

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 10 ✧ 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

Урличич Ю. М., Данилин Н. С. Проблемы взаимодействия высоких космических электронных технологий РФ и ЕС в области элементной базы 2

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Евдокимов Ю. М. Нанотехнологии на основе двухцепочечной ДНК 4

Запороцкова И. В. Нанотубулярные структуры: строение, свойства и перспективы 7

СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

Завьялов А. В., Коломенская Н. Г., Молчанова Е. Д. Сверхбольшие интегральные схемы типа "системы на кристалле" и сложные функциональные блоки: основные нюансы при разработке нормативных документов 19

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Абрамов И. И., Дворников О. В. Тенденции и проблемы проектирования прецизионных аналоговых интерфейсов 23

Каштанкин И. А., Гуринов Н. Т. Динамические характеристики фоточувствительных биполярных *N*-приборов с управляемой вольт-амперной характеристикой 35

Поломошнов С. А., Чаплыгин Ю. А., Амеличев В. В., Годовицын И. В., Иванова О. М., Крутоверцев С. А. Преобразователь датчика взрывоопасных газов на диэлектрической мембране 39

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ 43

СТРАНИЧКА РФФИ 49

ИНФОРМАЦИЯ 54

Contents 56

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

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

ПОДПИСКА:

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

УДК 621.3

Ю. М. Урличич, канд. техн. наук,
ФГУП "РНИИ КП",
Н. С. Данилин, д-р техн. наук,
НЦ СЭО ФГУП "РНИИ КП"

ПРОБЛЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РФ И ЕС В ОБЛАСТИ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ*

Рассмотрены возможные пути дальнейшей миниатюризации космических аппаратов.

Для современного российского космоса и телекоммуникаций повышение надежности электронных радиоизделий (ЭРИ) имеет большое значение. При этом в нашей стране должны применяться не только российские, но и западные высоконадежные элементы.

Поэтому Росавиакосмос поддерживает свободный доступ западных элементов на российский космический рынок, а также выход западных фирм на российские элементы.

При этом стандарты, методы, практика и процедуры сертификации ЭРИ, а также необходимые элементы инфраструктуры, такие как испытательное оборудование, системы обработки данных, методы управления и обеспечения качества должны соответствовать требованиям системы ИСО 9001-2001, быть совместимы со стандартами, применяемыми в промышленности западноевропейских стран, и обеспечивать получение сопоставимого качества.

По общему мнению, совместимость и сопоставимость со стандартами и практиками ЕС являются необходимыми предпосылками для взаимной интеграции телекоммуникационных сетей России и ЕС, а также для сотрудничества между организациями, пользователями и соответствующими производственными предприятиями России и стран ЕС в области телекоммуникаций.

В ряду немногих организаций Росавиакосмоса ФГУП "РНИИ КП" имеет в последние годы уни-

кальный опыт ведения деловых контрактов с партнерами от ESA (в основном, это фирмы Германии, Испании и Англии) по вопросам кооперации и гармонизации технических требований между российской и западноевропейской элементной базой для космических аппаратов (КА) длительных сроков активного функционирования.

Конечной проблемой взаимодействия между РФ и ЕС должно быть построение интерфейсов базы данных по сертификации и стандартизации элементной базы, которые бы сертифицировали производимые в РФ электронные, электрические, электромеханические (ЭЭЭ) компоненты в соответствии со стандартами, методами, процедурами и практикой, применяемыми в промышленности Западной Европы.

Предпосылками применения западных ЭРИ является ожидаемый в 2003—2015 гг. в РФ в рамках Федеральной космической программы запуск более 50 коммерческих КА. Росавиакосмос в своих последних документах по использованию зарубежной элементной базы разрешает ее применение в тех случаях, когда невозможно обеспечить тактико-технические характеристики КА при использовании отечественных ЭРИ, а также в тех случаях, когда невозможно или нецелесообразно осуществить разработку и обеспечить поставку отечественных ЭРИ, для изготовления единичных образцов космической техники при обеспечении разовой закупки в необходимых количествах (с учетом запаса). Существует также ряд других причин, позволяющих использовать элементную базу зарубежного производства.

В аппаратуре изделий разрешается применять ЭРИ, имеющие сертификат соответствия требованиям военных стандартов MIL—STD или ESA/SCC без дополнительных отбраковочных испытаний на российских предприятиях, если они содержатся в перечне QPL или в стандарте MIL — STD — 975, группа 1. Если элементы не отвечают этим требованиям или предназначены для использования в разработках военного назначения, они должны проходить соответствующие отбраковочные (сертификационные) испытания с выдачей соответствующего гарантийного документа.

