных зарубежных компаний, таких как *Samsung* и *Siemens*, проявляют повышенный интерес к выращенным в ФТИ структурам. Развитию технологий *MOCVD* роста гетероструктур GaN в ФТИ во многом способствовало приобретение в 2002 г. современного реактора AIX-2000HT производства фирмы *Aixtron* (Германия), позволяющего осуществлять эпитаксиальный рост нитрида галлия одновременно на шести двухдюймовых подложках. Однако этот реактор предназначен для проведения научных исследований и разработки ресурсосберегающих технологических процессов и на его основе невозможно наладить промышленное производство светодиодных пластин.

Полупроводниковые инжекционные лазеры. Полупроводниковые лазерные диоды относятся к числу наиболее сложных гетероструктурных приборов. В связи с этим только наиболее передовые в технологическом отношении государства (США, Япония, Германия, Франция, Ю. Корея, Тайвань) располагают полным технологическим комплексом, достаточным для производства различного типа лазерных диодов. Области применения полупроводниковых лазеров весьма разнообразны и включают оптические устройства записи, хранения и считывания данных, системы волоконно-оптической связи, системы накачки твердотельных лазеров, датчики различного типа и ряд других устройств.

Общая сумма продаж полупроводниковых лазеров составила в 2003 г. 2,8 млрд долл. Первое место в денежном выражении занимают лазерные диоды для записи и считывания информации (1,5 млрд долл.), затем телекоммуникационные лазеры (900 млн долл.)

и лазеры для систем накачки (100 млн долл.). На ближайшие три года прогнозируется рост объема продаж полупроводниковых лазеров не менее 10 % в год.

В России, несмотря на сложности финансирования, сохраняется научный паритет с развитыми странами на всех основных направлениях разработки лазерных диодов. Этот паритет выражается в достижении мировых рекордов или параметров мирового уровня для приборов, изготовленных в лабораторных условиях или в условиях мелкосерийного производства. Некоторое отставание наблюдается в области разработки приборов, излучающих в диапазоне менее 700 нм, что обусловлено практически полным отсутствием интереса к таким приборам на российском рынке и высокой конкуренцией дешевых приборов на международном рынке.

Полный цикл производства полупроводниковых лазеров в настоящее время сохранился на следующих российских предприятиях: ПО "Полус", г. Москва; "Инжест", г. Саратов; НПО "Север", г. Новосибирск.

Имеется ряд малых предприятий, располагающих технологией сборки и корпусирования кристаллов полупроводниковых лазеров ("ФТИ-Оптроник", г. С.-Петербург, ЗАО "Полупроводниковые приборы", г. С.-Петербург и др.). Общий российский рынок лазерных диодов оценивается суммой 8—12 млн долл. в год при ежегодном приросте 8—10 %, что соответствует общим мировым тенденциям.

Для организации отечественного производства полупроводниковых лазерных диодов в промышленных масштабах в первую очередь необходимы усилия по поиску внутренних и внешних потребителей, готовых в достаточных масштабах использовать эту наукоемкую продукцию.

Фотоприемные приборы и устройства. Применение нанотехнологий для интеграции на одном кристалле функций восприятия и обработки изображения вместе с использованием квантоворазмерных фоточувствительных наноструктур в ближайшее время приведет к созданию систем "искусственного" (технического) зрения с расширенным по сравнению с биологическим зрением спектральным диапазоном в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра (отметим, что биологическое зрение человека формировалось в течение миллионов лет).

Системы технического зрения и фотонные компоненты на наноструктурах, способные получать и обрабатывать огромные массивы информации, станут основой принципиально новых телекоммуникационных устройств, систем экологического и космического мониторинга, тепловидения, нанодиагностики, робототехники, высокоточного оружия, средств борьбы с терроризмом и т. д. Приме-

нение полупроводниковых наноструктур значительно уменьшит размеры устройств наблюдения и регистрации, снизит энергопотребление, улучшит стоимостные характеристики и позволит использовать преимущества массового производства в микро- и нанoeлектронике ближайшего будущего.

Работы по созданию фоточувствительных структур с предельными параметрами по чувствительности (до одного фотона), пространственному разрешению (порядка длины волны) и быстродействию на основе квантоворазмерных эффектов в полупроводниках для принципиально новых систем гражданского и военного применения ведутся в развитых странах широким фронтом. В России эти работы сосредоточены в институтах РАН (Физико-технический институт, С.-Петербург; Физический институт, Институт радиотехники и электроники, Москва; Институт физики полупроводников, Новосибирск) и на некоторых предприятиях (ФГНЦ НПО "Орион", ФГУП НИИ "Полус", ГУП НПП "Пульсар", ОАО ЦНИИ "Электрон").

В 2003 г. в Институте физики полупроводников СО РАН с помощью технологии молекулярно-лучевой эпитаксии изготовлены экспериментальные образцы матричных фотоприемных модулей форматом 320 × 256 элементов на основе многослойной эпитаксиальной структуры AlGaAs/GaAs с квантовыми ямами с максимумом спектральной чувствительности в диапазоне 7...9 мкм и температурным разрешением 40...70 мК. На основе эпитаксиальных гетероструктур Ge/Si на подложке "кремний-на-изоляторе" созданы фотодетекторы на диапазон длин волн 1,3...1,55 мкм с активной областью, включающей 36 слоев нанокластеров германия (квантовых точек). За счет эффекта многократного внутреннего отражения достигнуты значения квантовой эффективности 21 и 16 % для длин волн 1,3 и 1,55 мкм, соответственно. Фотодетекторы на квантовых точках представляют несомненный интерес для применения в качестве фотонных компонентов волоконно-оптических линий связи с повышенной пропускной способностью.

6. РАЗВИТИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ АКУСТОЭЛЕКТРОНИКИ

Акустоэлектронные устройства являются принципиально незаменимыми базовыми элементами всех перспективных систем и средств связи, навигации, радиолокации, мониторинга, робототехники. Они позволяют обеспечить обработку сложных сигналов в реальном масштабе времени при высокой чувствительности, широком динамическом диапазоне и высокой помехозащищенности. Дополнительные аргументы в пользу создания нового поколения акустоэлектронных устройств — это возможность освоения на их основе более высокочас-

тотных диапазонов, низкое энергопотребление, уникально малые размеры и масса, невысокая стоимость.

Отечественные специалисты в этой области имеют более чем 25-летний опыт. Им принадлежит одно из ведущих мест в мире и ряд приоритетов в разработке акустоэлектронных устройств. Впервые предложены в СССР и России и запатентованы в России, США, Японии, Великобритании, Франции, Германии методы взвешивания, локализации поверхностных акустических волн. Отечественные ученые и специалисты в последние 5–10 лет работают в этой области по контрактам с рядом зарубежных фирм.

Имеющиеся материально-техническая база и опыт позволяют переориентировать отечественных разработчиков на собственные исследования и в ближайшее время в рамках новых высоких акустоэлектронных технологий разработать следующие устройства:

1. Фильтры промежуточной частоты (ПЧ) с высокими характеристиками для современных систем связи и цифрового интерактивного телевидения, включая высокоизбирательные ВЧ устройства частотной селекции на поверхностных и приповерхностных волнах и волнах Гуляева—Блюштейна с предельно низким уровнем вносимого затухания.

2. Высокоизбирательные тонкопленочные СВЧ устройства частотной селекции и резонаторы для стабилизации частоты на объемных акустических волнах с диапазоном до 10 ГГц на подложках из кремния и арсенида галлия и на основе новых диэлектрических материалов с высокой акустической прозрачностью. Эти устройства важны для решения современных задач связи, навигации и радиолокации.

3. Акустоэлектронные датчики температуры, давления, газового состава, влажности, ускорений и других экологических и технологических факторов, перспективные для задач мониторинга, робототехники и контроля правильного функционирования различных механизмов.

4. Системы радиочастотной идентификации объектов для персонализированной регистрации, учета и контроля объектов различного назначения, в том числе подвижных, на основе акустоэлектронных компонентов.

5. Системы автоматизированного проектирования (САПР) и автоматизированного изготовления фотошаблонов (САИФ) акустоэлектронной компонентной базы (АЭКБ).

Указанные материально-техническая база и опыт позволяют также развить:

- методы выращивания высококачественных ориентированных и монокристаллических пленок пьезоэлектриков, диэлектриков и полупро-

водников, а также методы контроля их параметров, как основы создания перспективной акустоэлектронной элементной базы;

- усовершенствованные методы выращивания и обработки новых пьезоэлектрических кристаллов для акустоэлектроники и акустооптики.

Разработка приведенных выше устройств ведется по соответствующим пяти акустоэлектронным технологиям.

Технология 1 предусматривает разработку и организацию крупносерийного производства патентночистых фильтров ПЧ нового поколения с характеристиками, превосходящими зарубежный уровень по избирательности и неравномерности ГВЗ для цифровых телевизионных приемников производства России, Белоруссии и других стран. Позитивные изменения в мире в последние годы в области телевизионного цифрового интерактивного вещания, выразившиеся как в улучшении качества передаваемого изображения, так и в увеличении числа телевизионных каналов и предоставляемых услуг, повысили актуальность использования новых акустоэлектронных технологий.

Разрабатываемые устройства частотной селекции и стабилизации частоты (технологии 1, 2) и акустоэлектронные устройства нового поколения являются основными элементами обработки информации в реальном масштабе времени. Они важны для всех перспективных систем связи, измерительной и навигационной аппаратуры нового поколения: подвижных, спутниковых, тропосферных и радиорелейных линий связи, цифрового интерактивного телевидения, радиоизмерительной аппаратуры, РЛС, спутниковых навигационных систем. Эти технологии позволяют обеспечить российских производителей акустоэлектронной компонентной базой с предельно достижимыми характеристиками, соответствующими мировому уровню.

Технология 3 предусматривает разработку акустоэлектронных ВЧ и СВЧ датчиков для контроля физических параметров окружающей среды, технологических процессов, правильного функционирования различных механизмов. Акустоэлектронные датчики способны функционировать в недоступных для обычных методов контроля условиях (высокие температуры, давления, агрессивные среды и т. п.) и обеспечивать дистанционное считывание информации. Эта технология перспективна для решения задач экологии при разнообразных применениях в промышленности, для робототехники. Функционирующие в реальном масштабе времени устройства обеспечат работоспособность и повысят безопасность сложных технических систем.

Технология 4 предусматривает разработку комплекса радиочастотной идентификации для персонализированной регистрации, учета и контроля

различных объектов. Она, в частности, будет использована в следующих областях:

- в системах управления доступом для транспортных средств и людей;
- для учета и регистрации автомобильных, железнодорожных и морских контейнеров;
- для регистрации и оплаты проезда на автострадах и автостоянках;
- для электронного номера (паспорта) транспортного средства, контейнера и т. п.;
- для электронной пломбы; для маркировки важных грузов, багажа;
- при автоматизации технологических процессов.

Методы выращивания пленок и тонкопленочных структур предусматривают разработку базовых технологий изготовления акустоэлектронных устройств на основе новых материалов для более широкого диапазона частот. Технология САПР направлена на обеспечение сквозного проектирования акустоэлектронных устройств и аппаратуры на их основе.

Предлагаемые высокие акустоэлектронные технологии (1—5) позволят эффективно использовать имеющийся в России научно-технический задел, признанный во всем мире акустоэлектронную школу и при наличии финансирования создать самые передовые технологии, разработать широкую гамму акустоэлектронных устройств и организовать их серийное производство.

Выводы и предложения

Электроника — это не только одна из наиболее наукоемких отраслей экономики, но и локомотив современного развития всей экономики. Важная ее особенность — чрезвычайно короткие сроки цикла "исследование—разработка—производство". Это связано с очень высоким темпом смены поколений продукции и производственного оборудования, что выливается в чрезвычайно высокую стоимость как разработок, так и оборудования. Вместе с тем, при массовом производстве электроника характеризуется очень высокой рентабельностью (около 40 %).

Развитие электроники, как крупнейшей и высокочрезвычайно затратной области экономики, во всех странах идет одним путем — постоянным уменьшением размеров рабочих элементов. Нынешний уровень — это 0,13—0,10 мкм. Отсутствие такой технологии в России обрекает страну на катастрофическое отставание в стратегически важных высокотехнологических областях промышленности.

Главный вывод в решении проблемы ускоренного развития электроники в России состоит в необходимости приобретения производства высокого уровня, которое позволит в ближайшее время изготавливать современные приборы с размерами

элементов 0,13...0,10 мкм с применением литографии на длине волны $\lambda = 193$ нм с дальнейшим переходом к размеру 0,07...0,06 мкм (70...60 нм).

Основным направлением, которое будет определять развитие наноэлектроники с 2010 года, является литография экстремального ультрафиолета (EUV) на длине волны $\lambda = 13,5$ нм. Это направление развивается в США, Европе и Японии. В научной части зарубежных проектов задействована значительная группа российских институтов и отдельных ученых (см. раздел 3 настоящей статьи). После приобретения Россией полупроводникового производства с топологической нормой 0,13...0,10 мкм будет возможен переход на основе отечественных разработок на литографию с $\lambda = 13,5$ нм. Это позволит России вернуться на общий путь развития и принять полноценное участие в международном разделении труда в мировой микро- и наноэлектронике.

Для ускоренного развития электроники в России необходимо:

1. Признать развитие такой наукоемкой области промышленности, как электроника, одним из основных приоритетов национальной политики, требующим государственной поддержки.

2. Осуществить приобретение и строительство зарубежными партнерами на территории России микроэлектронных предприятий с самой передовой на сегодняшний день технологией с предоставлением инвесторам гарантий государства.

3. Обеспечить при организации микроэлектронного производства создание технопарков на базе имеющегося научно-технического, кадрового и образовательного потенциала, как хорошо работающего в мировой практике механизма прогресса в области высоких технологий.

4. Для экономического стимулирования инвестиций в развитие передовых разработок на основе планируемого микроэлектронного производства предоставить налоговые и таможенные льготы предприятиям и инвесторам и оказать поддержку малым высокотехнологическим компаниям.

Это приведет к более эффективному использованию уже вложенных Россией средств в организацию современных производств вычислительной и телекоммуникационной техники (см. раздел 2), в настоящее время полностью зависимых от поставок импортных комплектующих, прежде всего интегральных схем.

Реализация высказанных предложений по ускоренному развитию полупроводниковой электроники в России приведет не только к восстановлению научно-технического паритета с развитыми странами, но и даст возможность для более активной работы российских компаний на внутреннем рынке России (развитие информационных и телеком-

муникационных технологий для финансовой и банковской систем, образования, для введения системы электронных паспортов, для создания современных средств диагностики в здравоохранении и др.). Наличие отечественной элементной базы полупроводниковой электроники несомненно будет способствовать решению стратегически важных проблем силовых ведомств, в том числе при разработке нового поколения высокоточного оружия, оборудовании государственной границы, в борьбе с терроризмом, развитию энергетики и ре-

шению проблем энергосбережения в промышленности, на транспорте и в жилищно-коммунальном хозяйстве страны.

Список литературы

1. Мокеров В. Г. Гетероструктурная СВЧ электроника — новые перспективы нанoeлектроники // Микросистемная техника. 2004. № 10. С. 13—15.
2. Гапонов С. В. Экстремальная ультрафиолетовая литография — будущее нанoeлектроники // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 2. С. 2—4.

Г. К. Боресков,
ЦЭМИ (г. Москва)

СТРАТЕГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАУЧНОЙ ОТРАСЛЮ. ПУТЬ К ВОЗРОЖДЕНИЮ*

Рассматриваются общие принципы построения сбалансированной системы показателей и их модификация для оценки Российской научной организации и возможности использования ее для стратегического планирования и управления научной отраслью в целом.

Последнее время при определении стратегии развития Российской науки все больший упор делается на то, чтобы перевести ее на коммерческие рельсы. Примером тому является одобренная на Коллегии Министерства по образованию и науке 26 августа 2004 года "Концепция участия Российской Федерации в управлении государственными организациями, осуществляющими деятельность в сфере науки". Разработчики концепции активно используют тезис о низкой **бюджетной эффективности** научных организаций, не принимая во внимание различия между коммерческими и некоммерческими организациями, а также между научными организациями, "добывающими" знание, и научными организациями, имеющими возможность реализовать научный продукт в возможном для потребления виде.

* 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 наукоемким технологиям и Комитетом по энергетике, транспорту и связи на тему "Нанотехнологии — проблемы развития и подготовки кадров" в Государственной Думе 26 мая 2004 г. под председательством лауреата Нобелевской премии академика Ж. И. Алферова. Стенограмма подготовлена и представлена В. И. Бабкиным.

Применение подобных показателей к оценке научных организаций, деятельность которых направлена в первую очередь на создание информационных и технологических ресурсов для будущего развития страны, на обеспечение ее информационной и технологической безопасности, а не на получение непосредственной прибыли, выглядит абсолютно некорректным.

Здесь также видна тенденция к побуждению государства отказаться от какого-либо управления научной отраслью. Научные организации, созданные для обеспечения решения стратегических задач масштаба страны, предполагается преобразовать в акционерные общества, занятые поиском источников дохода. (Это даже не использование микроскопа для забивания гвоздей. Микроскопу предлагают заработать немного денег, а потом заплатить с них налоги.)

Если бы в сороковых годах советское правительство руководствовалось подобными принципами, основной целью ядерной программы была бы продажа атомной бомбы тому, кто заплатит больше, причем если бы покупателя не нашлось, Курчатову было бы предложено заняться разработкой тефлоновых сковородок.

Можно предположить, что для экономистов, составлявших концепцию, характерно мышление исключительно в рамках финансовых показателей, встречающихся в учебниках по макро- и микроэкономике для первого курса, однако в последнее время среди коммерческих организаций намечается обратная тенденция. Дело в том, что традиционно отслеживавшиеся финансовые метрики имеют исключительно ретроспективный характер, отражают только результат деятельности за некоторый период. Поэтому, когда речь идет о долгосрочном, стратегическом планировании и, более того, о стратегическом управлении, вместо них на первый план выходят так называемые **"опережающие индикаторы"**, имеющие **не денежный характер**.

Для коммерческой компании примерами таких индикаторов могут быть доля рынка, индекс лояльности клиентов, или индекс удовлетворенности, текучесть кадров, стоимость обучения сотрудника, стоимость административных ошибок, оборачиваемость складских запасов, время подготовки производства. Управление ими позволяет значительно более эффективно привести компанию к достижению стратегических целей. В большинстве крупных корпораций используются **системы стратегического планирования и управления**, построенные на основе подобных опережающих индикаторов, причем было бы довольно странно сомневаться в их эффективности.

Возможно, было бы эффективнее не разрушать уникальный инструмент, находящийся в распоряжении государства, а применить его для решения стоящих перед ним задач.

Разумеется, для того чтобы применение такого сложного института, как Российская научная отрасль, было эффективным, ею следует эффективно управлять. Пускать ее в свободное плавание, возможно, и соответствует экономическим воззрениям либеральных мыслителей, но несколько противоречит вошедшим в учебники законам экономики общественного сектора.

Более перспективным видится применение для управления Российской наукой одной из успешно зарекомендовавших себя систем стратегического планирования и управления, построенных на основе опережающих индикаторов.

Среди подобных систем, таких как пирамида результативности Линча и Кросса и модель "стейкхолдер", наиболее гибкой и распространенной является *сбалансированная система показателей* (далее ССП), сформулированная Дэвидом Нортоном и Робертом Капланом в первой половине 90-х годов. Эта система успешно применялась множеством ведущих мировых компаний, а принципы, заложенные в нее, позволили внедрить ее и во многих некоммерческих организациях.

Ниже описываются некоторые особенности этой системы, позволяющие при небольших модификациях использовать ее для стратегического управления Российской наукой, а также для сохранения и развития научного потенциала России.

Рассмотрим общие принципы построения ССП, затем перейдем к модификациям, позволяющим применить ее для Российской научной организации и использовать для стратегического планирования и управления научной отраслью в целом.

Фигурирующий в названии термин "сбалансированность" подразумевает сбалансированность показателей по осям:

- стоимостные—натуральные;
- внутренние—внешние;
- материальные—нематериальные активы;

- оперативные—стратегические;
- сбалансированность по структуре затрат;
- сбалансированность по уровням организации.

Причем имеется в виду не общее равновесие, столь любимое экономистами-теоретиками, а равная степень учета влияния описываемых ими факторов.

Процесс построения ССП для организации начинается с определения ее **стратегии**, т. е. формального описания главных желаемых результатов, которых требуется достичь в течение периода планирования.

Затем формируются **стратегические цели** — четко и ясно сформулированные положения, достижение которых обеспечит успешную реализацию определенной стратегии.

Формирование стратегических целей начинается с верхних (основных) целей, соответствующих миссии организации. Для коммерческих организаций — это, как правило, финансовые цели. Достижение этих стратегических целей требует достижения целей более низкого уровня. Причинно-следственными связями стратегические цели объединяются в некоторую квазидревесную структуру.

Визуализация стратегии с помощью подобной структуры — одно из главных требований концепции ССП. Графическое представление схемы стратегии должно быть достаточным для ее понимания.

На рис. 1 представлена схема стратегии коммерческой компании.

Для более четкого структурирования стратегии стратегические цели располагаются в полях нескольких так называемых **перспектив**. Для коммерческих организаций традиционно используются четыре перспективы:

- финансовая;
- взаимоотношений с клиентами;
- внутренних бизнес-процессов;
- обучения и развития персонала.

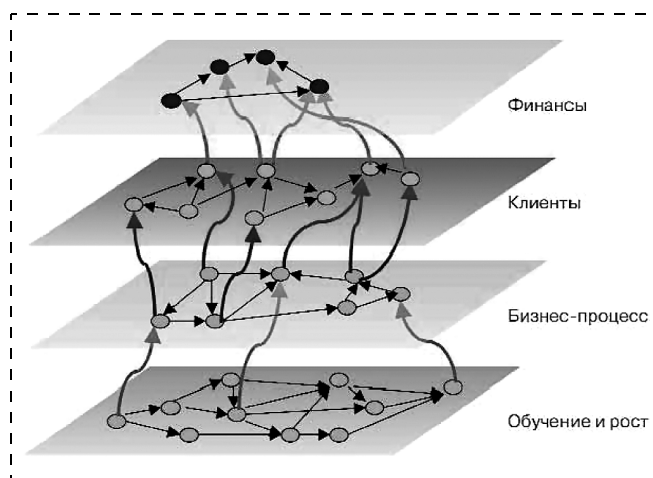


Рис. 1

На перспективах, которые можно использовать для стратегического управления научными организациями, мы остановимся ниже.

Как правило, каждая из четырех перспектив содержит от 3 до 6 стратегических целей.

Далее, каждой стратегической цели сопоставляются показатели, которыми можно измерить степень ее достижения. Показатель имеет численный вид и обязательно должен включать размерность измеряемого параметра (штуки, тонны, проценты и т. п.).

Затем устанавливаются **целевые значения** показателей, т. е. значения, при достижении которых соответствующая цель считается достигнутой.

Поскольку контроль выполнения стратегических планов следует проводить в течение всего периода планирования, а не только в его конце, устанавливаются так называемые **вехи**, т. е. сроки или события, когда следует проверить соответствие показателя некоторым промежуточным целевым значениям.

После этого стратегическим целям приписываются **стратегические инициативы**, т. е. программы действий, направленных на достижение стратегических целей, или, по крайней мере, максимального приближения к ним. Инициативами могут быть проекты, отдельные действия или повседне-

ная деятельность сотрудников организации. Они более определены, чем стратегические цели, имеют установленные временные границы, бюджет и ответственных исполнителей. Важно, чтобы инициативы были стратегическими по своей сути, а не "выполняемыми как обычно" проектами.

Все вышеперечисленное образует "**стратегическую карту**" компании, или "**счетную карту**".

Пример такой карты для коммерческой организации приведен на рис. 2.

После построения стратегической карты для всего предприятия строятся стратегические карты для подразделений верхнего уровня, затем процесс повторяется для подчиненных подразделений, пока вся организация не будет вовлечена в систему стратегического управления.