Основными документами, регламентирующими порядок поставок зарубежной элементной базы, являются:

- 1) "Положение о порядке комплектования ЭРИ аппаратуры объектов космической техники народного хозяйственного и научного назначения";
- 2) "Положение о порядке применения ЭРИ зарубежного производства в вооружении и военной технике".

В настоящее время потребность Российской Космической промышленности в западных ЭРИ

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

определяется отставанием российской электронной промышленности в наиболее передовых с технологической точки зрения областях, т. е. тех областях, оснащение которых современным оборудованием требует значительных инвестиций. Также ряд предприятий, поставляющих ЭРИ для космоса, после распада СССР оказались за пределами РФ и не заинтересованы в выпуске высоконадежных комплектующих из-за небольших партий.

Для космической промышленности в РФ в первую очередь жизненно необходимы:

- сигнальные процессоры;
- скоростные ЦАП и АЦП;
- прецизионные усилители-компараторы;
- запоминающие устройства, в том числе:
 - флеш-память;
 - ОЗУ емкостью 256 Кбайт с малым временем доступа;
- микропроцессоры со скоростью переключения более 40 МГц;
- СВЧ приборы с низким коэффициентом шума;
- мощные биполярные транзисторы.

Представленный список был составлен на основе реальных потребностей российских производителей оборудования для использования в космосе, таких как ГКНПЦ им. М. В. Хруничева, НПО ПМ, НИИ ТП и ФГУП "РНИИ КП". Этот список необходимых в РФ элементов находится в полном соответствии с требованиями Российского авиационно-космического агентства (РАКА), т. е. не содержит тех элементов, которые производятся и отвечают стандартам по качеству в России.

Проблемы гармонизации технических требований начинаются с оценки состояния надежности и качества ЭРИ в РФ и ЕС.

В РФ комплекс документов и стандартов, которые определяют надежность и качество элементной базы для космоса, разработало Министерство обороны. Сейчас Росавиакосмос проводит работу по переводу этих стандартов в несекретную документацию. Для бортовой аппаратуры КА основные элементы — с индексами ОС и ОСМ, для которых в Росавиакосмосе сертификация чисто формальна.

Для компонентов из СНГ вступает в силу идеология, полностью совпадающая с ESA/SCC.

В настоящее время в РФ сложилась следующая ситуация. Все до сих пор применяемые при квалификации/присвоении индексов ОС стандарты и документы носят конфиденциальный характер. При этом Росавиакосмосом была предпринята попытка по созданию открытых документов для сертификации ракетно-космической техники (РКТ) научного и народнохозяйственного значения. Эти документы созданы в рамках Федеральной системы сертификации РКТ (ФСС КТ) и имеют статус действующих положений. В настоящее время эти документы являются единственными официальными документами, которые регламентируют по-

рядок проведения сертификации и распределение ответственности при ее проведении.

В то же время все временные документы ссылаются на вышеобозначенные комплексы стандартов, которые в настоящее время находятся также на рассмотрении с целью их замены на открытые документы Росавиакосмоса по сертификации РКТ научного и хозяйственного назначения.

Вследствие того что официальные документы Росавиакосмоса еще находятся в стадии доработки, очевидны некоторые несоответствия при рассмотрении процесса сертификации, особенно в части состава испытательной/сертификационной программы и ее проведения в специализированных центрах.

Стандарты, применяемые уже долгое время, которые непосредственно определяют требования при испытаниях (последовательности, методы и условия), имеют так или иначе структуру, близкую к структуре западных стандартов.

Это позволяет довольно детально сравнить сами испытания и их последовательности, а также применяемые методы и принципы подхода к квалификационным испытаниям ЭРИ.

Стандарты, действующие в РФ, объединены в единый комплекс. Отличительной особенностью российских стандартов является то, что обеспечение системы качества является неотъемлемой частью рассматриваемых стандартов на протяжении всего жизненного цикла изделия, начиная с его разработки до серийного производства.

Для интегральных схем (ИС) основным документом являются специальные ОТУ ОСТ 11.

Для полупроводниковых приборов в настоящее время действуют два ОТУ 28146 и 22468, к которым изданы и действуют специальные дополнения.

Для реле основным стандартом является ГОСТ 16121 и специальное дополнение к нему.

ГОСТ 20.57.406, описывающий методы испытаний, является универсальным и применяется для всех классов электронных приборов.

Для полупроводниковых приборов финишный контроль (100 %-ная отбраковка) описан в ГОСТ 11.0219.

Для реле на этапе финишного контроля не предъявляется общих требований.

Для испытаний на безотказность и долговечность и радиационную стойкость действуют специальные ГОСТы.

Интеграция и дальнейшее взаимодействие между сетями космических телекоммуникаций России и стран Западной Европы — главное условие для установления деловых контактов между ними, а также для успешной деятельности России на мировом космическом рынке.