Разумеется, эта структура не может существовать только на бумаге. Крайне важным этапом является внедрение информационной системы, позволяющей осуществлять стратегическое управление в рамках ССП. Для этого необходимо наличие единого информационного пространства организации и соответствующей подготовки ее сотрудников. Здесь следует отметить, что практически все российские научные организации уже связаны единым информационным пространством, степень их вооруженности информационными техно-

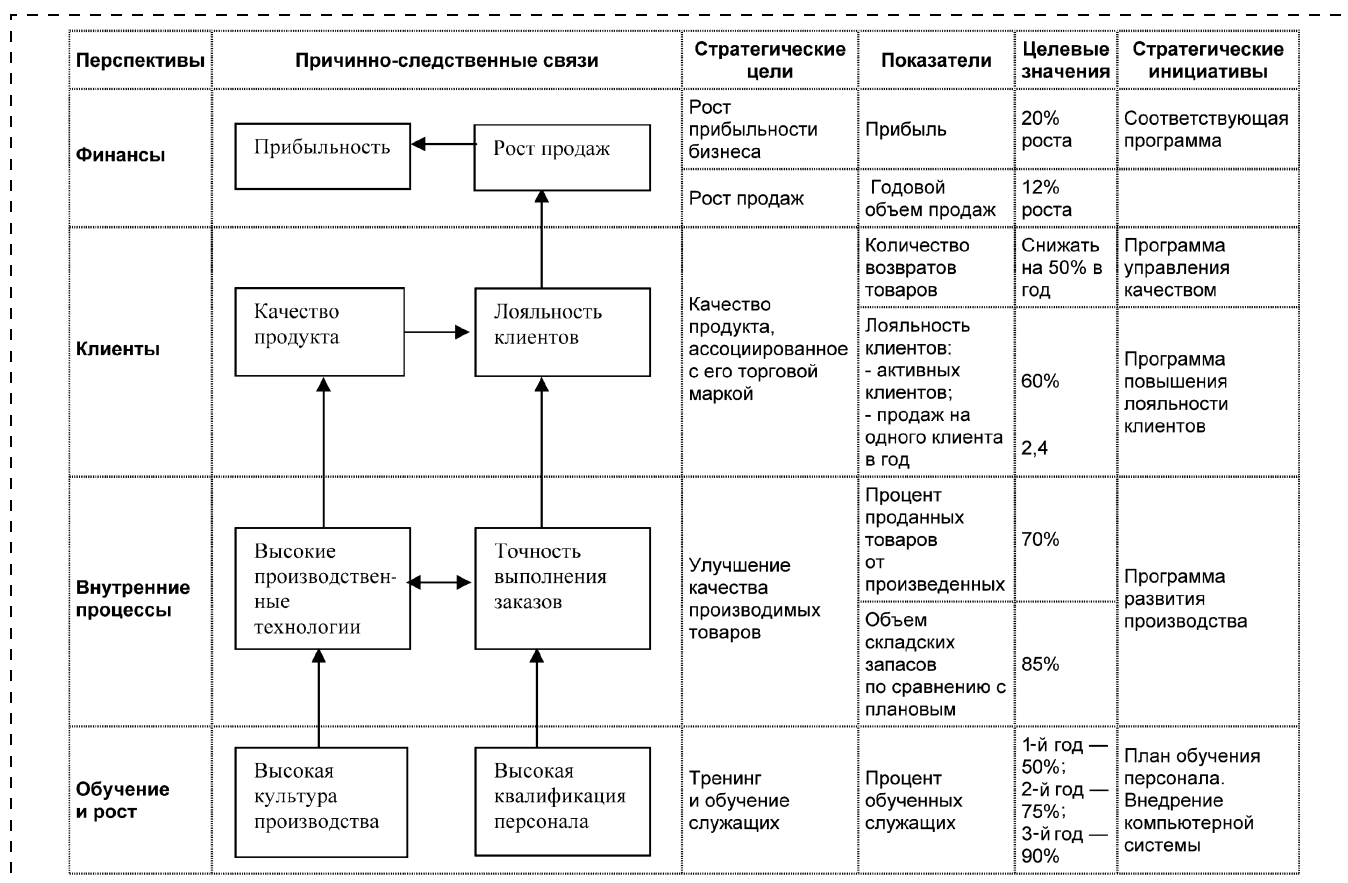


Рис. 2

логиями достаточно высока, а подготовка сотрудников в этой области во многом превышает подготовку сотрудников крупнейших международных корпораций.

Можно выделить следующие этапы внедрения ССП:

- определение стратегических целей и показателей, отражающих важнейшие факторы успеха;
- выявление причинной связи (выбрать показатели, соответствующие цепочке причинно-следственных отношений, чтобы наметить конкретную логику создания ценности);
- разработка иерархии стратегических карт (после разработки карты показателей для всей организации подготовить дополнительные карты для каждого подразделения);
- установление связи с оплатой (увязать вознаграждение работников за успехи с ССП);
- подготовка инфраструктуры информационных технологий (привести сбор данных и отчетность в соответствие с логикой ССП; конфигурировать и управлять системными компонентами, нужными для создания интегрированной системы);
- получение и использование обратной связи (проводить периодические совещания для оценки обратной связи и поддержки непрерывного улучшения).

Настало время перейти к вопросу применимости ССП для Российских научных организаций.

В отличие от коммерческих организаций, для научных финансовые результаты не стоят на первом месте.

Стратегические цели верхнего уровня должны быть сопоставлены с выполнением исследовательских проектов государственного уровня, причем проекты эти должны включать в себя все этапы от исследования до внедрения разработок. Сюда же можно отнести цели, касающиеся непосредственного создания интеллектуальной собственности. В качестве показателей могут быть использованы как число и объем выполненных проектов, так и индексы, описывающие регистрацию и использование патентов.

На более нижнем уровне находится перспектива, содержащая стратегические цели, относящиеся к поддержанию мирового престижа Российской науки; показателями могут быть разного рода индексы цитируемости.

В значительно большей степени, чем в коммерческих организациях, важна перспектива обучения и развития человеческого капитала. Здесь могут быть использованы такие показатели, как коэффициент преемственности, жизненный уровень сотрудников НИОКР, доля сотрудников, обладающих научными степенями, число печатных работ,

число молодых специалистов, доля их работ среди опубликованных.

Финансовая перспектива должна быть посвящена целевому использованию средств, отпущенных на эти программы, но никоим образом не на извлечение дополнительной прибыли. Прибыль должна приходиться от результатов использования внедренных разработок. Причем в некоторых ситуациях, например, касающихся оборонных технологий, прибыль далеко не всегда связана с государственными интересами.

Можно выделить следующие предпосылки применения ССП для стратегического планирования и управления Российской наукой:

- преимущественно некоммерческая направленность деятельности;
- невозможность измерения результатов фундаментальных исследовательских проектов финансовыми показателями;
- необходимость учета при стратегическом планировании поставленных правительством России приоритетных проектов и задач;
- высокая степень централизованности отрасли, позволяющая начать процесс внедрения системы стратегического планирования и управления сверху;
- высокая квалификация работников, позволяющая реализовать принцип вовлеченности всех сотрудников в процесс стратегического управления;
- высокая степень оснащенности информационными технологиями и наличие единого информационного пространства;
- наличие потенциала, достаточного для разработки и внедрения программной части ССП в кратчайшие сроки.

В соответствии с изложенным можно сделать следующие выводы:

- необходим всесторонний анализ "Концепции участия Российской Федерации в управлении государственными организациями, осуществляющими деятельность в сфере науки" для выявления негативных последствий ее реализации;
- необходимо принять правительственную программу создания системы стратегического управления Российской научной отраслью под эгидой РАН и соответствующих федеральных агентств;
- следует создать экспертный совет по подготовке этой программы.

Список литературы

1. Kaplan R. S. and Norton D. P. The Balanced Scorecard: Translating Strategy into Action. Harvard Business School Press. 1996.
2. Kaplan R. S. and Norton D. P. The Strategy-Focused Organization. Harvard Business School Press. 2001.
3. Каплан Р., Нортон Д. Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию / ЗАО "Олимп-Бизнес". 2003.

УДК 531.783.3

А. С. Батулин, канд. физ.-мат. наук,
А. А. Чуприк,
Е. П. Шешин, д-р физ.-мат. наук,
Московский физико-технический институт (ГУ)

МИКРОСКОПИЯ ЛАТЕРАЛЬНЫХ СИЛ: КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ ПОДХОД

Атомно-силовой микроскоп позволяет изучать фрикционные свойства поверхностей, однако получаемые в результате карты распределения латеральных сил по поверхности носят качественный характер. В данной работе представлена экспериментальная методика калибровки, позволяющая количественно интерпретировать результаты микроскопии латеральных сил. Для выполнения калибровки необходимо знание конструкции оптической системы регистрации микроскопа и параметров кантилевера, причем подготовительные расчеты для каждой модели микроскопа необходимо выполнить только один раз.

Введение

С развитием атомно-силовой микроскопии стало возможным изучение сил, действующих на молекулярном уровне, и как следствие, различных (упругих, магнитных и др.) свойств материалов. Одним из направлений применения атомно-силовой микроскопии является нанотрибология — раздел физики, изучающий природу трения на атомарном уровне [1, 2]. При рассмотрении в микроскопическом масштабе площадь соприкосновения двух тел оказывается состоящей из большого числа элементарных контактных площадок чрезвычайно малой площади. Проведенные в последние годы исследования указывают на существенное отличие физики трения в таких элементарных контактах от привычных представлений макротрибологии [2].

Зондовый микроскоп является инструментом весьма подходящим для целей нанотрибологии [3]. Область соприкосновения кантилевера с образцом — хороший экспериментальный пример элементарного контакта, доступного для изучения. Методика измерения силы трения известна — образец сканируется в контактом режиме в направлении, перпендикулярном оси балки кантилевера. Сила трения, которая в данном случае является латеральной (боковой), закручивает балку кантилевера (рис. 1). Существуют много способов регистрации отклонения кантилевера: с помощью емкостного [4, 5] и пьезорезистивного [6, 7] датчиков переме-

жений, а также с помощью широко используемых в АСМ интерференционных оптических устройств [8, 9]. Однако наибольшее распространение получил оптический метод, который реализован, в частности, и в АСМ Solver P47 производства фирмы NT-MDT [10]. Здесь для регистрации отклонений служит лазерный луч, который направляется на верхнюю зеркальную поверхность кантилевера, а отразившись, попадает на четырехсекционный фотоприемник, который генерирует сигнал, пропорциональный смещению светового пятна в двух взаимно перпендикулярных направлениях (см., например, [11]). При этом вертикальному изгибу балки кантилевера соответствует сигнал DFL, а деформации кручения, при которой происходит боковой наклон зеркальной площадки над зондом, — сигнал LAT. Данные сигналы измеряются в наноамперах.

Для количественной интерпретации этих результатов необходима калибровка — способ перевода токовых единиц в абсолютное отклонение кантилевера и затем в силу, действующую на зонд. Сигнал DFL может быть легко поставлен в соответствие вызывающей его вертикальной силе. Для того чтобы провести такую калибровку достаточно снять график кривой подвода — зависимость деформации кантилевера от расстояния, на которое его основание подведено к образцу. Наклон линейного участка кривой позволяет пересчитывать показания сигнала DFL непосредственно в отклонение зонда и затем, используя закон Гука, в силу взаимодействия с образцом. Подробное описание процедуры калибровки сигнала вертикального отклонения можно найти в обзоре [12], в котором также приведена классификация основных видов сил, действующих между зондом и образцом.

В отличие от методик АСМ, основанных на измерении сигнала DFL, для метода латеральных сил

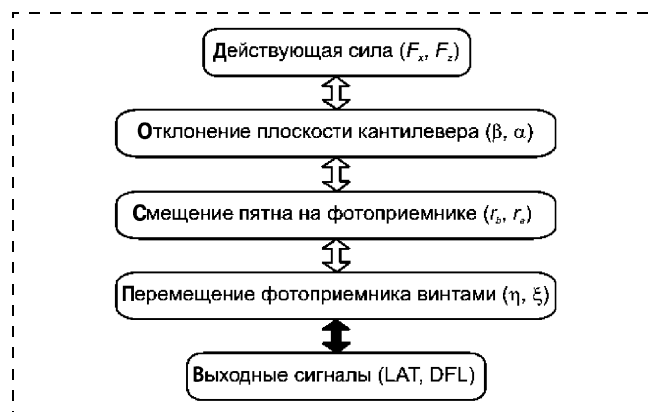


Рис. 1. Алгоритм калибровки

не существует простого и очевидного способа калибровки — получения соответствия сигнала LAT, измеряемого в единицах тока (наноамперах), силе, действующей на зонд и выражаемой в наноньютонах. Тем не менее, без точной и удобной процедуры получения такого коэффициента пересчета исследования латеральных сил носят лишь качественный характер.

В работе [13] был предложен метод калибровки сил трения в АСМ. Авторы калибровали латеральные силы с помощью датчика, позволяющего пересчитывать выходной сигнал в вольтах в силу в наноньютонах. Непосредственно силу трения находили сканированием образца с плоскими участками известного наклона в двух направлениях. Несмотря на достаточную точность, данная калибровка имеет ряд недостатков. Во-первых, делаются идеализирующие предположения об оптической системе регистрации отклонений зонда — считается, что пятно, образуемое лазерным лучом на зеркальной поверхности кантилевера и на фотоприемнике, имеет круглое сечение с гауссовским распределением интенсивности. Приведенное на рис. 2, б изображение поперечника луча дает понять, что такое приближение весьма грубо. Искажения формы возникают вследствие дифракционных и других эффектов. Во-вторых, методика основана на использовании довольно специфического образца — SrTiO_3 — и требует дополнительного калибровочного сканирования всякий раз при смене кантилевера. В-третьих, для калибровки латеральных сил использовался отдельный прибор — силовой датчик. Целью данной работы стали разработка и экспериментальная проверка нового способа калибровки, лишенного упомянутых ограничений.

Количественная калибровка оптической системы регистрации

Основной областью применения предложенной методики калибровки является микроскопия латеральных сил, однако сам способ одинаково применим для количественной интерпретации как сигнала LAT, так и сигнала DFL. В дальнейших рассуждениях мы будем придерживаться общей схемы и сформулируем методику калибровки и латеральных, и вертикальных сил. Это позволит косвенно оценить

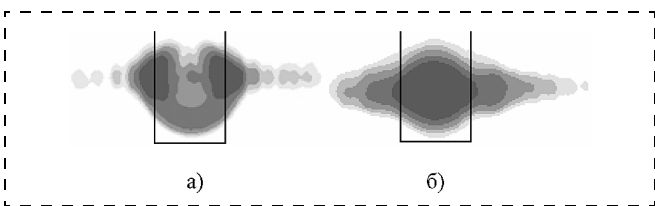


Рис. 2. Пятно луча, прошедшего за кантилевер (а) и отраженного от кантилевера (б). Прямоугольник схематично отражает положение кантилевера

точность предложенного метода, сравнив нашу калибровку сигнала DFL с результатами традиционной калибровки через измерение кривых подвода.

Количественная калибровка состоит из четырех этапов (см. рис. 1). Первые три из них представляют собой вспомогательные теоретические расчеты и могут быть выполнены только один раз, так как сводятся к аппаратным константам. Четвертый этап является непосредственно калибровкой, которую необходимо выполнять всякий раз при изменении юстировки оптической системы регистрации, в частности, при замене кантилевера.

Для микроскопии латеральных сил обычно применяют кантилеверы, имеющие форму прямоугольного параллелепипеда, поэтому далее мы будем рассматривать именно их. При сканировании в направлении, перпендикулярном оси кантилевера, на острие зонда действуют две силы: латеральная сила F_x , которая перпендикулярна оси кантилевера и приводит к его закручиванию на угол β вокруг собственной оси, и сила реакции опоры F_N , которая приводит к изгибу кантилевера на угол α . Зонд обычно перпендикулярен балке, которая, в свою очередь, наклонена под углом φ к поверхности образца, поэтому сила F_N может быть разложена на две составляющие: $F_z = F_N \cos \varphi$, перпендикулярную плоскости кантилевера, и $F_y = F_N \sin \varphi$, направленную вдоль оси балки. Суммарное воздействие этих сил эквивалентно изгибающей силе $F_z^* = F_N (\cos \varphi + (l_{\text{tip}}/l) \sin \varphi)$, где l_{tip} — высота зонда; l — длина балки. Обычно $l_{\text{tip}}/l \approx 0,01 \dots 0,1$ и угол $\varphi \approx 20 \dots 30^\circ$, поэтому $F_z^* = F_N \cos \varphi$. В наиболее общем виде взаимосвязь сил, действующих на зонд, и углов отклонения балки можно записать через угловой тензор жесткости **B**:

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_z \end{pmatrix} = \mathbf{B} \begin{pmatrix} \beta \\ \alpha \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Если не принимать во внимание отклонения геометрии кантилевера от идеальной, то данный тензор содержит лишь две недиагональные компоненты. В первой строчке стоит торсионная жесткость [3], во второй — жесткость изгиба балки в вертикальном направлении, приведенные к углу [3]. Найти соответствующие коэффициенты можно с помощью теории упругости при известных параметрах кантилевера:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{2kl^2}{3(1+\nu)l_{\text{tip}}} \\ \frac{2kl}{3\cos\varphi} & 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где k — коэффициент нормальной жесткости; ν — коэффициент Пуассона материала кантилевера. Поскольку паспортные значения геометрических параметров и жесткости кантилевера имеют большой разброс, их следует уточнить. Для этого можно использовать один из известных методов [14–17]. Точность определения истинной длины кантилевера, его нормальной жесткости и длины зонда во многом определяют точность излагаемой методики. Для того чтобы точно знать высоту зонда, приходится использовать кантилеверы, к которым производители прилагают индивидуальные паспорта.

На втором этапе (см. рис. 1) необходимо пере- считать углы наклона зеркальной площадки кантилевера в смещения отраженного луча в плоскости фотоприемника r_b и r_a :

$$\begin{pmatrix} \beta \\ \alpha \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} r_b \\ r_a \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где оси a и b в плоскости фотоприемника обычно выбираются взаимно перпендикулярными так, чтобы изменение угла α приводило только к смещению вдоль оси a , а угла β — вдоль оси b .

Компоненты тензора $\mathbf{M}$ зависят от геометрии оптической системы регистрации. Зная конструкцию микроскопа, можно найти соответствующие постоянные коэффициенты и в дальнейшем пользоваться ими при калибровке. Например, для ранней модели микроскопа Solver P47 плоскость фотоприемника перпендикулярна падающему лучу, что дает

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2L} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где L — оптическое плечо — расстояние от кантилевера до фотоприемника, в рассматриваемом случае $L = 20$ мкм.

Пересчет смещений пятна на фотоприемнике в выходные сигналы DFL и LAT не может быть осуществлен непосредственно. Соответствующие коэффициенты пропорциональности зависят не только от чувствительности детектора и схемы усиления сигнала, но и от распределения световой интенсивности в поперечнике луча. Если первые два фактора являются постоянными, то последний зависит от юстировки оптической системы регистрации и выбранного типа кантилевера.

Форма пятна и распределение интенсивности носят сложный характер. Даже при хорошей юстировке добиться идеального гауссовского пятна принципиально невозможно из-за дифракционных эффектов (см. рис. 2). Поэтому использование приближения гауссовского пятна круглой формы

для калибровки, как это делалось в работе [13], является неприемлемым.

Таким образом, зависимость выходных сигналов DFL и LAT от смещения пятна по фотоприемнику r_a и r_b теоретически рассчитать не удастся. Для того чтобы методика не зависела от особенностей лазерного луча, в схему калибровки был добавлен дополнительный третий шаг.

Сделаем так, чтобы смещался не луч (как это происходит вследствие отклонения кантилевера), а фотоприемник. Пусть кантилевер находится в покое, и отражающийся от него луч занимает фиксированное положение в пространстве. В то же время с помощью микрометрических винтов, служащих для перемещения фотоприемника при юстировке прибора, мы будем передвигать светочувствительные элементы на известное расстояние (η , ξ). При этом возникнет относительное смещение светового пятна (r_b , r_a) в подвижной теперь системе координат фотодетектора (b , a), причем

$$\begin{pmatrix} r_b \\ r_a \end{pmatrix} = \mathbf{N} \begin{pmatrix} \eta \\ \xi \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Оси a и b делят фотоприемник на светочувствительные квадранты.

Компоненты тензора $\mathbf{N}$ зависят от взаимной пространственной ориентации луча, осей фотоприемника и направления юстировочных винтов. Для того чтобы найти соответствующие коэффициенты, требуется решить громоздкую стереометрическую задачу. Тем не менее, тензор $\mathbf{N}$ зависит только от конструкции микроскопа, является аппаратной константой, и его достаточно вычислить лишь единожды, чтобы впоследствии использовать при калибровке. Опуская геометрические расчеты, приведем результаты для компонент тензора $\mathbf{N}$ двух моделей микроскопа Solver P47 — ранней и поздней:

$$\mathbf{N}_{\text{early}} = \begin{pmatrix} 0,94 & 0 \\ 0,12 & 1,00 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{N}_{\text{late}} = \begin{pmatrix} 1,21 & 0 \\ 0,05 & 0,94 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Четвертый шаг нашей схемы (см. рис. 1) — непосредственно калибровка. Будем вращать юстировочные винты и одновременно фиксировать показания сигналов DFL и LAT. Понятно, что в общем случае существует некоторая функциональная зависимость, которую запишем в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} \text{LAT} \\ \text{DFL} \end{pmatrix} = f \left[\begin{pmatrix} \eta \\ \xi \end{pmatrix} \right]. \quad (7)$$

Экспериментальное получение полной матричной зависимости (7) при различных сочетаниях

(η , ξ) слишком трудоемко, да и не нужно. При малых смещениях η и ξ зависимость линейна:

$$\begin{pmatrix} \text{LAT} \\ \text{DFL} \end{pmatrix} = \mathbf{K} \begin{pmatrix} \eta \\ \xi \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Без потери общности предполагаем, что оптическая система изначально отъюстирована таким образом, что при отсутствии воздействия сил на зонд сигналы DFL и LAT равны нулю. Для того чтобы найти соответствующие коэффициенты пропорциональности, достаточно измерить зависимость (8) в четырех "сечениях" функции f , вращая только один из винтов, и найти наклон графиков вблизи нуля (рис. 3, область 1).

При вращении только винта ξ

$$\begin{aligned} \text{DFL}(\xi)|_{\eta=0} &= K_{\text{DFL}, \xi} \xi; \\ \text{LAT}(\xi)|_{\eta=0} &= K_{\text{LAT}, \xi} \xi. \end{aligned} \quad (9.1)$$

При вращении только винта η

$$\begin{aligned} \text{DFL}(\eta)|_{\xi=0} &= K_{\text{DFL}, \eta} \eta; \\ \text{LAT}(\eta)|_{\xi=0} &= K_{\text{LAT}, \eta} \eta. \end{aligned} \quad (9.2)$$

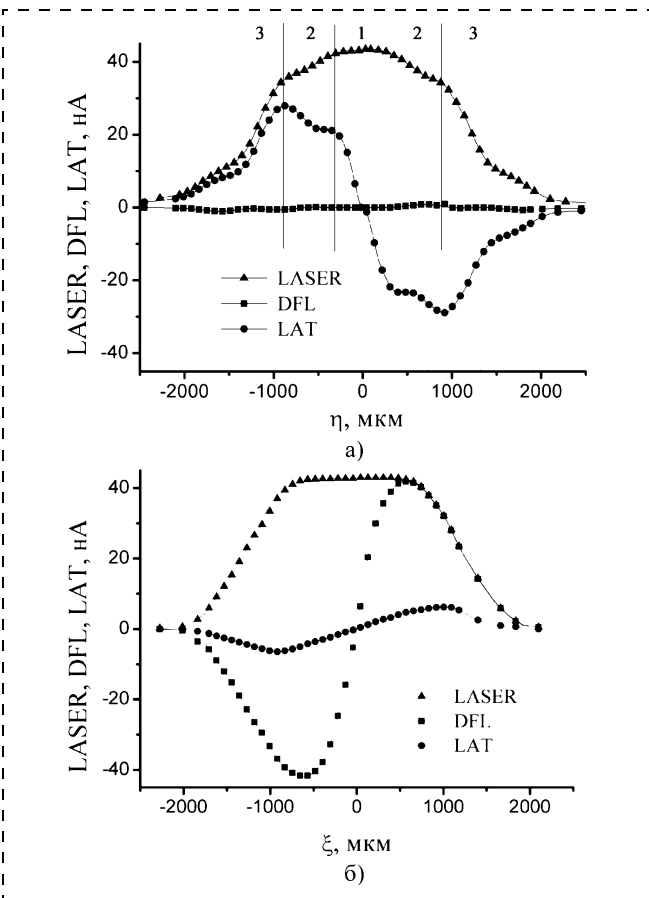


Рис. 3. Экспериментальная зависимость сигналов суммарной интенсивности (LASER), вертикального (DFL) и горизонтального (LAT) отклонения от смещения фотоприемника вдоль осей η (a) и ξ (b)

При больших смещениях винтов ξ и η возникают искажения линейной зависимости, связанные с нерегулярной формой пятна на краях (рис. 3, область 2). При еще больших смещениях пятно начинает выходить за пределы детектора, о чем свидетельствует уменьшение суммарного сигнала LASER, и зависимости начинают убывать (рис. 3, область 3). Области 2 и 3 могут быть разделены "плато", когда выходной сигнал остается постоянным. Такой вид графика говорит о сложной форме пятна. Отсутствие плато на рис. 3 говорит о том, что размеры пятна сравнимы с размером приемника.

Собрав воедино выражения (1), (3), (5), (8), окончательно получим формулу

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_z \end{pmatrix} = \mathbf{BMNK}^{-1} \begin{pmatrix} \text{LAT} \\ \text{DFL} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где $\mathbf{B}$ — зависит от параметров кантилевера; $\mathbf{M}$ и $\mathbf{N}$ — от конструкции микроскопа; $\mathbf{K}^{-1}$ — определяется из калибровки.

В качестве примера использования методики калибровки латеральных сил приведем калибровочные коэффициенты, рассчитанные для двух моделей микроскопа *Solver P47* и кантилевера типа *CSC12(B)* [18]. Параметры использованного кантилевера: длина балки 90 мкм, ширина 35 мкм, толщина 1 мкм, длина зонда 10 мкм. В таблице можно видеть коэффициенты пересчета, соответствующие каждому из шагов методики, а также окончательную калибровочную постоянную.

Калибровочные коэффициенты

№ шага	Ранняя модель <i>Solver P47</i>	Поздняя модель <i>Solver P47</i>
Шаг 1	$F_x[\text{нН}] = 2,1 \cdot 10^5 \beta[\text{рад}]$	
Шаг 2	$\beta[\text{рад}] = 2,5 \cdot 10^{-5} r_b[\text{мкм}]$	$\beta[\text{рад}] = 2,3 \cdot 10^{-5} r_b[\text{мкм}]$
Шаг 3, 4	$r_b[\text{мкм}] = 16,1 \text{LAT}[\text{нА}]$	$r_b[\text{мкм}] = 12,8 \text{LAT}[\text{нА}]$
Итого	$F_x[\text{нН}] = 85 \text{LAT}[\text{нА}]$	$F_x[\text{нН}] = 67 \text{LAT}[\text{нА}]$

Проверка методики калибровки

Описанную выше методику можно применять для калибровки не только латеральной силы (сигнал LAT), но и нормальной силы (сигнал DFL). Вместе с тем для калибровки сигнала DFL существует более простой способ, основанный на измерении кривой подвода (рис. 4). Используем этот факт для проверки нашей методики.

В соответствии с формулами (5)–(9), для зависимости сигнала DFL от угла изгиба кантилевера α можно записать

$$\text{DFL} = 2LK_{\text{DFL}, \xi} (N^{-1})_{2,2} \frac{1}{\cos \phi} \alpha. \quad (10)$$

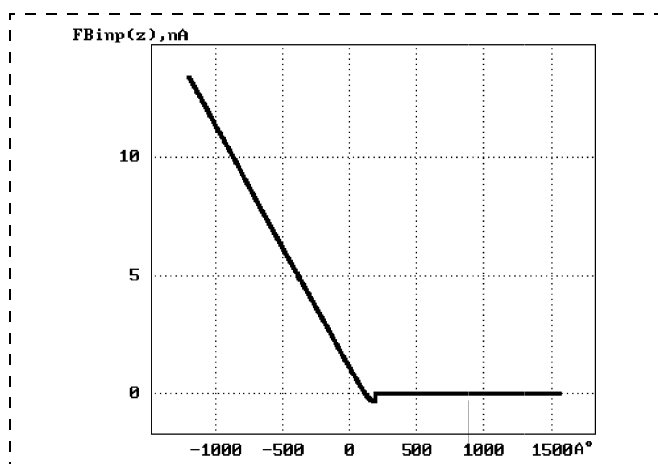


Рис. 4. Кривая подвода $DFL(z)$. Коэффициент наклона линейного участка кривой составляет $0,0086 \text{ нА/Å}$

При значениях параметров, приведенных выше, коэффициент пропорциональности $\Delta DFL/\Delta\alpha$ равен 5300 нА/рад . Вместе с тем, из угла наклона линейного участка кривой подвода (см. рис. 4) можно определить коэффициент $\Delta DFL/\Delta z$, а зная эффективную длину кантилевера $l_{\text{эфф}} \approx l = 90 \text{ мкм}$, найти коэффициент $\Delta DFL/\Delta\alpha = (\Delta DFL/\Delta z) 2l_{\text{эфф}}/3 = 5800 \text{ нА/рад}$. Рассогласование констант, полученных двумя методами, составляет 8% и объясняется неточностью определения величины $l_{\text{эфф}}$. Это возможно по двум причинам. Во-первых, лазерный луч отражается не от самого кончика кантилевера, а размер пятна на кантилевере может достигать 50 мкм . Во-вторых, зонд расположен не на самом кончике кантилевера, а значит эффективная длина кантилевера немного меньше полной длины балки. Для конечного пользователя можно рекомендовать описанную в данном разделе процедуру проверки применять для определения эффективной длины кантилевера, чтобы впоследствии использовать уточненное значение в формулах (4) и (10). В рассматриваемом случае следует брать $l_{\text{эфф}} = 82,2 \text{ мкм}$.

Заключение

В данной работе предложена методика калибровки, позволяющая проводить количественные измерения латеральных сил, что открывает возможность сравнительно простого количественного исследования фрикционных свойств различных поверхностей и в конечном итоге дает нанотрибологии точный экспериментальный инструмент. Следует отметить, что предложенный способ калибровки зависит от конкретной модели микроскопа, так как необходимо знать конструкцию прибора, а именно, взаимное расположение юстировочных винтов и фотоприемника, а также ори-

ентацию светочувствительных сегментов внутри детектора. Впрочем подготовительные расчеты необходимо выполнить лишь однажды, и они могут быть сделаны производителем микроскопа. Воспользовавшись результатами этих расчетов, несложно провести калибровку, даже не имея информации о конструкции микроскопа.

Данная работа выполнена в УНЦ "Нанотехнологии в электронике" МФТИ при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ. Авторы также выражают благодарность компании "НТ-МДТ" за предоставление технической информации о конструкции микроскопа Solver P47 и частичное финансирование данных работ.

Список литературы

1. Дедков Г. В. Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели // Успехи физических наук. 2000. Т. 170. № 6. С. 585–618.
2. Bhushan B. Nanoscale tribophysics and tribomechanics // Wear. 1999. V. 225–229. P. 465–492.
3. Handbook of Micro / Nanotribology / Ed. by B. Bhushan — 2d ed. — Boca Raton etc.: CRC press, 1999. 859 p.
4. Griffith J. E., Grigg D. A. Dimensional metrology with scanning probe microscopes // J. Appl. Phys. 1993. V. 74. № 9. P. R83–R109.
5. Neubauer G., Cohen S. R., McClelland G. M. et al. Force microscopy with a bidirectional capacitance sensor // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. № 9. P. 2296–2308.
6. Tortorese M., Barrette R. C., Quate C. F. Atomic resolution with an atomic force microscope using piezoresistive detection // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. № 8. P. 834–836.
7. Giessible F. J., Trafas B. M. Piezoresistive cantilevers utilized for scanning tunneling and scanning force microscope in ultrahigh vacuum // Rev. Sci. Instrum. 1994. V. 65. № 6. P. 1923–1929.
8. Sarid D., Elings V. Review of scanning force microscopy // J. Vac. Technol. B. 1991. V. 9. № 2. P. 431–436.
9. Martin Y., Williams C. C., Wickramasinghe H. K. Atomic force microscope-force mapping and profiling on a sub 100-Å scale // J. Appl. Phys. 1987. V. 61. № 10. P. 4723–4729.
10. <http://www.ntmdt.ru>
11. Бухараев А. А., Овчинников Д. В., Бухараева А. А. Диагностика поверхности с помощью сканирующей силовой микроскопии // Заводская лаборатория. 1996. С. 10–28.
12. Cappella B., Dietler G. Force-distance curves by atomic-force microscopy // Surf. Sci. Rep. 1999. V. 34. P. 1–104.
13. Ogletree D. F., Carpick R. W., Salmeron M. Calibration of frictional forces in atomic force microscopy // Rev. Sci. Instrum. 1996. V. 67. № 9. P. 3298–3306.
14. Green C. P., Lioe H., Cleveland J. P. et al. Normal and torsional spring constants of atomic force microscope cantilever // Rev. Sci. Instrum. V. 75, № 6. P. 1988–1996.
15. Gibson C. T., Watson G. S., Myhra S. Determination of the spring constants of probes for force microscopy/spectroscopy // Nanotechnology. 1996. V. 7. P. 259–262.
16. Burnham N. A., Chen X., Hodges C. S. et al. Comparison of calibration methods for atomic-force microscopy cantilevers // Nanotechnology. 2003. V. 14. P. 1–6.
17. Sader J. E., Chon J. W., Mulvaney P. Calibration of rectangular atomic force microscope cantilevers // Rev. Sci. Instrum. 1999. V. 70. № 10. P. 3967–3969.
18. <http://www.spmtips.com>

УДК 620.187:539.25

Г. В. Дедков, д-р физ.-мат. наук, проф.,
А. А. Кясов, д-р физ.-мат. наук, доц.,
Кабардино-Балкарский государственный
университет, г. Нальчик,
E-mail: gv_dedkov@mail.ru

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВИЖУЩЕЙСЯ НЕЙТРАЛЬНОЙ НАНОЧАСТИЦЫ С РАВНОВЕСНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В ВАКУУМЕ

В рамках флуктуационно-электромагнитной теории впервые получено полное решение задачи о динамическом взаимодействии наночастицы с однородным фоновым термодинамически равновесного электромагнитного излучения в вакууме. Частица характеризуется изотропной электрической поляризуемостью. Получены общие формулы для силы, действующей на частицу, и скорости ее нагрева (охлаждения) полем черного излучения. Результаты работы представляют интерес для наноэлектродинамики, физики удержания наночастиц в ловушках и физики пылевой материи в астрофизических условиях.

Введение

Динамическое взаимодействие нейтральной наноскопической частицы с термически равновесным полем прозрачной окружающей среды (черным излучением) представляет, с одной стороны, большой теоретический интерес, а с другой — практически необходимо для понимания различных физических явлений, происходящих в зоне контакта частицы с поверхностью образца, имеющих место в сканирующей зондовой микроскопии, в вакуумных ловушках нейтральных частиц, в физике кластеров и в астрофизике. Тем не менее, хотя постановка данной задачи не является новой для флуктуационной электродинамики [1], до последнего времени в литературе отсутствовало детальное рассмотрение демпфирующих сил и радиационного теплообмена частицы и среды, характеризующихся различными температурами, и в случае произвольной скорости частицы.

Переход к телам наноскопических размеров (рассматриваем сферическую наночастицу с радиусом R) является нетривиальным ввиду необходимости корректного учета структуры электромагнитного поля вблизи частицы — фактически, речь идет о структуре ближнего поля, поскольку размеры частицы значительно меньше виновской длины волны черного излучения. Насколько нам известно, первая попытка вычисления демпфирующей

флуктуационной электромагнитной силы, действующей на частицу, движущуюся в фоновом черном излучении (в линейном приближении по скорости), была сделана авторами [2, 3]. В более ранних работах [4—6] радиационные силы, связанные с фоновым излучением, вычислялись в приближении геометрической оптики, когда размеры частицы значительно превосходят виновскую длину волны.

В наших работах [7—9] была разработана общая релятивистская теория флуктуационного электромагнитного взаимодействия движущейся (в вакууме) нейтральной частицы с плоской поверхностью, ограничивающей полубесконечную поляризующуюся среду. Соответствующий формализм оказывается эффективным и в рассматриваемом случае, но, в отличие от задачи о взаимодействии с поверхностью, допускающей нерелятивистское решение в пределе бесконечной скорости света $c \rightarrow \infty$, при вычислении взаимодействия частицы с фоном черного излучения изначальное применение релятивистского подхода является принципиально необходимым. По этой причине полученные в [2, 3] выражения для вязких сил трения не являются общими.

Целью настоящей работы является получение общих выражений для флуктуационной силы и скорости теплового нагрева (охлаждения) частицы в системе отсчета равновесного фонового излучения. С точки зрения практических приложений к сканирующей зондовой микроскопии наибольший интерес представляет случай нерелятивистского движения частицы, реализующийся в высоковакуумном режиме. В частности, практически важны формулы радиационного теплообмена частицы с вакуумной средой (см. далее формулы (5), (7)).

Теория

Рассмотрим нейтральную сферическую частицу с поляризуемостью $\alpha(\omega)$, нагретую до температуры T_1 (в собственной системе покоя), движущуюся вдоль оси x неподвижной декартовой системы координат (связанной с вакуумным фоном) с произвольной скоростью V в области, заполненной равновесным электромагнитным излучением с температурой T_2 . Частица может рассматриваться как точечный флуктуирующий диполь при условии

$$\frac{k_B R}{2\pi\hbar c} \max(T_1, T_2) \ll 1, \quad (1)$$

где k_B и $\hbar$ — постоянные Больцмана и Планка. В соответствии с общим методом [7—9], флуктуационная сила F_x и скорость теплового нагрева $\dot{Q}$ частицы (в системе отсчета "покоящегося фона") определяются выражениями

$$F_x = \langle \nabla_x (d\mathbf{E} + m\mathbf{B}) \rangle; \quad (2)$$

$$\dot{Q} = \langle (\dot{d}\mathbf{E} + \dot{m}\mathbf{B}) \rangle, \quad (3)$$

где $\mathbf{d}$, $\mathbf{m}$ и $\mathbf{E}$, $\mathbf{B}$ — дипольные (электрический и магнитный) моменты частицы и компоненты электрического и магнитного флуктуационного поля, учитывающие спонтанные и индуцированные вклады, угловые скобки обозначают полное квантостатистическое усреднение. Подчеркнем, что все величины в (2), (3) относятся к неподвижной системе отсчета, связанной с однородным фоном черного излучения. Действуя так же, как в [7–9], и используя известный предельный переход к вакууму $\varepsilon(\omega) = 1 + i\delta \operatorname{sign}(\omega)$, $\delta \rightarrow 0$ [1], из (2), (3) получим

$$F_x = -\frac{\hbar\gamma}{\pi c^4} \int_0^\infty d\omega \omega^4 \int_{-1}^1 d\cos\theta \cos\theta \times \\ \times \left\{ (1 + \beta \cos\theta)^2 \alpha''[\omega\gamma(1 + \beta \cos\theta)] \times \right. \\ \left. \times \left(\coth \frac{\hbar\omega}{2k_B T_2} - \coth \frac{\hbar\omega\gamma(1 + \beta \cos\theta)}{2k_B T_1} \right) \right\}; \quad (4)$$

$$\dot{Q} = \frac{\hbar\gamma}{\pi c^3} \int_0^\infty d\omega \omega^4 \int_{-1}^1 d\cos\theta \times \\ \times \left\{ (1 + \beta \cos\theta)^3 \alpha''[\omega\gamma(1 + \beta \cos\theta)] \times \right. \\ \left. \times \left(\coth \frac{\hbar\omega}{2k_B T_2} - \coth \frac{\hbar\omega\gamma(1 + \beta \cos\theta)}{2k_B T_1} \right) \right\}, \quad (5)$$

где $\beta = V/c$; $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$; двойные штрихи над $\alpha(\omega)$ обозначают мнимую компоненту поляризуемости.

В нерелятивистском случае $\beta \ll 1$ в (5) можно считать $\beta = 0$, а в (4) сохранить линейные по β члены. Тогда из (4), (5) следует

$$F_x = \frac{4\hbar V}{3\pi c^5} \int_0^\infty d\omega \omega^5 \left\{ \alpha''(\omega) \frac{d\Pi(\omega, T_1)}{d\omega} + \right. \\ \left. + \frac{\Pi(\omega, T_1) - \Pi(\omega, T_2)}{\omega} \frac{d}{d\omega} (\omega \alpha''(\omega)) \right\}; \quad (6)$$

$$\dot{Q} = -\frac{4\hbar}{\pi c^3} \int_0^\infty d\omega \omega^4 \alpha''(\omega) (\Pi(\omega, T_1) - \Pi(\omega, T_2)), \quad (7)$$

где $\Pi(\omega, T) = \left(\exp \frac{\hbar\omega}{k_B T} - 1 \right)^{-1}$.

При $T_1 = T_2 = T$ из (4), в частности, следует результат [2, 3]:

$$F_x = \frac{4\hbar V}{3\pi c^5} \int_0^\infty d\omega \omega^5 \alpha''(\omega) \frac{d\Pi(\omega, T)}{d\omega}. \quad (8)$$

Что касается формулы (7), то несмотря на ее очевидный характер, в известной нам литературе ее найти не удалось.

Более интересным (в нерелятивистском пределе) является случай разных температур частицы и фона:

а) "горячая" частица и "холодное" излучение ($T_1 = T$, $T_2 = 0$)

$$F_x = -\frac{16\hbar V}{3\pi c^5} \int_0^\infty d\omega \omega^4 \alpha''(\omega) \Pi(\omega, T); \quad (9)$$

б) "холодная" частица и "горячее" излучение

$$F_x = \frac{4\hbar V}{3\pi c^5} \int_0^\infty d\omega \omega \alpha''(\omega) \frac{d}{d\omega} (\omega^4 \Pi(\omega, T)). \quad (10)$$

В ситуациях, описываемых формулами (8) и (9), сила F_x является тормозящей и знак ее отрицателен. Но в случае (10) возможно также и ускорение частицы. Заметим, что такая же возможность имеется и при движении наночастицы вблизи горячей поверхности [7–9]. Пусть частица характеризуется узкой линией поглощения с частотой ω_0 , тогда для $\alpha''(\omega)$ можно записать

$$\alpha''(\omega) = \frac{\pi\omega_0 R^3}{2} \delta(\omega - \omega_0).$$

Подстановка этого выражения в (10) дает

$$F_x = \frac{2}{3} \left(\frac{R\omega_0}{c} \right)^3 \frac{\hbar\omega_0^2 V}{c^2} \left(\frac{4x^3}{\exp(x) - 1} - \frac{x^4}{4\sinh^2(x/2)} \right), \\ x = \hbar\omega_0/(k_B T). \quad (11)$$

График функции $f(x)$, соответствующей зависящему от x сомножителю в круглых скобках (11), показан на рис. 1.

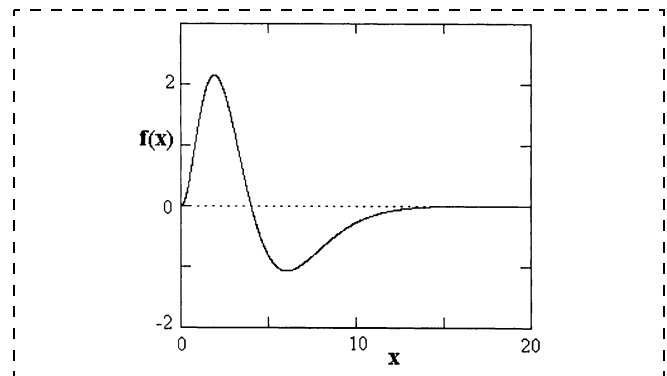


Рис. 1. Функция $f(x)$, $x = \hbar\omega_0/(k_B T)$

В ультрарелятивистской области ($\gamma \gg 1$) при тех же предположениях ($\alpha''(\omega) \sim \delta(\omega - \omega_0)$) из (4), (5) получим

$$F_x = -\frac{\hbar\omega_0^5 R^3 \gamma^{-4}}{c^4} \int_{1/2}^{2\gamma^2} dx (1-x) (\Pi(\omega_0 x/\gamma, T_2) - \Pi(\omega_0, T_1)); \quad (12)$$

$$\dot{Q} = \frac{\hbar\omega_0^5 R^3 \gamma^{-4}}{2c^3} \int_{1/2}^{2\gamma^2} dx (\Pi(\omega_0 x/\gamma, T_2) - \Pi(\omega_0, T_1)). \quad (13)$$

При $T_1 = T$, $T_2 = 0$ частица тормозится и охлаждается, причем сила трения не зависит от скорости движения:

$$F_x \approx -\frac{2\hbar\omega_0^2}{c} \left(\frac{R\omega_0}{c}\right)^3 \Pi(\omega_0, T); \quad (14)$$

$$\dot{Q} \approx -\hbar\omega_0^2 \gamma^{-2} \left(\frac{R\omega_0}{c}\right)^3 \Pi(\omega_0, T). \quad (15)$$

При $T_1 = T_2 = T$ ситуация может быть разной.

Так, при $\frac{\hbar\omega_0}{k_B T} \ll 1$ первые слагаемые в интегралах (12), (13), зависящие от $\Pi(\omega_0 x/\gamma)$, малы, поэтому формулы (14) и (15) остаются в силе. Но при $\frac{\hbar\omega_0}{k_B T} > 1$ в зависимости от величины параметра $\frac{\hbar\omega_0}{k_B T}$, наоборот, доминирующими оказываются интегралы, содержащие $\Pi(\omega_0 x/\gamma)$. В этом случае знак F_x и $\dot{Q}$ может быть другим, и формулы (14) и (15) несправедливы.

В случае горячего фона ($T_1 = 0$, $T_2 = T$) из (12), (13) следует

$$F_x = \frac{k_B T \omega_0 \gamma^{-4}}{c} \left(\frac{R\omega_0}{c}\right)^3 f_1(x), \quad x = \frac{\hbar\omega_0}{\gamma k_B T}; \quad (16)$$

$$\dot{Q} = k_B T \omega_0 \gamma^{-4} \left(\frac{R\omega_0}{c}\right)^3 f_2(x). \quad (17)$$

Результаты численных расчетов

На рис. 1 показан график функции $f(x) = 4x^3(\exp(x) - 1)^{-1} - 0,25x^4/\sinh^2(x/2)$, входящей в (11). Из расчетов следует, что $F_x > 0$ при $x < 3,92$, причем максимальное значение $f_{\max} = 2,13$ достигается в точке $x = 1,86$, а минимальное значение $f_{\min} = -1,07$ достигается при $x = 5,7$. Интересным также является тот факт, что в силу зависимости $F_x \sim R^3$ ускорение или замедление частиц разного размера (но из одного материала) не зависит от их массы. Рассмотрим в качестве примера ускорение наночастицы легированного кремния с собственной частотой $\omega_0 = 0,2 \text{ eV}$, находящейся в поле равновесного излучения с температурой 900 K, что соответствует $f(x) = 1,7$. Тогда из (11) следует, что время экспоненциального возрастания начальной скорости частицы в e раз составляет 2,6 года. При наличии пиков поглощения в области $\omega_0 \sim 1 \text{ eV}$ преобладает торможение, причем время демпфирования сокращается в 100–1000 раз. Менее существенные эффекты торможения и нагрева, обусловленные поглощением на более высоких частотах, характеризуются значительно большими временами из-за наличия в формулах (8)–(10) обрезających экспоненциальных факторов. Большие времена релаксации характерны и для вкладов низкочастотных омических потерь в частице (на частотах ниже частоты Вина), когда $\alpha''(\omega) \sim R^3 \omega/\sigma$ (σ — проводимость).

На рис. 2, 3 приведены графики функций $f_1(x)$ и $f_2(x)$, входящих в (16), (17). При соответствующих условиях частица нагревается, а сила F_x , как видно на рис. 2, является ускоряющей при $x < 1,75$ и тормозящей при $x > 1,75$.

В заключение обсудим физический смысл следствий полученных результатов. Может показаться странным, например, наличие тормозящей силы ($F_x < 0$), действующей на нагретую частицу ($T_1 = T$), движущуюся в вакууме при $T_2 = 0$. При этих условиях из формул (7), (15) следует, что частица охлаждается, поскольку $\dot{Q} < 0$. Следует, однако, заметить, что в данной ситуации процесс охлаждения не имеет полной аналогии с охлаждением при изотропном (в системе покоя частицы) излучении радиационных фотонов движущейся частицей,

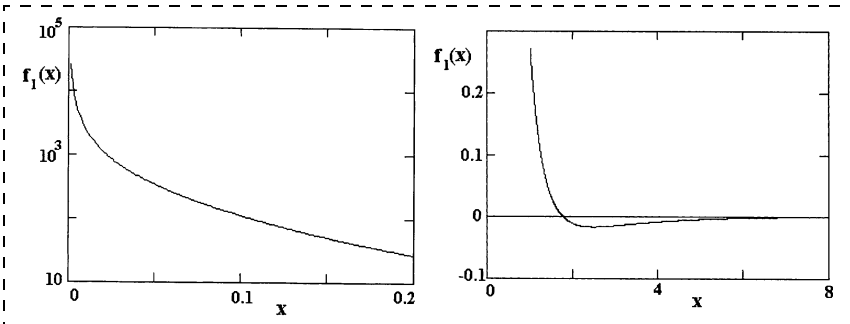


Рис. 2. Функция $f_1(x)$, $x = \hbar\omega_0/(\gamma k_B T)$

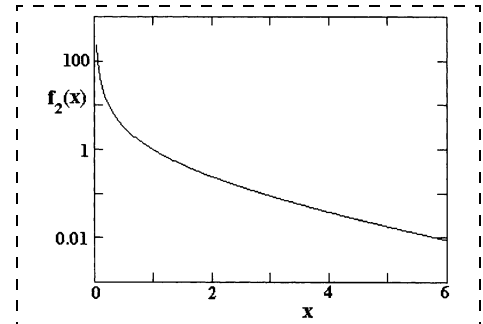


Рис. 3. Функция $f_2(x)$, $x = \hbar\omega_0/(\gamma k_B T)$

когда ее скорость, очевидно, остается постоянной. Это связано с отличием структуры ближнего (нерадиационного) электромагнитного поля (вблизи частицы) от структуры дальнего (радиационного) поля в волновой зоне, а в математическом отношении является прямым следствием предельного перехода к физически прозрачной среде, в которой все же имеется сколько-нибудь отличное от нуля поглощение [1].

Что касается возможности изменения знака F_x и $\dot{Q}$, то это достаточно легко понять, рассматривая баланс энергии в системе электромагнитное поле — частица [4—6]:

$$- \frac{dW}{dt} = F_x V + \dot{Q}, \quad (18)$$

где W — энергия электромагнитного поля; $-dW/dt$ — работа, совершаемая полем. Отсюда следует, что значение и знак силы F_x определяются соотношением между скоростью нагрева $\dot{Q}$ и работой электромагнитного поля и потому не являются фиксированными. То же относится и к скорости нагрева $\dot{Q}$.

Динамика частицы в общем случае будет определяться релятивистским уравнением движения $mc\beta = \gamma^{-3/2} F_x$, которое должно решаться совмест-

но с уравнением для изменения ее температуры в собственной системе покоя. Это требует специального рассмотрения. Более простой численный анализ стационарного режима ($F_x = 0$, $\dot{Q} = 0$) показывает, что он имеет место асимптотический характер при $T_1 \rightarrow T_2 = T$ и $\hbar\omega_0/(k_B T) \gg 1$. Чем больше β , тем большее значение параметра $\hbar\omega_0/(k_B T)$ требуется для достижения этого состояния.

Список литературы

1. Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Статистическая физика. Ч. 2. М.: Физматлит, 2002.
2. Mkrtchian V., Parsegian V. A., Podgornik R. and Saslow W. M. // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 91. N 22. P. 220801.
3. Zurita Sanchez J. R., Greffet J. J., Novotny L. // Phys. Rev. 2004. V. A69. P. 022902.
4. Henry G. R., Feduniak R. B., Silver J. E and Peterson M. A. // Phys. Rev. 1968. V. 176. P. 1451.
5. Peebles P. J. E., Wilkinson D. T. // Phys. Rev. 1968. V. 174. P. 2168.
6. Heer C. V., Kohl R. H. // Phys. Rev. 1968. V. 174. P. 1611.
7. Kyasov A. A., Dedkov G. V. // Nucl. Instr. Meth. 2002. V. B195. N 3—4. P. 247.
8. Dedkov G. V., Kyasov A. A. // Phys. Low. — Dim. Struct. 2003. V. 1/2. P. 1.
9. Дедков Г. В., Кясов А. А. // ФТТ. 2003. Т. 45. № 10. С. 1729.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 51.007.57

В. А. Карташев, д-р. физ.-мат. наук., проф.,
Т. Ф. Бурухина,
Институт прикладной математики РАН,
vakart@keldysh.ru

ВЛИЯНИЕ НЕРЕЗОНАНСНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПОЛОЖЕНИЕ ИГЛЫ ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА

Исследуется влияние на положение иглы туннельного микроскопа нерезонансных колебаний в плоскости рабочего стола. Показано, что наибольший вклад в ошибки положения иглы вносит прогиб конструкции под действием силы тяжести, который изменяется при раскачивании оси микроскопа. Этот эффект наиболее выражен в низкочастотном диапазоне колебаний, в котором его вклад на порядок превосходит вклад поступательных колебаний, которые традиционно учитываются при расчетах влияния внешних возмущений.

Туннельный микроскоп позволяет исследовать рельеф поверхности с разрешением, которое в 10 раз

меньше размера атома. Условия, в которых проводятся измерения, достаточно сложные, так как рельеф поверхности измеряется с помощью туннельного тока, который возникает при зазоре (туннельный зазор) порядка 1 нм. Предельная малость этих величин делает необходимым тщательное исследование факторов, которые могут влиять на точность измерений.

В работе рассматривается влияние нерезонансных колебаний на точность положения иглы микроскопа относительно подложки для туннельного микроскопа, который изготовлен в Наноцентре [1]. Этот микроскоп позволяет проводить измерения рельефа поверхности с точностью до 0,1 нм и осаждать атомы на подложку в среде технологического газа с точностью до 1 нм.

Измерительный блок микроскопа представляет собой жесткую конструкцию, которая подвешена над основанием на пружинном подвесе. Для того чтобы в максимальной степени снизить влияние внешних колебаний на положение иглы, пружины подвеса имеют достаточно малый коэффициент упругости.

В оценках количественной зависимости амплитуды отклонения иглы от возмущений использовались реальные размеры элементов конструкции микроскопа. Динамические параметры (положение центра масс и моменты инерции) вычислены с учетом конструкции микроскопа и размеров его узлов.

Рассматриваются колебания основания микроскопа в горизонтальной плоскости. Эти возмущения выбраны для исследования по следующим причинам:

- они действуют в плоскости рабочего стола, на котором установлен микроскоп, и проявляются при раскачивании стола, что является наиболее вероятным возмущением;
- для вычисления действия этих возмущений используются те же модели динамики, что и для возмущений, которые направлены по другим осям. Поэтому для них может также использоваться разработанная в работе методика вычислений.

Полученные оценки зависимости амплитуды отклонения иглы от колебаний основания позволяют сделать ряд важных выводов, которые необходимо принимать во внимание в дальнейших работах с туннельным микроскопом.

1. Маловероятны отклонения иглы, которые существенно больше 1 нм, так как амплитуда колебаний, которые приводят к таким отклонениям, должна быть настолько велика, что они даже будут заметны визуально.

2. Наибольший вклад в отклонения вносит не динамическая, а статическая составляющая деформации, т. е. прогиб конструкции под действием силы тяжести, которая проявляется при наклонах оси микроскопа. Этот эффект настолько мал, что необходимость его учета возникает лишь постольку, поскольку с помощью туннельного микроскопа проводятся измерения с точностью до долей атома. В обычных конструкциях он, по-видимому, не учитывается, так как его негативное действие слишком мало и должно проявляться только при изменении наклона оси конструкции машины.

Конструкция туннельного микроскопа

Зондовый туннельный микроскоп [1] (рис. 1) предназначен для исследования формы поверхности подложки и манипуляций с атомами, находящимися на ней. Зонд представляет собой тонкую токопроводящую иглу, радиус закругления которой не более 10 нм.

Микроскоп имеет шесть степеней подвижности. Пять из них приводят в движение иглу. Шестая степень подвижности используется для вертикального перемещения сканируемой подложки. Все приводы выполнены из пьезокерамики.

Для перемещения иглы в горизонтальной плоскости используются две степени грубых перемеще-

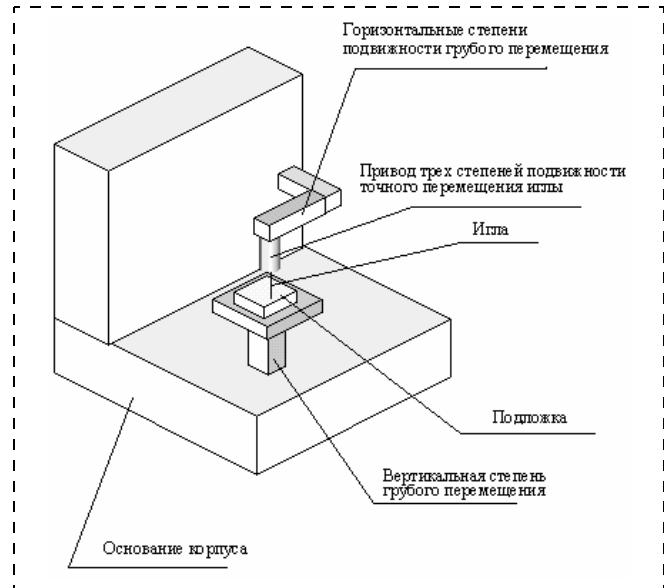


Рис. 1. Схема устройства туннельного микроскопа

ний и две степени точного перемещения (рис. 2). По вертикали игла перемещается одной степенью точного перемещения.

С помощью приводов точных перемещений осуществляется сканирование участка поверхности подложки. Диапазон их перемещений 0,6 мкм с шагом 0,01 нм. Скорость перемещения 10 нм/с.

Приводы грубых перемещений иглы и привод перемещения подложки по вертикали используются для быстрого подвода иглы к исследуемому участку поверхности. Диапазон их перемещений до 10 мм с шагом 0,1 мкм. Скорость перемещения грубых приводов 1 мм/мин.

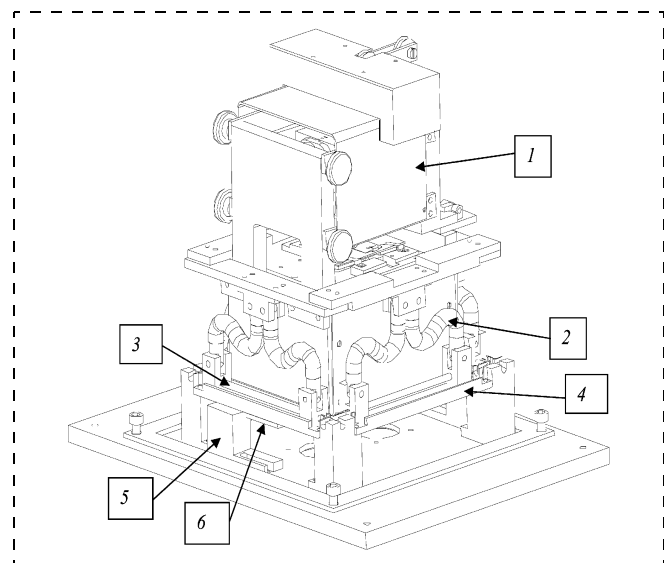


Рис. 2. Измерительный блок микроскопа с пружинами подвеса: 1 — блок манипуляторов; 2 — пружины подвеса; 3 и 4 — нижняя опора пружин; 5 — упор фиксатора упругого подвеса; 6 — фиксатор подвеса

Исследование факторов, приводящих к колебаниям иглы относительно подложки

Упругость звеньев манипулятора перемещений иглы является причиной отклонений в движения иглы относительно подложки. Например, колебания корпуса микроскопа под действием возмущений вызывают вынужденные колебания иглы.

Оценка амплитуды колебаний иглы связана с исследованием вынужденных колебаний тела, закрепленного на упругой балке, основание которой совершает колебания заданной частоты. В данном разделе даются оценки допустимой амплитуды колебаний основания, при которых отклонения иглы не превышают заданной ошибки измерения рельефа поверхности.

Исследование упругих свойств звеньев манипулятора горизонтальных перемещений показало, что перемещения иглы под действием силы тяжести на несколько порядков превышают допустимую погрешность измерения. Этот эффект является существенным только при измерении величин с нанометровыми точностями. В отсутствие колебаний основания им можно пренебречь, так как ориентация корпуса микроскопа не меняется. Однако даже незначительный наклон оси измерительного блока микроскопа достаточен для того, чтобы изменение направления силы тяжести привело бы к смещению иглы на значительное расстояние относительно подложки.

Причиной возникновения наклона оси может стать упругий подвес. Поэтому в уравнениях движения рассматриваются члены, которые учитывают как поступательное, так и вращательное движение микроскопа.

Упругие свойства звена манипулятора горизонтальных перемещений. Для расчетов нам потребуется знать упругие свойства звеньев горизонтальной степени грубого перемещения с учетом условий их нагружения.

Каждое из этих звеньев нагружено, как консольная балка (рис. 3). Например, на первое звено действует сила тяжести частей степени подвижности, которые расположены за ним. Все звенья вы-

полнены из алюминия. Расчеты показывают, что их суммарная масса составляет около 50 г.

Дальнейшие исследования связаны с учетом влияния упругости первого звена манипулятора грубых горизонтальных перемещений, так как податливость этого звена вносит наибольший вклад в возмущение движений иглы. Массу конструкции манипулятора, находящегося за этой степенью, будем называть присоединенной массой.

Будем считать, что вся присоединенная масса сосредоточена на конце балки. Это приведет к тому, что вычисленный прогиб окажется примерно в 2 раза больше, чем реальный.

Деформация консольно нагруженной балки в каждой ее точке линейно зависит от расстояния до точки закрепления x :

$$\varepsilon(x) = \frac{P(l-x)}{EJ}. \quad (1)$$

где $\varepsilon(x)$ — деформация в точке с координатой x относительно основания балки; $P = 0,5$ Н — вес груза, действующего на конец балки; $l = 7$ см — длина балки; $E = 0,6 \cdot 10^9$ Па, — модуль упругости алюминия, из которого сделаны звенья манипулятора; J — осевой момент сечения, направленный перпендикулярно оси балки. Для балки квадратного сечения толщиной $d = 1$ см осевой момент $J = \frac{1}{12} d^4 = 0,08$ см⁴.

Подставив в формулу (1) числовые значения ее констант, вычислим упругое перемещение конца балки r и ее упругость. Для этого надо два раза проинтегрировать выражение для деформации по длине балки. В результате получим

$$r = \frac{Pl^3}{6EJ} = \frac{0,5 \cdot 7^3}{4 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 10^{-10}} \text{ м} = 500 \text{ нм}.$$

Прогибом остальных звеньев мы пренебрежем. Расчеты показывают, что их значение сравнимо с прогибом первого звена.

Теперь учтем деформацию кручения упругой балки. Деформация кручения $\varepsilon_{кр}$ консольно нагруженной балки пропорциональна крутящему моменту, возникающему под действием силы тяжести. Этот момент создается весом звеньев, которые находятся за первым звеном. Плечо момента равно половине длины балки. С учетом этого

$$\varepsilon_{кр} = \frac{Pl}{\frac{1}{3} EJ_{кр}},$$

где $J_{кр} \approx 0,1$ см⁴ — осевой момент сечения, взятый относительно оси балки.

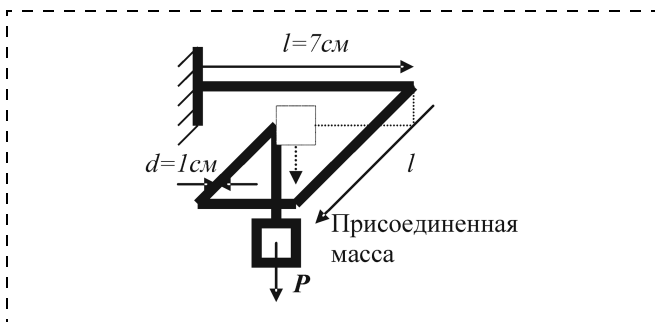


Рис. 3. Условия нагружения первого звена

Подставив в формулу (1) числовые значения ее констант, вычислим упругое перемещение конца балки $r_{кр}$, вызванное деформацией кручения, и упругость кручения. Оно получается двукратным интегрированием деформации от упругого кручения по длине балки l :

$$r_{кр} = \frac{P l^2}{2 EJ} = \frac{0,5 \frac{7}{2} 7^2 \cdot 10^{-3}}{\frac{2}{3} \frac{2}{3} 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-8}} \text{ м} \approx 200 \text{ нм}.$$

Следует заметить, что реальное перемещение будет больше вычисленного, так как кручение испытывают все звенья, которые расположены за первым звеном. Оценки показывают, что их вклад в общее перемещение соизмерим с вкладом первого звена. Поэтому прогиб конструкции манипуляторов под действием силы тяжести составит не менее $500 \text{ нм} + 2 \cdot 200 \text{ нм} \approx 1000 \text{ нм} = 1 \text{ мкм}$.

Упругость конструкции манипуляторов k равна отношению веса груза к упругому перемещению, которое складывается из прогиба балки и ее кручения:

$$k = \frac{0,5}{1 \cdot 10^{-6}} \text{ Н/м} \approx 0,0005 \text{ Н/нм}.$$

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- прогиб конструкции манипулятора грубых горизонтальных перемещений под действием силы тяжести составляет около 1 мкм. Это почти на пять порядков превосходит величину, с которой проводятся измерения формы поверхности;
- конструкция манипулятора имеет большую податливость. Например, 0,01 Н дополнительного веса вызывает смещение на 20 нм, т. е. в 2000 раз большее, чем точность, с которой измеряется рельеф поверхности;
- отклонения от ненагруженного положения манипулятора имеют статический характер. Поэтому они не сказываются на работе микроскопа до тех пор, пока на него не действуют толчки и колебания, вызванные внешним воздействием.

Наклон оси приводит к изменению деформации в конструкции микроскопа. Как показали расчеты, тензор деформации манипулятора упругих перемещений близок к сфере. Поэтому при наклоне оси возникает горизонтальная составляющая смещения иглы, которая пропорциональна углу наклона и прогибу вдоль вертикали. Для того чтобы оценить амплитуду отклонений оси, необходимо рассмотреть зависимость колебаний манипулятора грубых перемещений и измерительного блока от колебаний основания микроскопа.

Например, отклонение оси на $1/1000$ рад (приблизительно $5'$) вызывает смещение иглы относительно подложки на 1 нм. Даже для измерений с точностью до 0,1 нм (около 1 атома) это значение является неприемлемо большим.

Рассматриваемый эффект интересен тем, что малые силы и малые возмущения приводят к значительным отклонениям в положении иглы. В обычных конструкциях прогибы под действием статических нагрузок не являются существенными для их работы.

Оценка отклонений иглы при действии периодических возмущений на основании измерительного блока. При колебании основания измерительного блока игла туннельного микроскопа совершает колебания относительно подложки в силу упругости балочной конструкции, на конце которой она расположена. Поэтому задача оценки амплитуды колебаний иглы сводится к рассмотрению вынужденных колебаний конца балочной конструкции относительно ее основания при раскачивании основания. По каждой из осей эти колебания определяются уравнением

$$m(x + A \sin ft)'' = -kx,$$

где x — отклонение приведенной массы от положения равновесия относительно подложки; m — присоединенная масса балочной конструкции манипулятора горизонтальных перемещений; k — коэффициент упругости балочной конструкции; A — амплитуда периодических колебаний основания; f — круговая частота колебаний; t — время.

Перепишем уравнение в виде

$$mx'' = -kx + Amf^2 \sin ft.$$

Решение этого уравнения является суммой общего решения однородного уравнения и частного решения исходного.

Решение однородного уравнения имеет вид

$$x_{одн} = C \sin \omega t + D \cos \omega t,$$

где $\omega = \sqrt{k/m}$ — собственная круговая частота приведенной массы; C и D — константы, которые задаются начальными условиями.

Будем предполагать, что частоты колебаний основания и собственной частоты колебаний приведенной массы не равны. В этом случае частное решение запишется в виде

$$x_{одн} = U \sin ft + V \cos ft.$$

Константы U и V должны быть выбраны такими, чтобы это соотношение удовлетворяло исходному уравнению. После подстановки получим

$U = \frac{Amf^2}{k - mf^2}$, $V = 0$. При нулевых начальных усло-

виях $C = \frac{-Amf^3}{(k - mf^2)\omega}$, $D = 0$.

Колебания иглы относительно основания совпадают с колебаниями приведенной массы, на конце которой она расположена. Они даются выражением

$$\frac{-Amf^3}{(k - mf^2)\omega} \sin \omega t + \frac{Amf^2}{k - mf^2} \sin ft.$$

Ввиду сделанного предположения о несоизмеримости частот колебаний основания и собственной частоты колебаний приведенной массы амплитуда колебаний иглы будет равна сумме амплитуд колебаний, т. е.

$$\frac{Amf^2}{|k - mf^2|} \left(1 + \frac{f}{\omega}\right).$$

Принимая во внимание, что $\omega = \sqrt{k/m}$, приведем это выражение к виду $\frac{Af^2}{|\omega^2 - f^2|} \left(1 + \frac{f}{\omega}\right)$.

Значение этого выражения равно $\frac{Af^2}{\omega|\omega - f|}$. Тем не менее, для дальнейшего оказывается полезным анализ вклада общего решения однородного уравнения и частного решения в формулу амплитуды колебаний, которая дается предыдущим выражением.

Непосредственно из нее следует, что при малых частотах колебаний ($f \ll \omega$) вкладом общего решения можно пренебречь. При больших частотах ($f \gg \omega$) незначительным оказывается вклад частного решения, причем амплитуда колебаний больше частного решения в f/ω раз ($f/\omega \gg 1$).

После подстановки фактических значений собственной частоты ω амплитуда колебаний получится равной

$$\frac{An_f^2}{n_\omega |n_\omega - n_f|} = \frac{n_f^2 A}{500 |500 - n_f|} = \frac{2 \cdot 10^{-3} n_f^2 A}{|500 - n_f|}.$$

Здесь

$$n_\omega = \frac{\omega}{2\pi} = 500 \text{ Гц} — \text{собственная частота колебаний приведенной массы, вычисленная с учетом значения массы корпуса и упругости подвеса;}$$

$n_f = \frac{f}{2\pi}$ Гц — частота колебания основания.

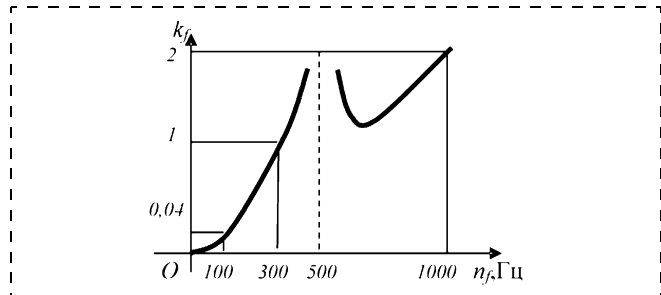


Рис. 4. Зависимость k_f от частоты

Из полученной формулы следует, что амплитуда колебания иглы пропорциональна амплитуде колебаний блока манипуляторов с коэффициентом

$$k_f = \frac{2 \cdot 10^{-3} n_f^2}{|500 - n_f|}.$$

На рис. 4 зависимость этого коэффициента от частоты представлена в виде графика.

Из рисунка следует, что балочная конструкция манипулятора достаточно хорошо гасит только низкочастотные колебания (до 100 Гц). В этом диапазоне частот отношение амплитуды колебания иглы к амплитуде колебаний основания меньше 0,04. В остальном диапазоне частот колебания основания манипулятора практически без изменений передаются игле.

Полученные данные представлены в виде табл. 1. В первом столбце таблицы указаны амплитуды колебаний иглы. Во втором и третьем столбцах показано, с какой амплитудой должно колебаться основание блока манипуляторов, для того чтобы возникли заданные колебания иглы.

Первая строка таблицы соответствует точности, которой необходимо достичь для того чтобы получить изображение атома.

Вторая строка соответствует точности работы туннельного микроскопа ЛУЧ-2.

Третья строка соответствует точности, с которой предполагается осуществлять технологические операции по осаждению атомов на поверхность.

Полученные значения амплитуды колебаний относятся к основанию манипулятора грубых перемещений. Для того чтобы оценить зависимость возмущений движения иглы от колебаний опоры, данные второго и третьего столбцов следует пере-

Таблица 1

Амплитуда колебаний иглы, нм	Амплитуда колебаний основания измерительного блока с частотой		
	меньше 5 Гц	около 100 Гц	больше n_ω
0,01	> 0,1 мкм	> 0,02 мкм	0,01 нм
0,1	> 10 мкм	> 0,2 мкм	0,1 нм
1	> 100 мкм	> 2 мкм	1 нм

считать с учетом упругости подвеса микроскопа. Эти расчеты приведены в следующем разделе. Тем не менее, представленные данные позволяют сделать вывод о том, что наибольшую опасность представляют высокие частоты колебаний. Кроме того, если вынужденные колебания далеки от резонанса, то они не приводят к отклонению иглы более чем на 1 нм.

Колебания микроскопа, вызываемые воздействиями на его основание

Измерительный блок микроскопа находится на упругом основании. Пружины подвески снижают действие колебаний на измерительную часть микроскопа. В настоящем разделе дается оценка амплитуды колебаний в зависимости от частоты.

Оказалось, что пружинный подвес достаточно хорошо снижает влияние возмущений, приводящих к отклонениям в плоскости стола. Однако колебания с частотой 1–5 Гц приводят к существенным отклонениям оси измерительного блока микроскопа от вертикали. В результате этого изменяются деформации блока манипуляторов, что приводит к смещениям иглы. Оценки показывают, что эти смещения на порядок больше, чем при поступательных колебаниях микроскопа.

Модель динамики микроскопа. Измерительный блок имеет форму прямоугольного параллелепипеда. Он опирается на пружины, которые закреплены в средней части параллелепипеда (рис. 5).

Пружины имеют большой ход для того, чтобы гасить ударные и колебательные нагрузки, идущие со стороны основания. Упругость каждой пружины 25 Н/м. Жесткость всех пружин одинакова.

Подвеска позволяет измерительному блоку совершать продольные и вращательные перемещения небольшой амплитуды.

Основание измерительного блока имеет длину примерно 10 см. Центр тяжести блока расположен ниже плоскости опоры пружин примерно на 5 см. В расчетах предполагается, что он проецируется в центр основания.

Свяжем с кожухом микроскопа подвижную систему координат O_MXYZ (рис. 5), центр которой поместим в центр плоскости сечения подвеса.

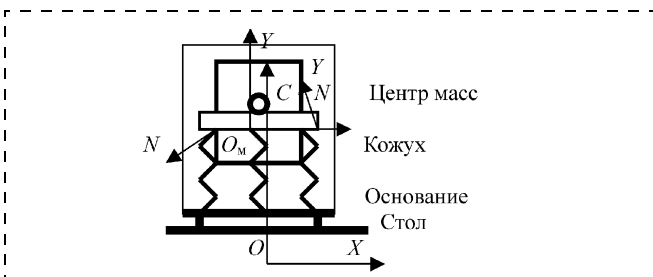


Рис. 5. Схема подвеса микроскопа

Оси направим вдоль сторон основания. Система координат O_MXYZ при толчках движется вместе с корпусом.

Абсолютную систему координат $OXYZ$ свяжем со столом, на котором стоит кожух.

Рассмотрим влияние возмущений, действующих вдоль оси OX . В случае малых перемещений координата X_M положения центра масс микроскопа определяется формулой

$$X_M = -\phi h_c + x_c + u(t),$$

где ϕ — угол поворота корпуса относительно оси OY ; x_c , h_c — координата центра масс микроскопа в осях O_MXYZ ; $u(t)$ — смещение точки O_M в осях $OXYZ$, которое вызвано действием возмущения.

Таким образом, уравнения движения микроскопа вдоль оси OX имеют вид

$$\begin{aligned} m(-\phi h_c + x_c + u(t))'' &= N_x; \\ J\phi'' &= M_y; \\ M_y &= M_P + M_{N_x} + M_{N_z}; \\ M_P &= -x_c P, \quad M_{N_x} = h_c N_x, \quad M_{N_z} = l N_z; \\ N_x &= -kx_c, \quad N_z = -kl\phi. \end{aligned}$$

Здесь J — момент инерции измерительного блока относительно оси OY ; N_x — сила натяжения пружин, которая пропорциональна смещению блока по оси OX ; k — коэффициент упругости четырех пружин (100 Н/м); M_y — суммарный момент относительно центра масс: веса блока (M_P), сил горизонтального натяжения пружин (M_{N_x}), момента, создаваемого вертикальным натяжением пружин (M_{N_z}); N_x и N_z — компоненты силы действия пружин на измерительный блок. Подставив выражения для сил и моментов, получим

$$\begin{aligned} m(-\phi h_c + x_c + u(t))'' &= -kx_c; \\ J\phi'' &= -(kh_c + P)x_c - kl^2\phi. \end{aligned}$$

Оценка отклонений в положении иглы при колебаниях основания. Рассмотрим отклонения в движении иглы, вызванные колебательными воздействиями на основание. Для этого положим в уравнениях динамики $u(t) = A \sin ft$ и перепишем их в виде

$$\begin{aligned} m(-\phi h_c + x_c)'' + kx_c &= Amf^2 \sin ft; \\ J\phi'' + (kh_c + P)x_c + kl^2\phi &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Решение этого уравнения можно представить в виде суммы общего решения однородного уравнения и частного решения исходного. Так же, как и в предыдущем разделе, можно показать, что для частот, много меньших, чем собственные частоты колебаний, вкладом общего решения однородного уравнения можно пренебречь. Для частот, которые много больше собственных частот колебаний корпуса, амплитуда колебаний больше амплитуды колебаний частного решения в f/k раз, где k соизме-

рима с собственными частотами. Следовательно, для низких частот достаточно точную оценку амплитуды колебаний можно получить, если найти частное решение. Амплитуда колебаний для высоких частот будет в несколько раз больше амплитуды колебаний частного решения.

Частное решение является линейной комбинации синусов и косинусов:

$$\begin{aligned}x_c &= C_x \sin ft + D_x \cos ft; \\ \varphi &= C_\varphi \sin ft + D_\varphi \cos ft.\end{aligned}$$

Подставив эти выражения в уравнение (1), получим систему уравнений для коэффициентов C_x , D_x , C_φ и D_φ в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} -mf^2 + k & mhc f^2 & 0 & 0 \\ khc + P & -Jf^2 + kl^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -mf^2 + k & mhc f^2 \\ 0 & 0 & khc + P & -Jf^2 + kl^2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} C_x \\ C_\varphi \\ D_x \\ D_\varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Amf^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Из двух последних строк следует, что в решениях отсутствуют косинусы, так как для D_x и D_φ получаются только нулевые решения.

Из первых двух строк последовательно находим:

$$\begin{aligned}C_x &= \frac{Jf^2 - kl^2}{khc + P} C_\varphi; \\ C_\varphi &= -\frac{Amf^2(khc + P)}{(mf^2 - k)(Jf^2 - kl^2) + mhc f^2(khc + P)}; \\ C_x &= -\frac{Amf^2(Jf^2 - kl^2)}{(mf^2 - k)(Jf^2 - kl^2) + mhc f^2(khc + P)}.\end{aligned}$$

Рассмотрим теперь вклад общего решения уравнения в амплитуду колебаний.

Числовые значения констант равны:

$m = 1$ кг, $J = 5 \cdot 10^{-3}$ кг·м², $k = 100$ Н/м, $h_c = 5 \cdot 10^{-2}$ м, $l = 7,5 \cdot 10^{-2}$ м, $f = 2\pi n$ (n — частота в Гц).

В итоге получаем

$$\begin{aligned}C_\varphi &= -\frac{A500n^2}{(36n^2 - 100)(36 \cdot 10^{-3}n^2 - 25 \cdot 10^{-2}) + 27n^2}; \\ C_x &= -\frac{A36n^2(1 \cdot 10^{-3}36n^2 - 25 \cdot 10^{-2})}{(36n^2 - 100)(36 \cdot 10^{-3}n^2 - 25 \cdot 10^{-2}) + 27n^2}.\end{aligned}$$

На рис. 6 и 7 изображены зависимости полученных коэффициентов от частоты.

Как было сказано выше, амплитуда колебаний частного решения дает представление об амплитуде колебаний всего решения только для низких частот. Для высоких частот амплитуда полных колебаний в несколько раз выше, причем растет пропорционально частоте. График амплитуды колебаний оси при этом практически не изменится, так как на больших частотах коэффициент C_φ пропорционален n^2 . Амплитуда колебаний начала координат, которая дается коэффициентом C_x , будет возрастать линейно с ростом частоты возмущений. Скорректированный график (график амплитуды поступательных колебаний) изображен на рис. 8.

Из рисунков можно сделать следующие выводы:

- упругий подвес микроскопа эффективно снижает действие возмущений в горизонтальной плоскости, только если их частота не превышает нескольких десятков герц. Чувствительность к горизонтальным возмущениям для высоких частот возрастает с ростом частоты;
- подвес препятствует раскачиванию измерительного блока во всем диапазоне частот, за исключением возмущений с частотой от 0,5 до 10 Гц. В указанном диапазоне частот возмущения приводят к наклонам вертикальной оси.

Амплитуда наклона достаточно мала. Например, колебания основания в 10 мкм способны привести к наклону оси примерно $1 \cdot 10^{-4}$ рад или 0,3'. Тем не менее, наклон оси приведет к смещению зонда (ввиду изменения деформации конструкции

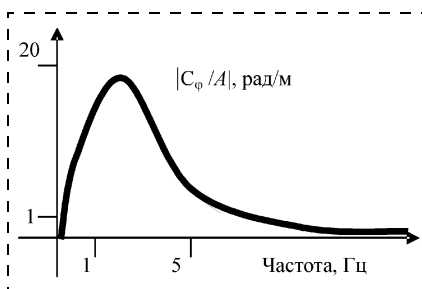


Рис. 6. Зависимость C_φ от частоты

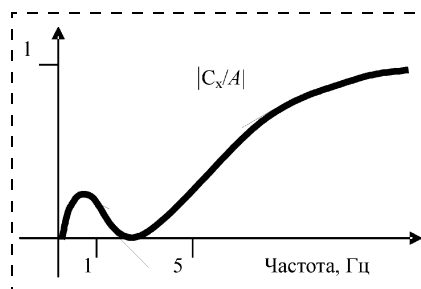


Рис. 7. Зависимость C_x от частоты

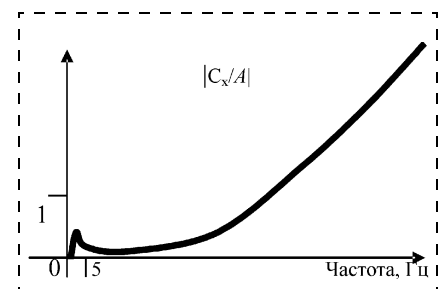


Рис. 8. Скорректированный график C_x

Таблица 2

Перемещение иглы из-за отклонения микроскопа от вертикали	Амплитуда возмущений основания с частотой	
	меньше 5 Гц	больше n_{ω}
0,01	0,5 мкм	0,001 нм
0,1	5 мкм	0,01 нм
1	50 мкм	0,1 нм

Таблица 3

Амплитуда вынужденных колебаний измерительного блока, нм	Амплитуда колебания основания с частотой	
	меньше 5 Гц	больше n_{ω}
0,01	5 мкм	0,02 нм
1	50 мкм	0,2 нм
10	500 мкм	2 нм

Таблица 4

Амплитуда колебаний иглы, нм	Амплитуда возмущений основания с частотой	
	меньше 5 Гц	больше n_{ω}
0,01	5 мкм	0,002 нм
0,1	50 мкм	0,02 нм
1	500 мкм	0,2 нм

манипулятора грубых перемещений) на 0,1 нм, что соизмеримо с точностью работы прибора. В табл. 2 приведены числовые значения результатов расчета влияния отклонения оси микроскопа от вертикали на перемещение иглы для разных значений амплитуд и частот колебания основания.

В табл. 3 приводятся числовые значения результатов расчета амплитуд возмущений для поступательных колебаний.

Для того чтобы рассчитать вклад поступательных колебаний, объединим табл. 1 и 3. Результат представлен в табл. 4.

Сравнивая табл. 2 и 3, находим, что:

- для всех частот вклад деформаций конструкции в колебания иглы больше вклада поступательных колебаний, причем для частот до 5 Гц — на порядок;
- высокочастотные колебания основания практически не гасятся конструкцией микроскопа;
- отклонение иглы более чем на несколько нанометров маловероятно, так как это возможно только при амплитуде колебаний порядка 0,1 мм.

Выводы

Результаты исследования влияния возмущений на точность движения иглы туннельного микроскопа позволяет сделать следующие выводы:

- туннельный микроскоп рассмотренной конструкции имеет достаточно высокую чувствительность к периодическим возмущениям основания с частотой от 0,5 до 5 Гц. Эти возмущения приводят к раскачиванию оси микроскопа и к смещению иглы вследствие изменения деформации, вызванных изменением вектора силы тяжести относительно манипулятора грубых перемещений.
- для того чтобы вызвать отклонение иглы существенно больше 1 нм, основание манипулятора должно совершать колебания в горизонтальной плоскости с амплитудой порядка 0,1 мм.

Микроскоп обладает высокой чувствительностью к высокочастотным колебаниям, которые практически не гасятся его конструкцией. Этот вывод существенен тем, что требуется обеспечить движение иглы с нанометровой точностью.

Список литературы

1. Kartashev V., Kotenkov A., Kuzkin V., Stepanov M. Problems of tunnel microscope controlling // Rep. on Int. Workshop on Micro Robot, Micro Machines and Micro Systems. IARP—2003. Proceed. Moscow, Russia, April 2003. P. 331—332.



3081 Zanker Road
San Jose, CA 95134
408/943-6900 Main
408/428-9600 Fax
semiHQ@semi.org
www.semi.org

Международная выставка оборудования, материалов и технологий полупроводниковой и смежных с ней отраслей промышленности SEMI® EXPO CIS 2005

"СЕМИ Экспо СНГ 2005"

26—28 сентября 2005 года, г. Москва

Параллельно с выставкой будут проведены:

- **26 сентября — Международный симпозиум по стратегии полупроводниковой промышленности (ISS Moscow).** Основные темы симпозиума: *инновации; инвестиции; области и возможности применения; разработка интегральных схем (Fabless).*

- **27 сентября — Международная маркетинговая конференция.**
- **27 и 28 сентября — Технический симпозиум.** Основные темы: *материалы, оборудование и технологии для полупроводниковой промышленности, плоскостных дисплеев, а также для солнечной и силовой электроники; семинары, касающиеся вопросов окружающей среды, безопасности, а также стандартов SEMI.*
- **28 сентября — Международная конференция по МЭМС/МСТ.**

С более подробной информацией о программе SEMI® EXPO CIS 2005 года (план выставки, заявка на выступление в техническом симпозиуме и др.) вы можете ознакомиться на интернет-странице SEMI по адресу www.semi.org/semiexpocis.

С вопросами можно обращаться по телефону **7 (095) 931-96-47**, факсу **7 (095) 931-96-48** или E-mail: semimoscow@semi.org.

УДК 678.747:621.317

А. Ф. Белянин¹, д-р техн. наук,
М. И. Самойлович¹, д-р физ.-мат. наук,
В. Д. Житковский¹, канд. техн. наук, П. В. Пашенко², канд. техн. наук,
М. А. Тимофеев², канд. физ.-мат. наук,
К. А. Ковальский³, канд. хим. наук,
С. М. Клешева¹, канд. геол.-мин. наук, В. В. Борисов²,
К. Ю. Петухов¹,

¹ Центральный научно-исследовательский технологический институт "Техномаш", г. Москва,

² Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, г. Москва,

³ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
e-mail: belyanin@technomash.ru

СЛОИСТЫЕ НЕНАКАЛИВАЕМЫЕ КАТОДЫ

Рассмотрены условия формирования, строение и функциональные свойства пленок алмаза и алмазоподобных материалов, используемых при изготовлении слоистых ненакаливаемых катодов. Показаны эксплуатационные характеристики слоистых структур, включающих наноструктурированные слои алмаза и алмазоподобных материалов в качестве ненакаливаемых катодов устройств эмиссионной электроники.

Введение

Перспективы применения плоских дисплеев, обладающих улучшенными характеристиками, связаны с разработкой ненакаливаемых эмиттеров на основе алмаза и алмазоподобных материалов (алмазоподобный углерод, AlN, SiC и др.), обладающих при определенных условиях свойством отрицательного электронного сродства (ОЭС) [1, 2]. Автоэмиссия определяется главным образом типом межатомных электронных связей материала и является характерным свойством для широкозонных полупроводников [3]. Наличие ОЭС на поверхности эмиттера означает возможность существенного снижения напряженности электрического поля, требуемого для возникновения полевой эмиссии электронов, от

характерных для металлов и полупроводников значений 10^3 – 10^4 В/мкм до 1–10 В/мкм [4]. Методы создания автоэмиссии для материалов ненакаливаемых катодов значительно усовершенствовались, поскольку было установлено, что при легировании материала катода, а также при использовании в качестве катода слоистых структур металл/диэлектрик или полупроводник/диэлектрик понижается порог эмиссии электронов [5, 6].

Целью настоящей работы являлось формирование и исследование многослойных структур, включающих слои алмаза и алмазоподобных материалов, а также создание на их основе ненакаливаемых катодов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

1. Получение и строение наноструктурированных пленок и слоистых структур, используемых при формировании ненакаливаемых катодов

Многочисленные исследования показали, что эмиссионные свойства алмазных пленок значительно улучшаются с увеличением их дефектности вплоть до формирования рентгеноаморфного материала. Для таких эмиттеров пороговые значения напряженности электрического поля, при котором наблюдается полевая эмиссия электронов, находятся в пределах от 2 до 20 В/мкм. Алмазные и алмазоподобные углеродные пленки (АУП) формировали плазменными методами, включающими дуговой и тлеющий разряды, распыление графитовой мишени ионным пучком, ВЧ и на постоянном токе магнетронное и диодное распыление, а также плазменными ВЧ и СВЧ разрядами, близкими к электронно-циклотронному резонансу (ЭЦР) [7, 8]. Кроме того, для синтеза пленок алмаза использовался метод нагретой нити.

Алмазоподобным углеродом принято называть структуры на основе углерода, близкие по некоторым свойствам к алмазу, но отличающиеся от алмаза тем, что данный тип упорядочения материала не соответствует кристаллографической группе Fd3m, а именно, он не обладает дальним порядком, присущим алмазу, и характеризуется значительной концентрацией кратных связей атомов углерода. Параметры процессов формирования углеродных пленок, содержащих алмаз и другие углеродные фазы, представлены в табл. 1.

Варьируя метод и параметры процесса осаждения, можно менять концентрацию поликристал-

Таблица 1

Параметры процессов осаждения и фазовый состав углеродных пленок

Метод	Рабочий газ	Давление газа, Па	Температура подложки, К	Скорость осаждения, мкм/ч	Состав пленки, об. %
Нагретая нить	1,5 об. % CH ₄ + H ₂	3 · 10 ³	800—1300	0,2—2	Алмаз (> 99 %)
Дуговой разряд	(1,5—4) об. % CH ₄ + H ₂	> 10 ³	873—1473	До 40	Алмаз (до ~ 99 %)
Тлеющий разряд	(1,5—4) об. % CH ₄ + H ₂	> 10 ³	800—1300	~ 6	АУП
Магнетронный разряд	Ar + H ₂ ; Ar + C ₂ H ₅ OH	ВЧ: 3,8—6 ПТ: 1,0—7,5	ВЧ: 393—573 ПТ: 473	ВЧ: 0,02—0,08 ПТ: 0,1—0,16	АУП
ВЧ разряд, близкий к ЭЦР	CH ₄	50	573—1073	~ 6	Алмаз, АУП, чаоит, карбин
Распыление графитовой мишени ионным пучком	Ar + H ₂ (10 : 1)	6,6 · 10 ⁻³	≤ 673	0,6	Алмаз (до 10 %), АУП, карбин
Диодный ВЧ разряд	C ₆ H ₁₂ + H ₂ (O ₂ , Ar)	~ 0,1—1	253—293	0,8—1	АУП, карбин (до 55 %)

Таблица 2

Условия осаждения пленок при формировании слоистых структур методом магнетронного распыления

Пленка	Материал мишени	Разряд	Состав газа	Давление газа, Па	Мощность разряда, Вт	Электрическое смещение на подложкодержателе, В	Температура подложки, К	Скорость осаждения, мкм/ч
AlN _{ам}	Al	ВЧ	Ar + 60 об. % N ₂	0,8	700	—50	473—573	0,4—0,5
AlN _{кр}	Al	ВЧ	Ar + 60 об. % N ₂	0,8	700	+45	473—573	1,0—1,3
AlN : Mo	Al + Mo (составная)	ВЧ	Ar + 60 об. % N ₂	0,6	600	30—40	293—573	1,0—1,4
MgO _x	Mg	ВЧ	Ar + 90 об. % O ₂	0,8	80	—	473	~ 0,1
ZnO	Zn	ВЧ	Ar + 50 об. % O ₂	0,8—1,2	200—350	20—40	373—573	0,7—1,2
ZnO : Cu	ZnO + Cu (составная)	ВЧ	Ar + 50 об. % O ₂	0,6	250	20—30	293—573	1,0—1,2
Al ₂ O ₃	Al	ВЧ	Ar + 50 об. % O ₂	0,8—1	700	50—60	423—573	0,8—1,0
Ti	Ti	ПТ	Ar	1—2	1000	—	373—573	1—2
Ni	Ni	ПТ	Ar	0,5—2	180—200	—	373—573	~ 1,5

лической алмазной фазы в пленках от 0 до > 99 об. % (рис. 1; рентгеновский дифрактометр ДРОН-2,0; спектрометры U-1000, S-3000 и T6400TA). Возможность изменения концентрации фаз, составляющих углеродную пленку, связано с тем, что при формиро-

вании пленок на основе углерода плазменными методами имеет место покластерное их формирование (в отличие от поатомарного или помолекулярного роста кристаллов) [9].

Для изменения порога эмиссии на ростовую поверхность

пленок алмаза и алмазоподобного углерода методом ВЧ магнетронного реактивного распыления наносили пленки AlN (кристаллические и аморфные — AlN_{кр} и AlN_{ам}); пленки AlN, легированные Mo (AlN : Mo); MgO_x, Al₂O₃, ZnO; ZnO : Cu. В ряде случаев для подведения напряжения к эмитирующим слоям магнетронным распылением на постоянном токе (ПТ) наносили слои Ni или Ti. Пленки формировали с использованием специально разработанной установки, оснащенной цельнометаллическими магнетронами [10]. Для введения в пленки легирующей примеси (Mo, Cu) применяли составные мишени, при этом подложки в процессе осаждения пленок диэлектриков были неподвижны. Оптимальные условия осаждения пленок металлов и алмазоподобных материалов при формировании слоистых структур приведены в табл. 2.

Осажденные пленки AlN_{кр},

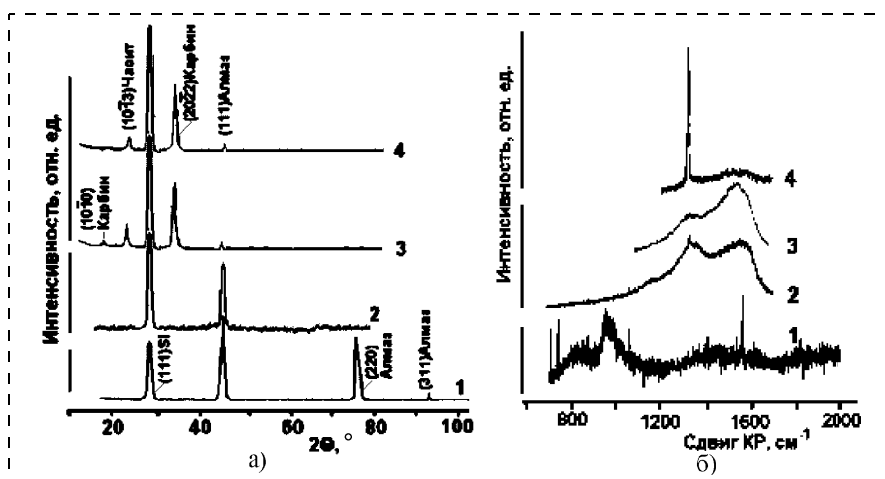


Рис. 1. Характеристики углеродных слоев, сформированных на подложках из Si:

а — рентгеновские дифрактограммы (CuKα-излучение); методы осаждения: 1 — дуговой разряд; 2 — распыление графитовой мишени ионным пучком; 3, 4 — ВЧ разряд, близкий к ЭЦР (3 — пленка легирована Zn); б — спектры комбинационного рассеяния света; методы осаждения: 1, 2 — распыление графитовой мишени ионным пучком; 3 — ВЧ разряд, близкий к ЭЦР; 4 — дуговой разряд и метод нагретой нити

AlN:Mo, MgO_x, ZnO, ZnO:Cu и Al₂O₃ содержали до 40 об. % кристаллической фазы, кристаллиты которой были аксиально текстурированы по $\langle 0001 \rangle$ у пленок AlN, ZnO и Al₂O₃ и по $\langle 111 \rangle$ у пленок MgO_x. Пленки Ni и Ti были рентгеноаморфны.

2. Применение наноструктурированных пленок в слоистых ненакаливаемых катодах

Планарные катоды

Ненакаливаемые катоды, содержащие слои алмаза и алмазоподобного углерода. Измерение эмиссионных характеристик планарных катодов на основе слоистых структур проводилось в импульсном режиме на специально разработанной вакуумной установке при давлении $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Для оценки числа эмиссионных центров использовался экран, включающий слоистую структуру InSnO_x/люминофор (ZnS · CdS : Cu, Al—As).

У структур типа Si/алмазная пленка, в которых пленку синтезировали методами нагретой нити или дугового разряда, эмиссия электронов не обнаружена. В результате того, что на сколе алмазной пленки напряженность поля в силу геометрии ячейки значительно больше, чем на поверхности, эмиссия была получена только со скола (рис. 2, а). Для оценки эмиссионных свойств поверх-

ности поликристаллического алмаза сколы были покрыты слоем изолирующего материала. Эмиссии обнаружено не было при полях ≤ 30 В/мкм. Дальнейшее увеличение напряженности поля приводило к пробоям в зазоре между катодом и анодом (слой InSnO_x).

Строение неэмитирующей ростовой поверхности пленки алмаза (стадия двойникования) представлено на рис. 2, б (растровый электронный микроскоп TESLA BS-350). Пленки алмаза, полученные методом нагретой нити, были поликристаллические, и их ростовая поверхность имела зернистое строение (видимый размер зерен ~ 10 мкм) с характерной для алмаза огранкой зерен по $\{100\}$ и $\{111\}$. При использованных в работе условиях фазообразования морфология поверхности пленок была неизменной при всех толщинах. На рентгеновских дифрактограммах таких пленок наблюдались отражения (111), (220) и (311) алмаза. Пленки алмаза были аксиально текстурированы по $\langle 111 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$. По измерению относительных интенсивностей пиков спектров комбинационного рассеяния света (КР) при 1332 см^{-1} и $\sim 1530 \text{ см}^{-1}$ показано, что степень кристалличности (содержание кристаллической фазы в объеме пленки) углеродных пленок, выращенных методом нагретой нити, составляет > 99 об. %. Поликристаллические алмазные

пленки имели развитую ростовую поверхность, шероховатость которой зависела от их толщины (перепад высот рельефа слоя толщиной 2—40 мкм составлял $R_z = 0,6 \div 2,8$ мкм). Зерна, наблюдаемые на сколах пленок алмаза, имеют пластинчатое строение независимо от стадий их формирования (рис. 2, в). Размер областей когерентного рассеяния (ОКР) рентгеновского излучения (ОКР) рентгеновского излучения алмазных пленок, рассчитанный по рентгенограммам, соответствовал толщине пластин, образующих зерна и наблюдаемых с использованием электронного микроскопа. Размер ОКР увеличивается от 20 до ~ 200 нм с ростом температуры подложки от 1100 до 1500 К. Эмиссия электронов со сколов алмазной пленки происходит только от границ пластин, формирующих зерна.

Для алмазных нанокристаллических пленок, сформированных на подложках Si распылением ионным пучком графитовой мишени, пороговая напряженность электрического поля в зазоре катод—анод, при которой наблюдалась автоэлектронная эмиссия, составила 30 В/мкм [11] (рис. 3, а). Плотность эмиссионного тока $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ А/см}^2$. Из экспериментальной эмиссионной характеристики рассчитана работа выхода ($\phi \approx 0,332 \text{ эВ}$) электронов в вакуум по теории Фаулера—Нордгейма, связывающей плотность тока электронной эмиссии j_0 с напря-

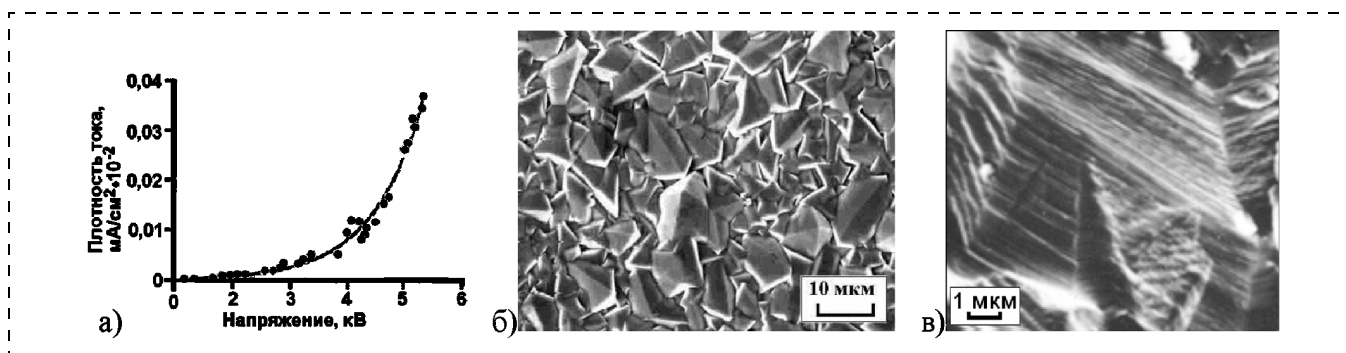


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика (а) слоистой структуры Si/алмаз (измерения ВАХ проводили при следующих условиях: зазор между анодом и катодом $\Delta = 200$ мкм, частота $f = 50$ Гц, длительность импульса $\tau = 20 \div 25$ мкс); электронно-микроскопические снимки поверхности (б) и скола (в) слоя алмаза толщиной 22,4 мкм, синтезированного методом нагретой нити

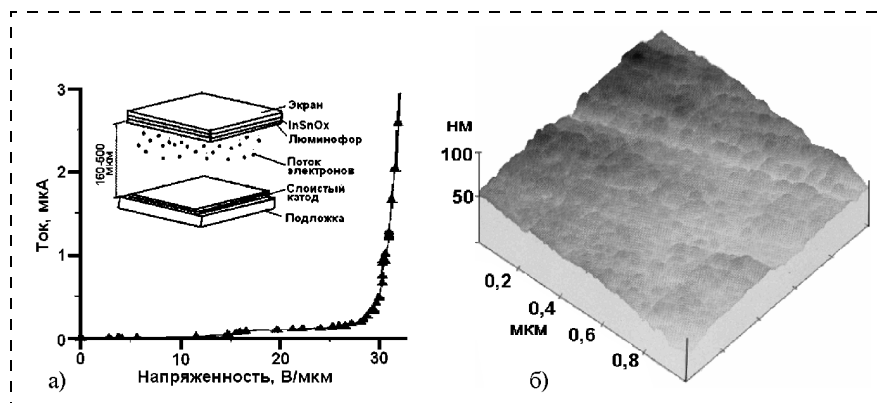


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика (а) слоистой структуры Si/АУП, в которой слой алмазоподобного углерода получен распылением графитовой мишени ионным пучком (условия измерений: $\Delta = 200$ мкм, $f = 50$ Гц, $\tau = 30$ мкс); атомно-силовая микроскопия эмитирующей поверхности слоя алмазоподобного углерода (б)

женностью электрического поля E выражением [12]

$$j_3 = 1,4 \cdot 10^{-6} (E^2/\varphi) \times \frac{4,39}{10^{1/2}} - 2,82 \cdot 10^{-7} \left(\frac{\varphi^{3/2}}{E} \right) \cdot 10$$

Пленки, сформированные распылением графитовой мишени ионным пучком, содержали до 10 об. % алмазной фазы. Ростовая поверхность углеродных пленок, сформированных распылением графитовой мишени, имеет глобулярное строение (рис. 3, б, микроскоп Nanoscope 3), при этом шероховатость ростовой поверхности АУП толщиной до 3 мкм составляла $R_z < 0,1$ мкм. При толщине пленки 50 нм поверхностный размер глобул составляет ~50 нм, а высота ~5 нм. Эмиссия с поверхности происходит по границам наноглобул, выявляемых атомно-силовой микроскопией. На спектрах КР пленок, полученных в широком диапазоне параметров одностадийного (осаждение пленки распылением графитовой мишени ионным пучком) и двухстадийного (осаждение пленки распылением графитовой мишени ионным пучком с последующей бомбардировкой сформированной пленки пучком электронов) процессов, имеются два пика — узкий при ~ 1330 см⁻¹, соответствующий алмазу, и широкий в области

~ 1580 см⁻¹, соответствующий некристаллической углеродной фазе (см. рис. 1, б). При определенных условиях воздействия электронного пучка в углеродных пленках происходила кристаллизация карбина. Управляя параметрами распыления и задавая условия обработки пленки ионным или электронным пучками, можно регулировать их состав и строение.

В случае алмазных пленок максимальный ток наблюдался из межкристаллитных границ. Последнее обстоятельство дает возможность утверждать, что плотность тока для поликристаллических алмазных пленок при прочих равных условиях будет в $\sim 10^5$ раз меньше по сравнению с АУП. Последнее связано с тем, что протяженность эмитирующих межкристаллитных границ у поликристаллической алмазной пленки с размером зерен ~ 10 мкм в $\sim 10^5$ раз меньше по сравнению с протяженностью границ наноглобул у пленки алмазоподобного углерода.

Было установлено, что лучшие эмиссионные характеристики проявляются при использовании АУП, сформированных методом тлеющего разряда. Пленки, полученные этим методом, были рентгеноаморфными (размер ОКР < 1 нм). С использованием электронной микроскопии

показано, что пленки имеют гладкую поверхность ($R_z \leq 0,05$ мкм). Для пленок, сформированных магнетронным распылением, методом плазменного ВЧ разряда, близкого к ЭЦР, а также в диодном ВЧ разряде, характерна слабая эмиссия. Пленки, формируемые магнетронным распылением, были рентгеноаморфны. Пленки, наиболее близкие по свойствам к алмазу, были получены в газовой смеси Ar + H₂ при концентрации Ar 5—20 об. %. Фазовый состав и строение кристаллических фаз, составляющих пленки, полученных в СВЧ разряде, близком к ЭЦР, определялись по рентгеновским дифрактограммам, полученным с пленок толщиной ~ 1 мкм. На дифрактограммах, снятых со всех пленок, наблюдались только дифракционные максимумы чаюита, β-карбина и алмаза (см. рис. 1, а). Отсутствие других отражений у всех полученных пленок обусловлено невысокой концентрацией кристаллических фаз в объеме пленки и текстурированием зерен кристаллических фаз. Измеренный размер ОКР кристаллических фаз, которые образуются в пленках, осаждаемых при температурах 400—600 К, равен 4,6—6,4 нм для алмаза, 7,3—12,3 нм — для чаюита и 9,9—13,7 нм — для β-карбина. При некоторых условиях получаются полностью рентгеноаморфные пленки (размер ОКР < 1 нм).

Пленки, полученные в диодном ВЧ разряде, были рентгеноаморфны, при этом относительная концентрация межатомных связей алмазного типа (sp^3) в полученных пленках по данным спектроскопии КР составляла 90 %. Рентгенофазовый анализ слоев алмазоподобного углерода, сформированных из газовой смеси, содержащей кислород, показал наличие в пленках карбина в концентрации 13—55 об. %.

Ненакаливаемые катоды, содержащие слой алмаза, алмазоподобного углерода и AlN. Исследова-

лись эмиссионные свойства слоистых структур Si/алмаз(АУП)/AlN, в которых углеродный слой синтезирован методами тлеющего разряда или нагретой нити. После осаждения пленки AlN толщиной ~10 нм на поверхность поликристаллического алмаза, синтезированного методом нагретой нити, с поверхности слоистой структуры алмаз/AlN была получена эмиссия (рис. 4). При этом число эмиссионных центров на поверхности подложки, подсчитанное по изображению на аноде, было $\sim 10^3 \text{ см}^{-2}$. Для пленок поликристаллического алмаза порог эмиссии составлял ~20 В/мкм, а при полях свыше 30 В/мкм происходили пробои в зазоре с исчезновением эмитирующих центров.

Улучшение эмиссионных свойств пленок на основе АУП, сформированных методом тлеющего разряда, достигалось за счет осаждения на эмитирующую по-

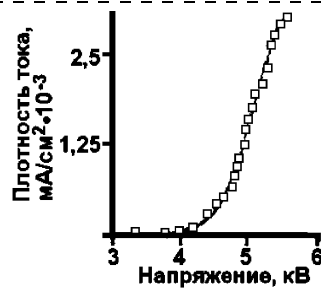


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика слоистой структуры Si/алмаз/AlN (условия измерений: $\Delta = 200 \text{ мкм}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $\tau = 20 \div 25 \text{ мкс}$)

верхность слоя AlN (слоистая структура Si/АУП/AlN). Было обнаружено возрастание крутизны ВАХ структуры Si/АУП/AlN при плотности тока $j > 5 \text{ мА/см}^2$ (рис. 5, а). Значение такого увеличения крутизны ВАХ находилось в пределах $2 \leq j \leq 7 \text{ мА/см}^2$, при этом уменьшение порога эмиссии по сравнению с ненакаливаемым катодом на основе Si/АУП не обнаружено. Установ-

ленная высокая крутизна характеристики дает возможность применить эти катоды для приборов с управляющим напряжением $\leq 200 \text{ В}$ при плотности тока $10 < j < 20 \text{ мА/см}^2$.

Морфология поверхности слоистой структуры Si/АУП/AlN, в которой AlN осажден на не имеющую огранку (рис. 5, б) пленку алмазоподобного углерода, приведена на рис. 5, в (растровый электронный микроскоп HITACHI S-405A). Пленка AlN имеет волокнистое (столбчатое) строение (рис. 6, а). Направление оси текстуры $\langle 0001 \rangle$ соответствует направлению волокон, образующих пленку. Пленки толщиной 10—30 нм образованы микрокристаллитами конической формы в виде пирамидок, основания которых имеют псевдогексагональную форму (рис. 6, б, просвечивающий электронный микроскоп JEM-200CX). Методом дифракционного контраста уста-

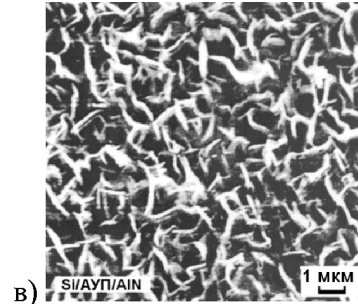
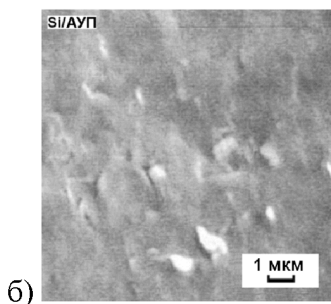
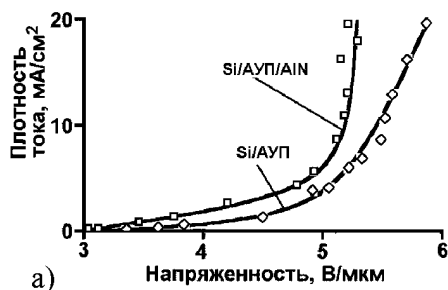


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики (а) слоистых структур Si/АУП и Si/АУП/AlN (условия измерений: $\Delta = 500 \text{ мкм}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $\tau = 20 \div 30 \text{ мкс}$); электронно-микроскопические снимки эмитирующих поверхностей слоистых структур Si/АУП (б) и Si/АУП/AlN (в), в которых слой алмазоподобного углерода синтезирован методом тлеющего разряда

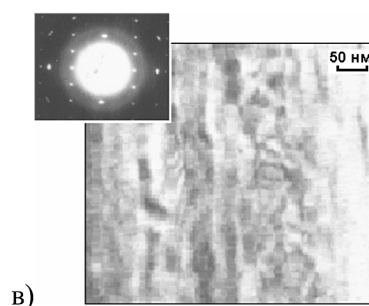
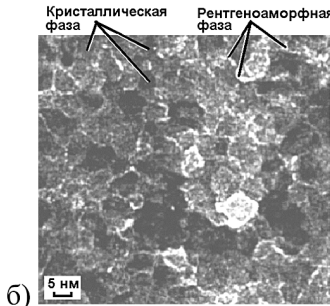
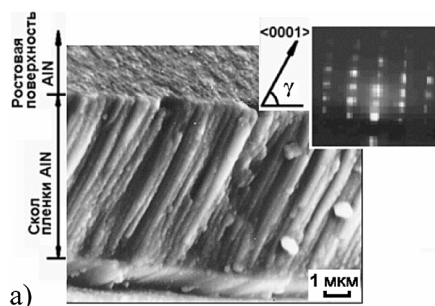


Рис. 6. Строение поверхности и скола пленок AlN, сформированных ВЧ-магнетронным распылением:

а — растровая электронная микроскопия (на вставке представлена электронограмма на отражение); б, в — просвечивающая электронная микроскопия (б — пленка толщиной 30 нм; в — строение отдельного волокна (кристаллическая фаза) пленки). На вставке представлена электронограмма на просвет

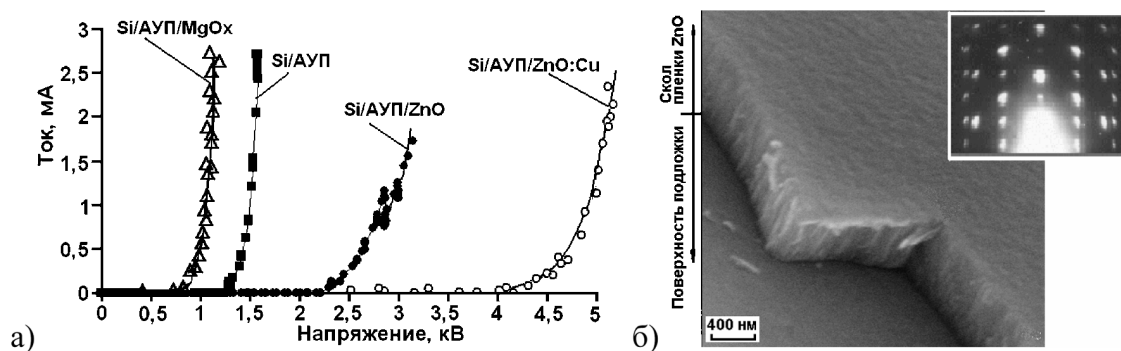


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики (а) слоистых структур Si/АУП, Si/АУП/MgO_x, Si/АУП/ZnO и Si/АУП/ZnO:Cu (условия измерений: $\Delta = 500$ мкм, $f = 50$ Гц, $\tau = 20\text{--}30$ мкс); строение поверхности и скола пленки ZnO (б); на вставке представлена электронограмма на отражение

новлено, что микрокристаллиты несовершенны, поскольку в них наблюдается значительное число плоскостных дефектов, в частности, возможны дефекты упаковки, двойники (рис. 6, в). Размер ОКР кристаллической фазы нелегированных пленок AlN составлял 30–60 нм, легированных — 20–50 нм. При работе со слоистыми структурами Si{100}/AlN было установлено, что у пленок AlN максимумы тока эмиссии соответствуют вершинам микрокристаллитов (волокон) пленки [13]. Легирование пленок AlN не приводит к снижению порога эмиссии. Измерения проводили на пленках AlN:Mo.

Ненакаливаемые катоды, содержащие слои алмаза, алмазоподобного углерода и оксидов. Исследовалась возможность создания планарных ненакаливаемых катодов на основе слоистой структуры, содержащей пленки оксидов: Si/АУП/MgO_x, Si/АУП/ZnO и Si/АУП/Al₂O₃. Слои MgO_x толщиной 10–20 нм (слоистая структура Si/АУП/MgO_x) позволили уменьшить порог эмиссии алмазоподобного углерода на ~30 %, тогда как слой ZnO (10–40 нм) порог эмиссии увеличивал (рис. 7, а). Синтезированные углеродные пленки имели толщину до 3 мкм ($R_z < 0,1$ мкм) и были рентгеноаморфны (размер ОКР < 1 нм). Степень кристалличности пленок MgO_x не превышала

20 об. %. Строение пленки ZnO показано на рис. 7, б (растровый электронный микроскоп CARL ZEISS LEO 1430 VP). Легирование пленок ZnO медью также не привело к улучшению эмиссионных свойств (рис. 7, а). С увеличением концентрации легирующей примеси степень кристалличности пленок ZnO уменьшается и при концентрации ~0,6 ат. % не превышает 20 об. %. Легирующая примесь (в виде отдельных атомов) наблюдается как в кристаллической, так и в рентгеноаморфной фазах, а также одновременно в виде включений металла и соответствующего оксида по границам волокон. При концентрации легирующей примеси > 5 ат. % формируются кристаллические оксиды и эмиссии электронов не происходит. Содержание и распределение между

фазами легирующих примесей контролировали методами инверсионной вольтамперометрии и микрорентгеноспектрального анализа. Планарные ненакаливаемые катоды на основе слоистой структуры Ti/АУП/MgO_x использовались для рентгеновских трубок.

По ВАХ слоистой структуры Si/АУП/Al₂O₃ было установлено, что порог эмиссии уменьшился с 2750 до 2530 В (рис. 8), что соответствует изменению поля на 0,5–0,7 В/мкм при зазоре 500 мкм; при этом число эмиссионных центров значительно уменьшилось по сравнению с углеродной пленкой без покрытия. При толщине пленки Al₂O₃ > 60 нм эмиссия с поверхности образца прекращалась.

Острые катоды

Острые ненакаливаемые катоды, формируемые методами литографии. Острые катоды представляют собой вытянутые в направлении к люминесцирующему материалу участки эмитирующей поверхности. Впервые эффект снижения порога эмиссии при нанесении на катод пленки диэлектрического материала был установлен у острых катодов из Si (нитевидных кристаллов высотой ~100 мкм с радиусом кривизны при вершине < 25 нм, сформированных мето-

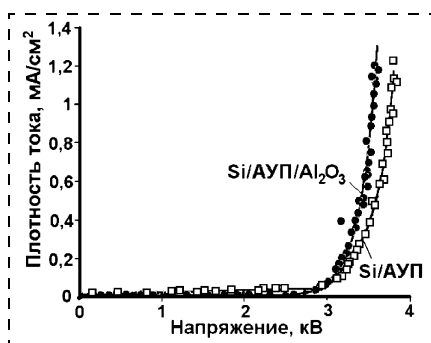


Рис. 8. Вольт-амперные характеристики слоистых структур Si/АУП и Si/АУП/Al₂O₃ (условия измерений: $\Delta = 500$ мкм, $f = 50$ Гц, $\tau = 30$ мкс)

дом "пар—жидкость—кристалл") с покрытием из AlN толщиной 0,1–2 мкм [6, 14] (рис. 9). Измерение автоэмиссии острых катодов проводилось в вакуумной камере при давлении $1,33 \cdot 10^{-6}$ Па.

Острые ненакаливаемые катоды на основе опаловых матриц.

Применяемые для формирования центров эмиссии (острий) литографические методы ограничивают достижение высокой плотности острий на поверхности большой площади. В настоящей работе увеличение плотности центров эмиссии (до $\sim 2,5 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$) на площади $> 400 \text{ см}^2$ ($> 200 \times 200 \text{ мм}$) достигалось за счет использования опаловых матриц (ОМ), сформированных на подложках (до 10 слоев) [15]. В настоящей работе использовались слоистые структуры, включающие слой ОМ, а также AlN, ZnO, АУП и пленки металлов: ОМ/Ni/АУП, ОМ/Ni/АУП/AlN, ОМ/Ti/АУП и др. Процесс формирования ОМ (кубическая упаковка наносфер SiO₂ с размерами сфер от 200 до 400 нм) проводился с использованием специального технологического оборудования [16]. Применялся способ получения сферических частиц аморфного SiO₂, основанный на реакции гидролиза тетраэфира ортокремниевой кислоты (тетраэтаксисилан Si(OC₂H₅)₄) в этаноле (C₂H₅OH) в присутствии гидроксида аммония (NH₄OH). Строение поверхности сформированных на Si-подложке правильных упаковок наносфер SiO₂ представлено на рис. 10.

Изготовленные ненакаливаемые катоды представляли подложку из Si с последовательно нанесенными на нее наноструктурами из 5–10 слоев правильных кубических упаковок SiO₂ и слоистой структурой Ni(Ti) + слои эмитирующих материалов. Используемые методы (тлеющий и СВЧ разряды [17]) позволили сформировать при низких температурах ($< 750 \text{ К}$) рентгеноаморфные

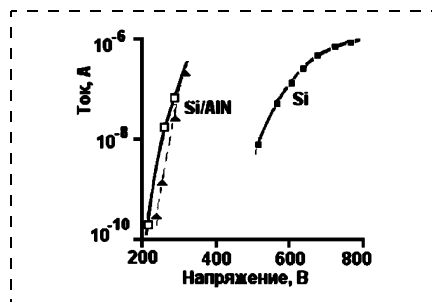


Рис. 9. Вольт-амперные характеристики острых ненакаливаемых катодов из Si и Si/AlN ($\Delta \approx 200 \text{ мкм}$)

сплошные пленки АУП толщиной до $\sim 2,5 \text{ мкм}$ (концентрация алмазной фазы $< 3 \text{ об. } \%$), что обеспечивает сохранность строения опаловой матрицы и эмиссионных свойств углеродной пленки.

Изменение конфигурации (заострение) сфер SiO₂, лежащих на поверхности, проводили нанесением на них слоев эмитирующего материала (алмазоподобный углерод, AlN), при этом могут быть использованы пассивные слои из

металла или диэлектрика, на которые наносят эмитирующий слой. При использовании методов распыления эффект заострения связан с изменением скоростей (V) формирования участков пленки, расположенных под различными углами (α) относительно источника распыления (рис. 11, а). В зависимости от толщины осажденного слоя меняется форма поверхности, получаемой при заострении сферы SiO₂ (рис. 11, б). При различных условиях осаждения пленок меняется скорость осаждения, но при этом вид кривых $V(\alpha)$ не изменяется. Наличие нескольких перегибов на зависимости $V(\alpha)$ AlN связано с тем, что в пленке высокая концентрация кристаллической фазы (рис. 11, а), в то время как пленки Ti — рентгеноаморфны. Ti и Ni имеют одинаковый вид зависимости $V(\alpha)$.

Измерение эмиссионных характеристик катодов на основе опаловых матриц с нанесенными

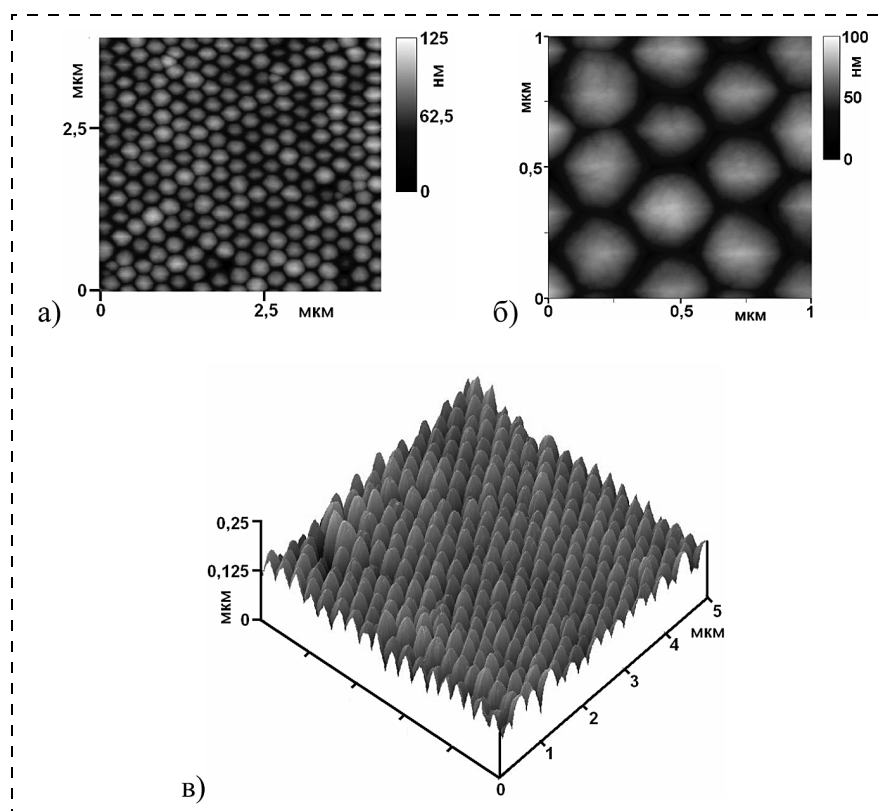


Рис. 10. Атомно-силовая микроскопия поверхности опаловых матриц:

а, б — снимки сделаны по нормали к поверхности; в — снимок сделан под углом 45° к поверхности

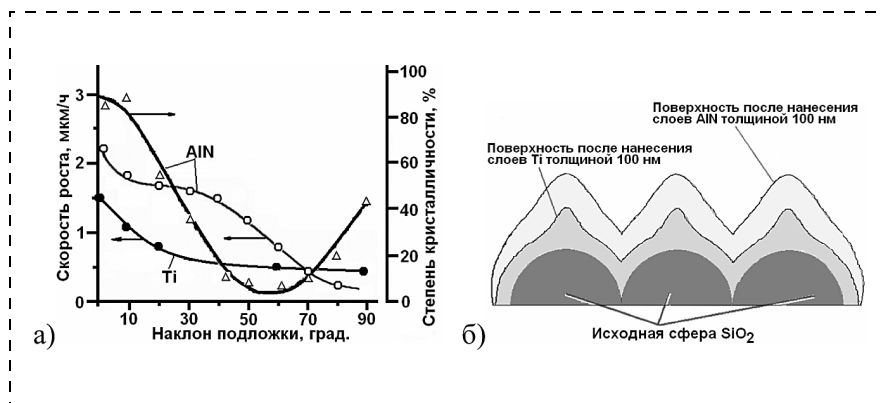


Рис. 11. Влияние угла наклона подложки к поверхности мишени на скорость осаждения пленок AlN и Ti (а); изменение конфигурации поверхности наносфер SiO₂ опаловой матрицы после последовательного нанесения слоев Ti и AlN (б)

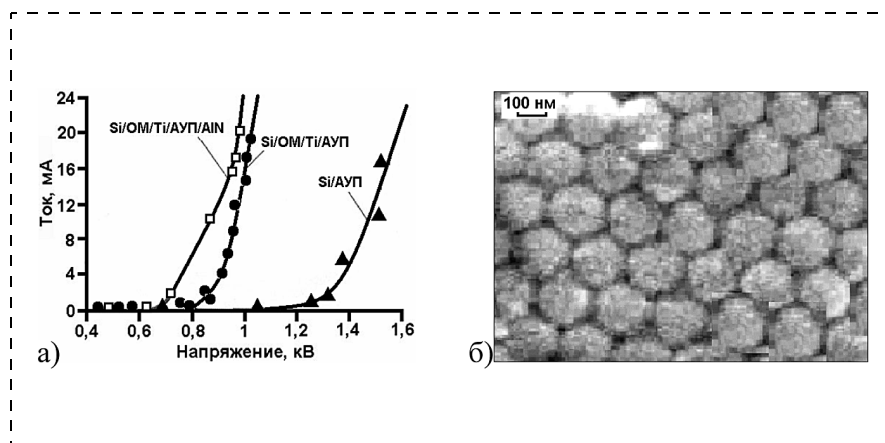


Рис. 12. Вольт-амперные характеристики (а) слоистых структур Si/AУП, Si/OM/Ti/AУП и Si/OM/Ti/AУП/AlN (условия измерений: $\Delta = 160 \div 200$ мкм, $f = 50$ Гц, $\tau = 20 \div 25$ мкс); строение поверхности верхнего слоя опаловой матрицы после осаждения эмитирующего материала (б) методами магнетронного распыления и СВЧ-разряда двухслойной структуры: слой Ti (толщина 0,1 мкм) и АУП (0,3 мкм)

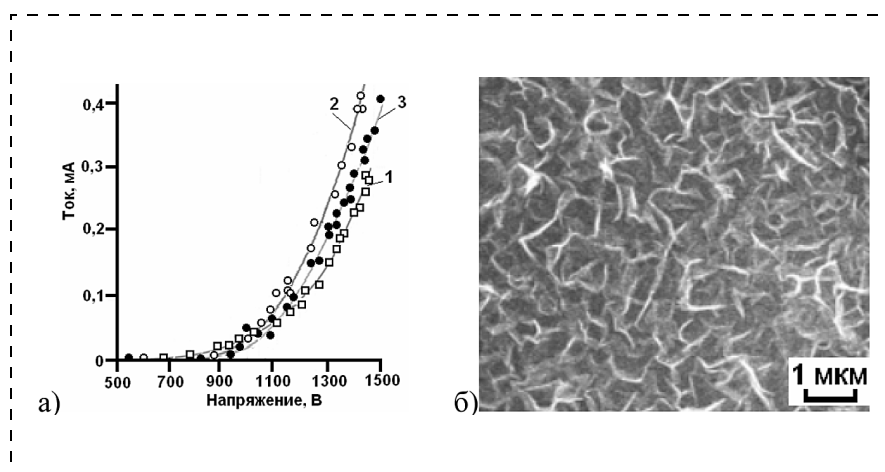


Рис. 13. Вольт-амперные характеристики (а) структуры Si/OM/Ni/AУП; толщина слоя алмазоподобного углерода: 1 — 0,7 мкм; 2 — 1,4 мкм; 3 — 2 мкм (условия измерений: $\Delta = 200$ мкм, $f = 50$ Гц, $\tau = 20 \div 25$ мкс); строение поверхности верхнего слоя опаловой матрицы после осаждения (б) методами магнетронного распыления и тлеющего разряда двухслойной структуры: слой Ni (0,3 мкм) и АУП (0,7 мкм)

на их поверхность слоями металл/АУП или металл/АУП/диэлектрик проводилось в импульсном и постоянном режимах. Были исследованы эмиссионные характеристики ненакаливаемых катодов, включающих слой кубических упаковок наносфер SiO₂ диаметром 200 ± 10 нм. На рис. 12, а показаны ВАХ структур Si/АУП, Si/OM/Ti/АУП и Si/OM/Ti/АУП/AlN, в которых слой алмазоподобного углерода получен методом тлеющего разряда. При этом расстояние между соседними остриями (центрами эмиссии) их правильных рядов равнялось диаметру наносфер SiO₂ и составляло ~ 200 нм (рис. 12, б).

На рис. 13, а представлены ВАХ структуры Si/OM/Ni/АУП (морфология эмитирующей поверхности слоя алмазоподобного углерода приведена на рис. 13, б), в которой АУП различной толщины сформированы методом тлеющего разряда, а на рис. 14 представлены ВАХ структуры Si/OM/наноалмаз/АУП, в которой АУП толщиной 0,7 мкм формировали методом тлеющего разряда. Кривая 2 получена при измерении в импульсном режиме после снятия ВАХ в постоянном режиме (кривая 3). Нанесение на поверхность опаловой матрицы частиц наноалмаза (максималь-

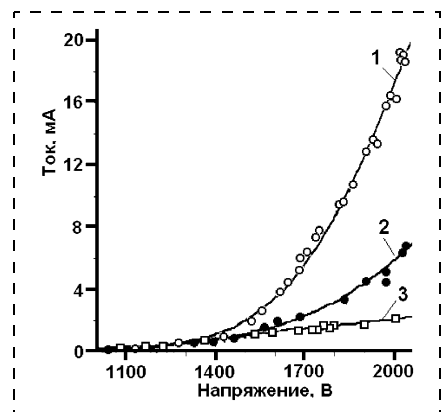


Рис. 14. Вольт-амперная характеристика структуры Si/OM/наноалмаз/АУП. Измерения ВАХ проводили при $\Delta = 200$ мкм, в импульсном режиме (кривые 1, 2; условия измерений: $f = 50$ Гц, $\tau = 30$ мкс) и постоянном (кривая 3) режимах

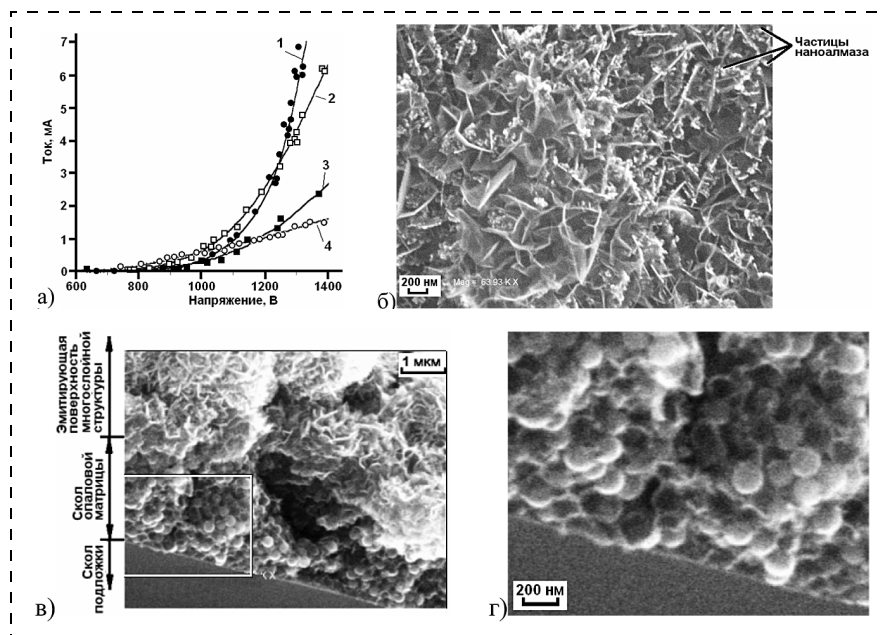


Рис. 15. Вольт-амперные характеристики (а) структуры Si/OM/нанодиамаз/АУП. Измерения ВАХ проводили при $\Delta = 200$ мкм, в импульсном режиме (кривые 1–3; условия измерений: $f = 50$ Гц, $\tau = 30$ мкс) и постоянном (кривая 4) режимах; б–г – растровая электронная микроскопия слоистой структуры Si/OM/нанодиамаз/АУП (б – поверхности; в, г – поперечного скола; г – увеличенный выделенный фрагмент скола, представленного на рис. 15, в)

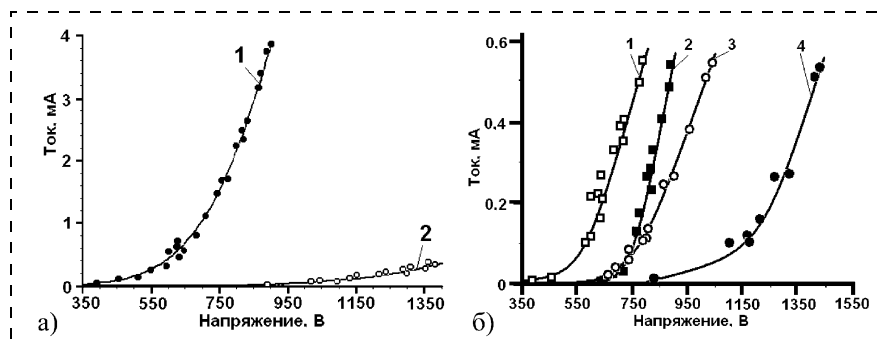


Рис. 16. Вольт-амперные характеристики структуры Si/OM/нанодиамаз/Ni/АУП (а) (толщина слоя АУП: 1 – 0,7 мкм, 2 – 1,4 мкм). Условия измерений: $\Delta = 200$ мкм, $f = 50$ Гц, $\tau = 30$ мкс; вольт-амперные характеристики структуры Si/OM/нанодиамаз/Ni/АУП (б) (кривые 1, 2) и Si/OM/Ni/АУП (кривые 3, 4). Толщина слоя АУП: 1, 3 – 0,7 мкм, 2, 4 – 1,4 мкм. Условия измерений: $\Delta = 200$ мкм, $f = 50$ Гц, $\tau = 30$ мкс

ный размер < 5 нм) проводили из спиртовой суспензии центрифугированием. Наночастицы алмаза размещались по тетраэдрическому пустотам, возникающим в плотнейшей кубической упаковке наносфер SiO_2 (плотность пустот на поверхности ОМ составляет $\sim 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$).

Были исследованы слоистые структуры типа Si/OM/нанодиамаз/АУП с двух- и трехкратным увеличением концентрации ал-

мазных наночастиц (морфология эмитирующей поверхности приведена на рис. 15, б, а строение скола катода – на рис. 15, в, г), ВАХ которых представлены на рис. 15, а. Кривая 2 получена при измерении в импульсном режиме после снятия ВАХ в постоянном режиме (кривая 4). Кривая 3 получена при измерении в импульсном режиме после снятия ВАХ в постоянном режиме с максимальной нагрузкой.

В случае нанесения Ni (50 нм) на поверхность опаловой матрицы со слоем частиц нанодиамаза эmissiveонные свойства резко зависели от толщины эмитирующего слоя алмазоподобного углерода (рис. 16, а). На рис. 16, б представлены ВАХ структур Si/OM/нанодиамаз/Ni/АУП (кривые 1, 2) и Si/OM/Ni/АУП (кривые 3, 4).

Заклучение

Разработаны специальное технологическое оборудование и процессы, позволяющие формировать рентгеноаморфные и выращивать при низких температурах (< 600 К) на неориентирующих подложках пленки различных материалов с заданными концентрацией и строением нанокристаллической фазы; изготавливать многослойные структуры с заданными функциональными характеристиками, необходимыми для создания устройств эмиссионной электроники с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Выражаем признательность специалистам Института им. Фраунгофера (Йена, Германия) за проведение атомно-силовой микроскопии опаловых матриц.

Список литературы

1. Himpel F. J., Knapp J. A., Van Vechten J. A., Eastman D. E. Quantum photoyield of diamond (111) – a stable negative-affinity emitter // Phys. Rev. 1979. V. B20. P. 624–627.
2. Benjamin M. C., Wang C., Davis R. F., Nemanish R. J. Observation of a negative electron affinity for heteroepitaxial AlN on a-(6H)-SiC(0001) // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. № 24. P. 3288–3290.
3. Eimori N., Mori Y., Hatta A. et al. Photoyield measurements of CVD diamond // Diamond and Related Materials. 1995. № 4. P. 806–808.
4. Armatunga G. A. J., Silva S. P. R. Nitrogen containing hydrogenated amorphous carbon for thin-film field emission cathode // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. P. 2529–2531.
5. Елинсон М. И., Кудинцева Г. А., Кулопин Ю. А. и др. Ненакаливаемые катоды. М.: Советское радио. 1974. 336 с.

6. Spitsyn B. V., Zhirnov V. V., Blaut-Blachev A. N. et al. Field emitters based on Si tips with AlN coating // *Diamond and Related Materials*. 1998. № 7. P. 692—694.

7. Белянин А. Ф., Самойлович М. И., Семенов А. П. Пленки алмаза и алмазоподобных материалов: формирование, строение и применение в электронике // *Материалы, оборудование и технологии нанoeлектроники и микрофотоники*. 2003. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН. С. 77—180.

8. Belyanin A. F., Samoylovich M. I. Nanostructured carbon materials in thin film technology // *Nanostructured thin films and nanodispersion strengthened coatings*. Series: NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. 2004. V. 155. E-book. P. 77—90.

9. Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Житковский В. Д., Багдасарян А. С. Наноструктурные углеродные материа-

лы в тонкопленочной технологии // *Инженерная физика*. 2004. № 1. С. 33—39.

10. Белянин А. Ф., Пашенко П. В., Борисов В. В. и др. Техника формирования многослойных ненакаливаемых катодов // *Системы и средства связи, телевидения и радиовещания*. 2002. № 1, 2. С. 64—67.

11. Семенов А. П., Белянин А. Ф., Семенова И. А. и др. Тонкие пленки углерода. II. Строение и свойства // *Журнал технической физики*. 2004. Т. 74. Вып. 5. С. 101—104.

12. Месяц Г. А. Эктоны. Ч. 1. Екатеринбург: Наука. 1993. 184 с.

13. Белянин А. Ф., Пашенко П. В., Солдатов Е. С. и др. Исследование автоэмиссионных свойств сильнолегированных пленок AlN // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники*. 1998. Вып. 6(7), 7(8). С. 235—236.

14. Belyanin A. F., Bouilov L. L., Zhirnov V. V. et al. Application of aluminum

nitride films for electronic devices // *Diamond and Related Materials*. 1999. V. 8. P. 369—372.

15. Самойлович М. И., Клещева С. М., Белянин А. Ф. и др. Трехмерные наноконпозиты на основе упорядоченных упаковок наносфер кремнезема. Ч. 1—3 // *Микросистемная техника*. 2004. № 6—8.

16. Клещева С. М., Житковский В. Д., Белянин А. Ф. и др. Фотонные кристаллы (материалы с запрещенной фотонной зоной) на основе правильных кубических упаковок наносфер SiO₂ // *Технологии приборостроения*. 2004. № 2 (10). С. 32—36.

17. Polushkin V. M., Polyakov S. N., Rakhimov A. T. et al. Diamond film deposition by downstream DC glow discharge plasma chemical vapor deposition // *Diamond and Related Materials*. 1994. V. 3. P. 531—533.

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

"Невидимое сделать видимым"

На Всемирной выставке EXPO—2005 в Японии представлен совместный проект Агентства по науке и инновациям и компании NT-MDT

15 апреля 2005 г. Российский космонавт Сергей Крикалев доставил на Международную космическую станцию небольшой прозрачный кристалл с запаянной внутри кремниевой пластиной с изображением Моны Лизы. Размер этого изображения 8 × 8 мкм, и сделано оно методом нанолитографии с помощью оборудования, разработанного компанией NT-MDT (Зондовая нанолaborатория NTEGRA, материал — окись титана на кремниевой подложке). Увидеть это изображение можно только с помощью сканирующего зондового микроскопа. В таком виде "Мона Лиза" представляет совместный проект Агентства по науке и инновациям и компании NT-MDT, названный "Невидимое сделать видимым" и осуществленный худож-

ником Георгием Пузенковым. Проект посвящен нанотехнологиям — самой передовой сегодня области науки. Космонавты собираются выпустить мини - "Мону Лизу" в открытый космос.

Сама же картина "Single Mona Liza 1:1", известного художника-постмодерниста Георгия Пузенкова, послужившая прообразом микроизображения, отправлена на Международную космическую станцию с итальянским космонавтом Роберто Виттори, в ознаменование 500-летия известного творения великого мастера эпохи Возрождения Леонардо Да Винчи "Мона Лиза". Творчество художника Георгия Пузенкова построено на осмыслении великого культурного наследия прошлого в связи с возможностями, которые дают нам современные технологии.

Кроме того, на всемирной выставке EXPO—2005, проходящей с марта по сентябрь 2005 года в Айти (Япония), в которой участвуют более 120 стран мира, символами российской экспозиции стали скелет мамонта, муляж мамонтенка

Димы и "Мона Лиза" Георгия Пузенкова. Компания NT-MDT, представляя Россию на выставке, с успехом демонстрирует свое оборудование, в том числе зондовую нанолaborаторию NTEGRA, и конечно, совместный проект с Георгием Пузенковым.

Что будет, если надавить на нанотрубку?

Компактные и сверхбыстрые компьютеры, пуленепробиваемые футболки, космический лифт, роботы размером с клетку и меньше — все это обещают человечеству нанотехнологии, где будут использоваться в качестве основного материала углеродные нанотрубки.

Однако все эти чудеса невозможны без предварительных исследований наномира и нанобъектов. Поэтому ученые сегодня сосредоточились на детальном изучении свойств нанотрубок в наноразмерном диапазоне. Други-

ми словами — без науки о наноразмерном диапазоне не было бы и нанотехнологий.

В новом исследовании ученые из университета Джорджии, США, и их коллеги из исследовательского центра Уотсона IBM, установили, что несмотря на довольно большую жесткость углеродных нанотрубок, если их тянуть с обоих концов, они легко деформируются при надавливании посередине. Чем больше радиус нанотрубки, тем больше они прогибаются под надавливающим зондом. Это важное для нанoeлектронных разработок заключение исследователи опубликовали в майском выпуске журнала *Physical Review Letters*.

"Мы уже хорошо знаем, что в осевом направлении нанотрубки чрезвычайно жесткие. Однако мы никак не могли проверить их радиальную жесткость из-за малых размеров этих нанообъектов. Как только мы пытались надавить на нанотрубку зондом, она соскальзывала и отодвигалась в сторону. Но теперь мы все-таки установили, что в радиальном направлении нанотрубки довольно эластичны", — комментирует Элиза Райдо, профессор физики из университета Джорджии (рис. 1).

Чтобы надавить на нанотрубку, ученые воспользовались зондом атомно-силового микроскопа (АСМ) с радиусом рабочей части 35 нм. Они проделали серию нажимов на нее с разной силой для того, чтобы измерить эластичность нанотрубки.

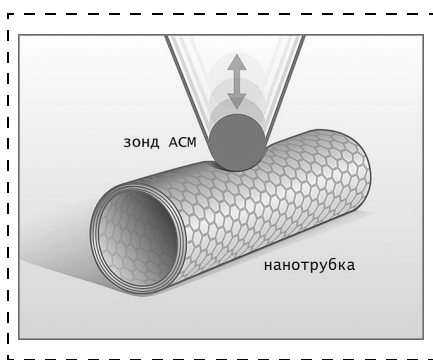


Рис. 1. Используя АСМ, исследователи надавили на середину нанотрубки, чтобы узнать, как она себя поведет

"Серией слабых надавливаний мы смогли измерить радиальную эластичность однослойной и многослойной углеродной нанотрубки. Также мы экспериментировали с нанотрубками разных радиусов и установили, что нанотрубки меньшего радиуса намного жестче в радиальном направлении, чем те же с большим радиусом", — сказала Райдо.

Элиза Райдо и ее коллеги начали серию исследований с однослойной нанотрубки радиусом 0,2 нм и потихоньку добрались до нанотрубок радиусом в 12 нм. Всего ученые измерили радиальную эластичность 39 нанотрубок. "Затем мы повторили те же измерения с многослойными нанотрубками. Наши исследования показали, что многослойные нанотрубки с малым внутренним радиусом жестче, чем такие же с большим внутренним радиусом", — продолжает Райдо. Однако для многослойных нанотрубок с большими радиусами эластичность объекта в целом — постоянная величина. Это значит, что ослабление радиальной жесткости нанотрубки происходит с увеличением жесткости из-за отдельных слоев.

Понимание того, почему нанотрубки имеют различную жесткость из-за радиуса и числа слоев, а также анализ радиальной и осевой жесткости помогут ученым в дальнейших исследованиях в области нанопроводников и нанoeлектронных устройств. Как недавно доказали исследователи из Калифорнийского университета, транзисторы на основе нанотрубок могут работать гораздо быстрее обычных полупроводниковых ключей.

Дальнейшая цель Райдо — измерение эластичных свойств нанотрубки с постоянным внешним радиусом и изменяющимся числом слоев, и наоборот. Так ученые узнают, как число и радиус слоев влияют на эластичность нанотрубки в целом.

Источник: The Georgia Institute of Technology: Like the Famous Doughboy, Nanotubes Give When Poked (<http://www.gatech.edu/news-room/release.php?id=565>)

Первый цветной дисплей на нанотрубках от компании Motorola

Дисплеи на нанотрубках и OLED-технологиях достаточно близко подошли к выходу на мировой рынок. И недавно это еще раз подтвердила компания Motorola.

На этот раз был создан плоский цветной дисплей на основе нанотрубок. Использование нанотрубок позволит создать плоско-панельные дисплеи, имеющие длительный срок службы, обеспечивающие высокое качество и при этом стоящие значительно дешевле, чем те, которые мы имеем сегодня (плазменные и жидкокристаллические).

Продемонстрированный прототип оптимизирован для требований телевидения высокой четкости. Как ни странно, но это работоспособный дисплей, а не мини-экран для мобильного телефона. Он представляет собой 5-дюймовый фрагмент 42-дюймовой панели разрешением 1280 × 720 пикселей. Толщина панели — около 3 мм. Для отображения цвета использованы привычные по телевизионным кинескопам люминофоры, что обеспечивает яркие и естественные цвета. По скорости отклика, углу обзора, диапазону рабочих температур прототип не уступает дисплеям на базе электронно-лучевых трубок. И это дает преимущество дисплеям на нанотрубках перед обычными плазменными и жидкокристаллическими.

Суть технологии сводится к "выращиванию" нанотрубок непосредственно на стеклянной подложке, связывая их с ней с помощью органической пасты, которая позволяет достичь более мощной эмиссии электронов из нанотрубок.

Как вы знаете, нанотрубки — дорогой товар. Сегодня грамм чистых нанотрубок стоит около 60 долл. Как утверждают специалисты, в будущем нанотрубки могут серьезно подешеветь, что положительно скажется на цене будущих NED-дисплеев. Так, маркетологи из Motorola назвали свой продукт — Nano Emissive Display (NED), т. е. дис-

плей с эмиссией электронов из нанотрубок.

Продemonстрированный в рамках презентации образец NED-дисплея имеет диагональ пять дюймов и представляет собой фрагмент 42-дюймовой HDTV-панели с разрешением 1280 × 720 пикселей и соотношением сторон 16:9. Толщина прототипа составляет всего 3,3 мм.

"Наша компания имеет 15-летний опыт работы с нанотрубками, и у нас есть около 160 патентов, касающихся только NED-технологии. Кроме того, у нас есть работоспособные образцы. Вот почему мы надеемся на скорое появление на рынке дисплеев нового претендента в лидеры", — так сказал Джим О'Коннор, вице-президент компании.

Предполагается, что применение новой технологии производства плоскпанельных дисплеев позволит увеличить их срок службы и одновременно снизить себестоимость. По оценкам аналитиков фирмы DisplaySearch, изготовление устройства с диагональю 40 дюймов по методике *Nano Emissive Display* обойдется производителям примерно в 400 долл. США. Впрочем, о сроках практического использования предложенной технологии специалисты *Motorola* пока умалчивают. Ожидалось, что более подробная информация о методике NED будет обнародована в 22–27 мая на выставке *Society for Information Display International Symposium, Seminar and Exhibition* в Бостоне.

Источник: Motorola. Motorola Labs Debuts First Ever Nano Emissive Flat Screen Display Prototype (http://www.motorola.com/mediacenter/news/detail/0,,5484_5474_23,00.html)

Наноструктуры по шаблону

Исследователи из Политехнического института Ренсслеера создали керамические шаблоны, на которых удалось вырастить ветвящиеся нанотрубки с ранее заданной конфигурацией ответвлений. При этом нанотрубки могут ветвиться иерархически, создавая не-

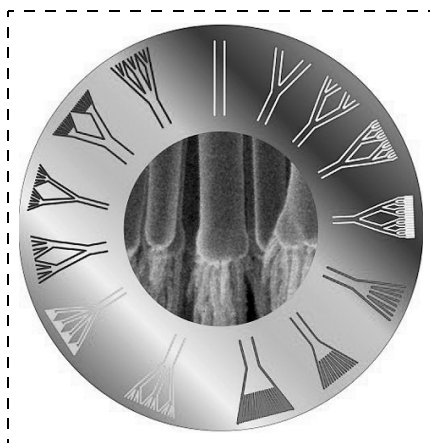


Рис. 2. Шаблоны и полученные наносистемы на основе нанотрубок

сколько разветвляющихся пучков. Ученым удалось вырастить таким образом не только нанотрубки, но и металлические нанопроводники. В качестве основы для шаблона исследователи использовали подложку из анодированного оксида алюминия, (рис. 2). "Наше управление ростом и ветвлением нанотрубок очевидно. Достаточно взглянуть на СТМ фотографии", — говорит Паликель Аджаян, один из исследователей. — "Морфология полученных нанотрубок схожа с морфологией дендромеров, поэтому трудно представить, что синтез этого нанодерева произошел по заданной заранее программе".

Аджаян, Гуовен Менг и их коллеги сделали подложки из алюминия методом анодирования, в процессе которого они изменяли напряжение. Другие исследователи создали углубления на подложке в виде символа Y, еще раз изменив напряжение анодирования. Проведя эту операцию 4 раза, ученые получили массив вытравленных на подложке Y-веток. При этом ученым удалось получить до 16 разветвлений на матрице-подложке. Комбинируя разветвления и простые Y-углубления, команда получила массу различных разветвляющихся "шаблонов", размер которых исчисляется десятками нанометров.

Для того, чтобы привязать углеродные наноструктуры к этим шаблонам, ученые синтезировали их непосредственно в углублениях, проведя реакцию пиролиза ацети-

лена. Затем ученые удалили слой оксида алюминия путем травления, открыв полученные углеродные нанотрубки различной формы.

В другом эксперименте Гуовен и коллеги вырастили внутри подложки-матрицы нанопроводники из никеля. "Так как мы разработали общий принцип производства наноструктур по определенному шаблону, то теперь станет легко изготавливать металлические, полупроводниковые, полимерные, углеродные наносистемы", — говорит Аджаян. Также исследователи уверены, что смогут создать гетероструктуры различной формы на основе нанотрубок. При этом такая наносистема может состоять из трех и более компонентов. "Конечно, одна из областей практического применения нашего открытия состоит в создании микрoeлектронных схем на основе новых гетероструктур. Это и сенсоры, детектирующие отдельные молекулы, и нанопроводники, обеспечивающие перенос сигнала от нанок микромасштабу, и как ни странно, системы доставки лекарств", — заключает Аджаян. — "Но безусловно помимо этого наше открытие позволит создавать заранее спроектированные наноструктуры со сложной архитектурой. Это очень важно для развития нанотехнологий и наноинструментария".

Источник: Nanotechweb. Nanostructures branch out with templates (<http://www.nanotechweb.org/articles/news/4/5/3/1>)

Молекулярные машины вращают ДНК вдоль оси

Нидерландские исследователи детально изучили механизм высвобождения вращающего момента, присутствующего в молекуле ДНК на молекулярном уровне, который активируется энзимом топоизомеразой IB. В качестве иллюстрации своей работы учеными была составлена математическая модель взаимодействия молекулы ДНК с энзимом и на ее основе выполнена компьютерная анимация, показывающая вращение молекулы вокруг своей оси.

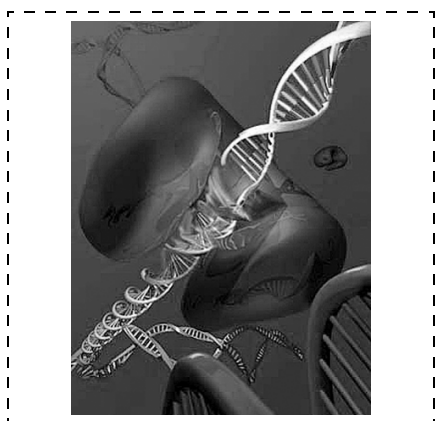


Рис. 3. Энзим разрезает ДНК, освобождая торсионный механический момент, который вращает молекулу (кадр из анимации)

Результаты своей работы ученые опубликовали в выпуске журнала *Nature* от 31 марта 2005 г. Там же был представлен ряд рисунков из компьютерной анимации, поясняющей, как работает энзим (рис. 3).

Как известно, молекула ДНК состоит из двух цепей, связанных между собой базами-основаниями. И эти цепи свернуты в двойную спираль. Образно говоря, молекула представляет собой веревочную лестницу, скрученную по оси, перпендикулярной ступеням. Как выяснили исследователи, в таком положении ДНК аккумулирует механический момент. Похожие системы, созданные человеком, называются торсионными. Они широко используются в машинах и механизмах, где нужно аккумулировать механический момент.

В процессе деления клетки энзимы разрезают ДНК таким образом, чтобы освободившиеся последовательности можно было скопировать. Это необходимо при делении клетки. Энзимы представляют собой молекулярные машины с множеством функций, созданные природой. Однако для функционирования клетки необходимо, чтобы молекула осталась неповрежденной. Поэтому существует сложный механизм разворачивания цепи ДНК и последующего ее сворачивания. Одну из функций, необходимую для разворачивания цепей молекулы, обеспечивает энергия, сохраненная в торсионной системе ДНК.

Торсионные силы зачастую контролируют весь процесс разворачивания и сворачивания молекулы. Однако отдельные энзимы, например топоизомераза IV, могут уменьшать торсионные силы.

Смысл работы ученых заключался в том, чтобы детально исследовать механику взаимодействия отдельной молекулы ДНК с молекулой энзима. В ходе экспериментов исследователи установили, что энзим топоизомераза IV разрезает одну цепь молекулы ДНК. При этом освобождается торсионный механический момент, и молекула вращается в активном центре энзима до тех пор, пока разорванная цепь не соединится вновь.

С помощью сверхточных измерительных приборов ученые смогли измерить коэффициент трения цепи ДНК, активный центр энзима и другие механические параметры вращения. И конечно, они узнали, сколько оборотов вокруг неповрежденной цепи делает молекула, прежде чем перерезанная цепь соединится снова.

Эти исследования позволяют разработать новые методы использования энзимов в качестве молекулярных машин для приведения в движение наносистем на основе молекул ДНК, а также помогут ученым понять молекулярные механизмы деления клетки.

Источник: NWO. Doing a spin with DNA (http://www.nwo.nl/nwohome.nsf/pages/NWOP_6AXJ7K_Eng)

Золотые наночастицы могут упростить диагностику раковых опухолей

Американские исследователи из технологического института Джорджии и университета Калифорнии разработали новый метод простой и надежной диагностики онкологических заболеваний с помощью золотых наночастиц. Принцип диагностики основан на связывании наночастиц золота со специфическими антителами на поверхности раковых клеток. При этом наночастицы избегают здоровых клеток,

таким образом можно "картографировать" опухоль с точностью до нескольких клеток. О своем исследовании ученые сообщили в текущем выпуске журнала *Nano Letters*.

"Наночастицы золота хорошо рассеивают и поглощают свет, — говорит профессор Мустафа Эль-Сейед. — Мы хотели посмотреть, можно ли присоединить наночастицы к живым клеткам, чтобы облегчить выявление рака. И проделав ряд экспериментов, мы получили многообещающие результаты".

У многих раковых клеток на всей их поверхности есть белок, известный как рецептор эпидермального фактора роста (EGFR), тогда как здоровые клетки обычно не экспрессируют этот белок настолько сильно.

Конъюгация (или связывание) наночастиц золота с антителами против EGFR, обычно называемыми анти-EGFR, позволила исследователям обеспечить связывание наночастиц с самими раковыми клетками. "Если вы добавите раствор этих конъюгированных наночастиц к здоровым и раковым клеткам и посмотрите на изображение, то с помощью простого микроскопа сможете увидеть, как раковые клетки засияют целиком, — сообщил Эль-Сейед. — Здоровые клет-

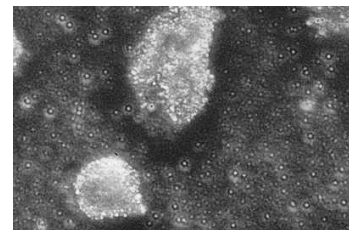


Рис. 4. Наночастицы прикрепляются к раковым клеткам и сияют, отражая направленный на них свет, облегчая диагностику

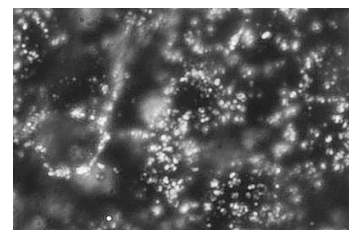


Рис. 5. А к здоровым клеткам наночастицы не пристаю

ки не особенно связываются с наночастицами, поэтому вы их и не увидите. При такой технике если вам хорошо видна оболочка клетки, то это — рак" (рис. 4, 5).

Исследователи обнаружили, что наночастицы золота имеют на 600 % большее сродство (то есть связывание) с раковыми, чем со здоровыми клетками. Лучше всего работали частицы размером 35 нм.

Привлекательность новой методики в том, что она не требует дорогих мощных микроскопов или лазеров. Все, что нужно для того, чтобы увидеть результат — это обычный оптический микроскоп и белая лампа.

Другое преимущество в скорости получения результатов. "Если вы возьмете клетки ткани, пораженной раком, и обработаете их антителами с золотыми наночастицами, то результаты можно увидеть немедленно. Рассеяние настолько сильное, что можно разглядеть каждую частицу", — рассказал Эль-Сэйд. Если можно разглядеть каждую частицу, то соответственно, можно идентифицировать и каждую раковую клетку. Это открывает поистине удивительные возможности диагностики метастазов и опухолей, которые только начинают развиваться.

Наконец, эта методика нетоксична для человеческих клеток. Сходная методика на квантовых точках, которая использует микроскопические полупроводниковые кристаллы для маркировки клеток опухоли, опасна для человека, так как эти полупроводники токсичны.

Источник: Georgia Institute of Technology. Gold Nanoparticles May Simplify Cancer Detection (<http://www.gatech.edu/newsroom/release.php?id=561>)

Приручение таинственных биологических наноконтейнеров

Нанокapsулы, названные наноконтейнерами, часто встречаются в живых клетках. Хотя их открыли двадцать лет назад, до сих пор ученые не смогли понять их назначения, так как не была установлена

их роль в клетке. Они не перемещали никаких молекул и не выполняли других функций.

Исследователи настолько заинтересовались этим феноменом, что генетически модифицировали одну из мышей таким образом, что в ее клетках не содержалось наноконтейнеров. Но лабораторная мышь вела себя точно так же, как и другие и никаких отклонений в ее развитии и состоянии не обнаружилось. Поэтому ученые удивились: если бы нанокapsулы не были нужны для функционирования клеток, то с течением эволюции они бы атрофировались. А из результатов исследований получается, что они в клетке не выполняют никаких функций. Исследования, проводимые над наноконтейнерами натолкнули ученых на другую мысль: а что если использовать эти природные нанокapsулы в нанотехнологиях? Ведь они представляют собой идеальные контейнеры для доставки лекарств, молекул ДНК, РНК; их также можно использовать в наноэлектронике — в электронных ключах и микросхемах (рис. 6).

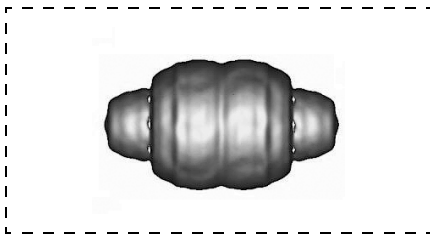


Рис. 6. Модель наноконтейнера

Наноконтейнеры представляют собой веретенообразные капсулы из белковых молекул. Они внутри полые и не структурированы. Фактически, наноконтейнеры — это пустая оболочка, которая должна что-то содержать.

Биохимик Леонард Ром из Калифорнийского университета, под чьим руководством были открыты в 1986 г. наноконтейнеры, в настоящее время составил модель, которая хорошо описывает структуру наноконтейнера. Также биохимик и его команда открыли, как эти нанокapsулы производятся в клетке: для этого необходима опре-

деленная цепочка РНК и набор белковых молекул. Также, как утверждает Ром: "теперь, когда мы можем создавать наноконтейнеры, мы будем управлять их свойствами, т. е. можем создать готовую нанокapsулу с грузом и специфическими маркерами на ее поверхности". Если исследователям удастся это сделать, то неминуем прорыв в области точной доставки лекарств.

Наноконтейнеры — отличный кандидат для перевозок медикаментов и фрагментов ДНК, так как они без препятствий проникают через клеточную мембрану и их не атакует иммунная система человека, воспринимая их как "своих". Как выразился Ром, нанокapsулы — "...это Троянские кони в медицине. Организм считает их своими, в то время как внутри они содержат грузы, которые мы захотим доставить внутрь него".

Первый шаг в приручении наноконтейнеров ученые уже сделали. Они открыли последовательность из 100 аминокислот, которая, как ключом, открывает внешнюю оболочку нанокapsулы, образуя в ней "погрузочное отверстие" (рис. 7). Затем исследователи попытались таким образом поместить внутрь наноконтейнера две флуоресцентные метки. Они присоединили их к "ключу" и добавили в раствор с наночастицами. Как и ожидалось, наночастицы "облепили" раковые клетки.

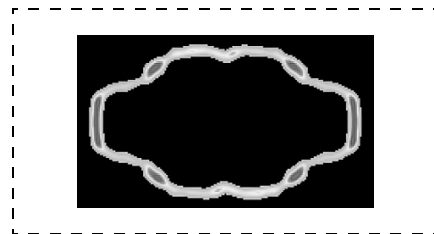


Рис. 7. Поперечное сечение наноконтейнера

Это очень и очень хорошее доказательство того, что можно использовать наноконтейнеры в роли шаттлов для доставки лекарств непосредственно в живые клетки", — говорит Ром. — "Однако нам осталось проверить механизм разгрузки шаттла на живой клетке, а это пока нерешенный нами вопрос."

Но работа исследователей продолжается. Проведя ряд контрольных экспериментов с живыми клетками, Ром и его коллеги добились интересных результатов. Они добавили нанощаттлы с флуоресцентными частицами в культуру с живыми клетками, и те тоже начали светиться — груз попал в цель (рис. 8).

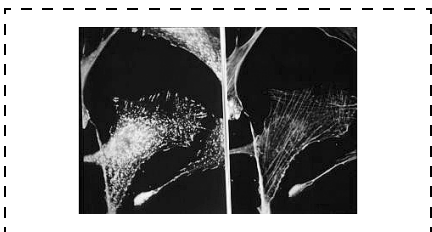


Рис. 8. Нанощаттлы доставили флуоресцентные метки внутрь клетки

В дальнейшем ученые попробуют синтезировать нанощаттлы со специфичными белковыми маркерами на их поверхности. Это позволит лекарству проникать непосредственно в больные клетки.

Как утверждает Ром, он видит несколько возможных перспектив применения этих нанощаттлов в будущем, вот они:

- терапевтическая доставка лекарств, онкология, химиотерапия;
- доставка или замещение ферментов и ферментов, которые вызывают нарушения обмена веществ;
- доставка молекул ДНК для исправления генетических мутаций;
- стабилизация протеинов для увеличения их времени жизни;
- создание биосенсоров, способных отображать состояние отдельной клетки;
- детоксикация клеток и удаление из них вредных веществ;
- очистка окружающей среды от токсичных металлов и опасных биологических объектов;
- наноэлектроника: нанопереклюатели, ключи на основе металлов и полупроводников, заключенных в наноконтейнере.

Источник: NSF: Vaults: From Biological Mystery to Nanotech Workhorse? (http://www.nsf.gov/discoversies/disc_summ.jsp?cntn_id=104106&org=NSF&from=news)

Новые суперлинзы — база будущей оптоэлектроники

Группа ученых из Калифорнийского университета Беркли создали суперлинзы (рис. 9), которые могут преодолеть ограничивающий дифракционный диапазон микроскопов, работающих на обычной световой оптике. С помощью тонкой серебряной фольги и ультрафиолетового света исследователи смогли получить изображения с разрешением около 60 нм матрицы нанопроводников и слово "NANO", нанесенное на органическом полимере (рис. 10). В то время как дифракционный предел разрешения обычных оптических микроскопов — 400 нм.

О своем открытии ученые сообщили в апрельском выпуске журнала *Science*. Благодаря этому открытию исследования в области нанотехнологий и конструирование наномашин станут более легкими и удобными. А главное, — дешевыми. Также развитие этой тех-

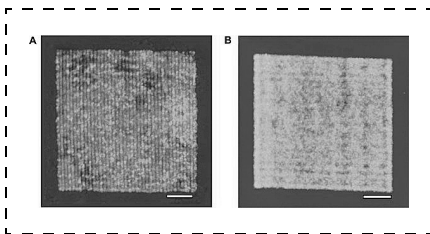


Рис. 9. Микроскопия с помощью серебряных суперлинз. Видно различие в разрешении, с которым были получены изображения (слева — 60 нм, справа — 321 нм). Масштабная метка для обоих изображений размером 2 мкм

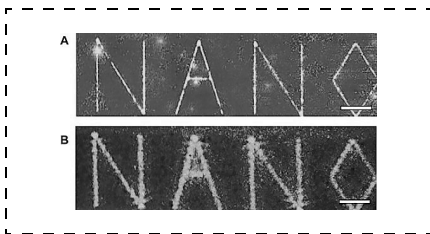


Рис. 10. На верхнем рисунке (А) видно слово "NANO", а ниже (В) суперлинзы были убраны. Разрешение полученного изображения — 60 нм (рис. А). Без суперлинзы разрешение составило 321 нм (рис. В). Масштабная метка для обоих изображений размером 2 мкм

нологии может послужить базой для расширения емкости DVD-дисков. Как предполагают ученые, на таком сверхъёмком DVD можно будет хранить всю Библиотеку Конгресса США, а это уже действительно фантастическая емкость для 12-сантиметрового диска. "Наша работа, в первую очередь, затронет область хранения данных на DVD-дисках. Но кроме хранения информации можно будет использовать принцип суперлинз в биологической микроскопии и инструментах для нанотехнологов", — комментирует результаты своей работы Ксианг Жанг, профессор университета в Беркли.

Никола Фанг, один из коллег Жанга, предполагает, что суперлинзы пригодятся, в первую очередь, для оптической микроскопии в медицине и биологии. С помощью современных оптических микроскопов ученые могут увидеть только такие крупные компоненты клетки, как митохондрии и ядро. Н. Фанг утверждает, что с суперлинзовой микроскопией ученые смогут наблюдать за движением белков вдоль микротрубок цитоскелета. С помощью сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии сегодня можно разглядеть объекты размерами в несколько атомов. Но для получения таких изображений потребуется много времени, так как эти виды микроскопии ограничены по перемещениям зондов, сканирующих поверхность. Также с их помощью нельзя изучить живой образец клетки, поскольку препараты для СТМ и АСМ нужно специально подготавливать.

Главное преимущество оптической микроскопии состоит в том, что мы видим изображение живого образца в реальном времени, — говорит Фанг. — Вот почему с помощью суперлинз можно будет исследовать действующие биологические наносистемы и пытаться конструировать их. А биологи смогут лучше разобраться в природе различных заболеваний".

Открытие суперлинз положило конец дебатам физиков и инженеров о том, как можно обойти дифракционный барьер. Обычные

оптические линзы, сделанные человеком или существующие в природе (капли воды, прозрачные кристаллы и т. п.), передают изображение от световых волн, отражающихся от рассматриваемой поверхности.

Предельную разрешающую способность микроскопа часто называют дифракционным пределом, поскольку она определяется явлениями дифракции на входном зрачке. Правда, до открытия суперлинз уже удавалось с помощью ряда остроумных ухищрений "заглянуть" несколько дальше этого предела: это метод, основанный на применении иммерсионных систем (в котором пространство между предметом и объективом заполняется специальными средами) и позволяющий повысить разрешающую способность примерно в 1,5 раза; метод темного поля, основанный на явлении рассеяния света на малых частицах и позволяющий регистрировать наличие сверхмалых частиц, когда их размеры лежат за пределом разрешающей способности микроскопа; метод фазового контраста, с помощью которого можно изучать полностью прозрачные объекты.

Пользуясь современным языком теории информации, можно сказать, что за попытку проникнуть за дифракционный предел приходится платить ценой потери информации о деталях изучаемого объекта. Действительно, методы субмикроскопии позволяют судить лишь о наличии микрообъектов в поле зрения микроскопа, но не об их форме и других деталях.

Весьма заметный качественный скачок в методах микроскопии был сделан физиками, которые стали использовать инфракрасное, ультрафиолетовое и другие не видимые для глаза излучения. Применение этих излучений для освещения объектов наблюдения было связано с их способностью поглощать, отражать, пропускать и преломлять падающее на них излучение. Поэтому, вообще говоря, при использовании излучений различных участков спектра эти объекты выглядят по-разному. Следовательно, подбирая соответствующее освеще-

ние, можно получить новую информацию о предмете, так как характеристики поглощения, отражения, пропускания и преломления реальных неорганических и органических веществ зависят от длины волны. Короче говоря, получить 100-процентное изображение без потерь информации невозможно даже с использованием "невидимых" лучей.

Все приборы, использующие невидимые глазом излучения, состоят из осветителя (источника освещения), оптических элементов (линз, зеркал, призм и т. п.), пригодных для работ в данном участке спектра, и элементов, преобразующих "невидимое изображение" в видимое. Прорыв в системах "невидимой" микроскопии состоит в том, что ученые из Беркли смогли ввести в конструкцию таких микроскопов новый элемент — суперлинзу из пленки серебра.

В 2000 г. британский физик Джон Пендри сделал теоретическое предположение, что "невидимые" лучи можно захватить и сфокусировать материалом с отрицательным коэффициентом преломления. До него 30 лет назад такое же предположение сделал русский физик Виктор Веселаго. Однако физики до сих пор сомневались в том, что такой материал может вообще существовать. Как известно из основ оптики, коэффициент преломления может быть только положительным. Теории Веселаго и Пендри базируются на том, что электромагнитные световые волны, попадая на поверхность с отрицательным коэффициентом преломления, возбуждают коллективную поверхностную волну, или электронные колебания, называемые поверхностными плазмонами. В результате и происходит захват и фокусировка "невидимых лучей". С тех пор исследователи пытались получить эффект отрицательного коэффициента преломления, используя различные виды волн.

В 2003 г. группа Жанга была первой, кто доказал, что "невидимые" лучи можно фокусировать суперлинзами из серебра. Затем команда Жанга улучшила технику UV-микроскопии до того, что сей-

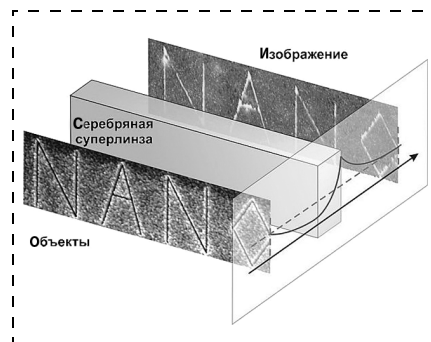


Рис. 11. Принцип действия микроскопа на суперлинзах

час можно видеть объекты размерами 60 нм. Длина волны UV-света в установке составила 365 нм.

Лабораторная установка конструировалась следующим образом (рис. 11). Ширина матрицы нанострун (или, как их еще называют, нанопроводников) составила 40 нм, а слова "NANO" — около 60 нм. В эксперименте эти объекты поместили перед суперлинзой, которая представляла собой пленку из серебра толщиной 35 нм. После суперлинзы исследователи поместили слой полимера-фоторезиста, на котором можно вытравить изображение, сформированное UV-светом. Примечательно то, что эта суперлинза не дает 100 % качества изображения. Теперь исследователи будут работать над тем, чтобы максимально приблизиться к идеальному качеству. "Мы не получили идеального изображения в нашем эксперименте, — говорит Фанг. — Но одно ясно: наше изображение гораздо лучше и точнее тех, которые мы видим в оптических микроскопах".

Это только начало долгого пути в разработке сверхточных оптических микроскопов и DVD-дисков высокой плотности записи. Но, как сказали ученые, игра стоит свеч. Тем более что проблема дифракционного предела универсальна: используя тот же принцип, можно улучшить современные астрономические приборы до почти фантастической точности.

Источник: University of California — Berkeley: New superlens opens door to nanoscale optical imaging, high-density optoelectronics (<http://www.berkeley.edu/>)

Составил Ю. Свидиенко

Пятая международная научно-техническая конференция "ЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОРМАТИКА—2005"

В Московском государственном институте электронной техники (техническом университете) **23—25 ноября 2005 года** проводится 5-я Международная научно-техническая конференция "Электроника и информатика—2005". Приглашаем Вас принять участие в конференции, посвященной 40-летию МИЭТ.

Программный комитет

Сопредседатели — академик РАН **Валиев К. А.** (ФТИ РАН), чл.-корр. РАН **Чаплыгин Ю. А.**

д. т. н., проф. **Баринов В. В.** (МИЭТ),
д. т. н., проф. **Бархоткин В. А.** (МИЭТ),
чл.-корр. РАН **Веретенников В. Г.** (МАИ),
д. ф.-м. н., проф. **Горбачевич А. А.** (МИЭТ),
чл.-корр. РАН **Грибов Б. Г.** (НИИ ОСЧМ),
чл.-корр. РАН **Зубарев Ю. Б.** (НИИР),
чл.-корр. РАН **Каляев И. А.** (ТрТУ),
д. т. н., проф. **Карасев В. Б.** (СПбГУ ИТМО),
чл.-корр. РАН **Копаев Ю. В.** (ФИ РАН),
д. ф.-м. н., проф. **Коркишко Ю. Н.** (МИЭТ),
д. т. н., проф. **Королев М. А.** (МИЭТ),

чл.-корр. РАН **Красников Г. Я.** (НЦ),
д. т. н., проф. **Мальцев П. П.** (СПП РАН),
д. э. н., проф. **Моисеева Н. К.** (МИЭТ),
д. ф.-м. н., проф. **Неволин В. К.** (МИЭТ),
чл.-корр. РАН **Орликовский А. А.** (ФТИ РАН),
д. т. н., проф. **Петросянц К. О.** (МИЭМ),
д. т. н., проф. **Савченко Ю. В.** (МИЭТ),
д. ф.-м. н., проф. **Селищев С. В.** (МИЭТ),
чл.-корр. РАН **Стемпковский А. Л.** (ИППМ РАН),
д. т. н., проф. **Таиров Ю. М.** (СПбГЭТУ "ЛЭТИ")

Научные направления работы конференции (по секциям)

1. Нанотехнология в электронике.
2. Микро- и наносистемная техника.
3. Материалы микро-, опто- и наноэлектроники.
4. Проектирование и технология электронных компонентов.
5. Опто- и акустоэлектроника.
6. Информационные технологии.
7. Информационно-управляющие системы и комплексы.
8. Телекоммуникационные системы и связь.
9. Биомедицинская электроника.
10. Менеджмент и маркетинг в электронике и информатике.

Работа конференции будет организована в виде пленарных, секционных заседаний и стендовых докладов.

Срок представления материалов — с 1 июня до 16 сентября 2005 г.

Оргвзнос за участие в конференции — 900 руб. с учетом НДС

Адрес Оргкомитета

124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 5, Московский государственный институт электронной техники (МИЭТ), ОНТИ, на конференцию "ЭлИнфо—2005".

Телефон: (095) 532-98-30

Факс: (095) 530-54-29

E-mail: id@miee.ru

(только для справочной информации)

Ответственный секретарь Оргкомитета **Харач Валентина Павловна**

CONTENTS

Alferov Zh. I. *Perspectives of Electronics Development in Russia are Considered* 2

Perspectives of electronics use, which is the most rapid developed global scientific-technical direction are considered.

Boreskov G. K. *Perspectives of Science Development in Russia are Considered* 19

Perspectives of Science use, which is the most rapid developed global scientific-technical direction are considered.

Baturin A. S., Chouprik A. A., Sheshin E. P. *Lateral Force Microscopy: Quantitative Approach* 23

Atomic force microscope allows investigating frictional properties of surfaces. However obtained maps of lateral force (LF) distribution are qualitative. Experimental method of calibration presented in this paper allows quantitative interpretation of LF microscopy results. The information about cantilever and construction of optical detection system is required for calibration. Moreover, subsidiary calculations should be done only once for each model of microscope.

Dedkov G. V., Kyasov A. A. *Interaction of Moving Neutral Nanoparticle with the Equilibrium Background Radiation in Vacuum* 28

For the first time, the fluctuation electromagnetic force and heating rate of a neutral polarizable nanoparticle moving with an arbitrary velocity V relative to the equilibrium background radiation of arbitrary temperature are calculated at $R \ll \lambda_W$, where

R and λ_W are the particle radius and Wien wave length of the radiation. The particle is characterized by an isotropic polarizability. General formulas for the force, acting on and the rate of heating the particle in the field of background radiation are derived. The results are of interest for nanoelectrodynamics, particle trapping and physics of dust matter in astrophysics.

Kartashev V. A., Buruhina T. F. *Dependence of Tip Displacements from Nonresonance Oscillation of STM Basis* 31

Mathematic model of dependence between tip displacements and nonresonance oscillation of STM basis is investigated. This dependence takes place due to gap of STM structure under gravity and changing of its vector when STM axis swings in flexible bracket. In low frequencies contribution of this effect can be more then contribution of translation oscillations which usually take into account in developing of bracket.

Belyanin A. F., Samoylovich M. I., Jitkovsky V. D., Pashchenko P. V., Timofeev M. A., Kovalskij K. A., Kleshcheva S. M., Borisov V. V., Petukhov K. Yu. *Layer Cold Cathodes* 39

The conditions of formation, structure and functional properties of diamond and diamond-like films applicable for layer cold cathodes preparation are considered. The exploitation characteristics of layer structures (including nano-structured diamond and diamond-like material layers) are shown as cold cathodes for emission electronic devices.

For foreign subscribers:

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

The journal bought since november 1999.
Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev
ISSN 1813-8586.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(095) 269-5510.
E-mail: it@novtex.ru; <http://www.microsystems.ru>

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

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

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

Сдано в набор 31.05.2005. Подписано в печать 08.07.2005. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,97. Заказ 1257. Цена договорная

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