Наметившиеся тенденции предусматривают развитие сотрудничества между Россией и Западной Европой при создании совместных космиче-

ских информационных методов и новых систем телекоммуникаций.

Перспективы развития этого сотрудничества требуют значительной гармонизации в сертификации российских и западноевропейских электронных компонентов для космического телекоммуникационного оборудования.

Устойчивая тенденция по использованию западноевропейской элементной базы на основе высоконадежных представителей индустриального исполнения характерна для новых российских космических проектов.

В наших работах, основанных на творческом взаимодействии экспертов Росавиакосмоса, ФГУП "РНИИ КП" (Москва, Россия) и представителей передовых западных космических компаний IGG (Великобритания) и ASTRIUM (Германия), сделана попытка осуществить модернизацию технологий информационного космического пространства на уровне общей системы с целью познакомить иностранных экспертов с методологией теоретического и практического обучения при переходе к западным стандартам в области разработки новых российских космических телекоммуникаций.

Европейская Комиссия посредством проектов в рамках программы Тасис (*Tacis*) в 1996—1997 гг. начала оказывать поддержку российской космической индустрии. Цель этих проектов — оказать Росавиакосмосу техническое содействие для обеспечения возможности сертификации изготавливаемых

в России спутниковых ЭЭЭ (электронных, электрических и электромеханических) компонентов в соответствии со стандартами, методиками и практикой, применяемыми западноевропейской промышленностью.

Информационный учебный Центр Росавиакосмоса, созданный по проекту Tacis-TelRUS-9801 был официально открыт 19.01.2001 членом Европейской Комиссии, ответственным за внешние связи, Кристофером Паттенем в присутствии министра промышленности, науки и технологий РФ А. Н. Дондукова, заместителя генерального директора Росавиакосмоса Г. М. Полищука и Посла ЕС в РФ Ричарда Райта. Процедура инаугурации Центра в записи была показана затем по многим каналам отечественного телевидения, информация об этом событии опубликована в журнале "Европа", № 2, 2001 г.

Достигнут прогресс в создании взаимоприемлемых программ сертификационных испытаний электронных компонентов космического назначения на важном этапе процесса гармонизации основополагающих стандартов российской и западноевропейской индустрии.

Проект "Российско-западноевропейская система информации, маркетинга, поставки и сертификации космических приборов и компонентов (СИМПС)" основывается на двух успешно выполненных проектах "*Tacis-TelRUS-9503*" и "*Tacis-TelRUS-9801*" и направлен на создание перспективной электронной торговой площадки в области высоких технологий.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 621.3

Ю. М. Евдокимов, д-р хим. наук, проф.,
Институт молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта РАН

НАНОТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ДВУХЦЕПОЧНОЙ ДНК*

Рассмотрены новые подходы к созданию наноструктур на основе двухцепочечных молекул ДНК. Выделены области возможного практического применения наноструктур, созданных на основе частиц жидкокристаллических дисперсий двухцепочечной ДНК.

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

В статье речь пойдет об одной узкой, но весьма важной проблеме из области нанотехнологии. Это нанотехнология на основе двухцепочечных молекул ДНК. Многие слышали комбинацию этих слов, но не у всех есть единое представление о рассматриваемом предмете.

Нанотехнологии на основе нуклеиновых кислот — это направленное создание сложных трехмерных конструкций с регулируемыми свойствами, строительными элементами которых являются двухцепочечные молекулы ДНК, или, в принципе, любых двухцепочечных нуклеиновых кислот. Сама уникальность

предоставленного нам природой объекта, т. е. ДНК с ее структурой, уникальными физическими и химическими свойствами, заставляет нас использовать эту молекулу для строительства наноконструкций. Следовательно, существуют как стратегии нанобиотехнологии на основе двухцепочечных нуклеиновых кислот, так и возможности применения созданных наноконструкций для различных целей в медицине, биотехнологии и т. д.

О важности данной проблемы говорит хотя бы то, что при офисе Президента Соединенных Штатов по этой тематике было проведено специальное совещание, принявшее конкретное решение с привязкой к столь важной в США инстанции. На совещании обсуждались вопросы, относящиеся к наночастицам, наноматериалам, наноустройствам. В разделе о наноматериалах разработанного совещанием документа основное внимание уделено проблеме создания наноструктур на основе биологических объектов, в частности ДНК.

Совсем недавно, в сентябре 2004 г., опубликована статья, заголовком которой переведен так: "Нанотехнология и двойная спираль". Так в чем состоит американский подход к созданию таких сложных структур? Он основан вот на чем. Молекула ДНК, содержащая так называемый "липкий конец", может взаимодействовать с другой молекулой ДНК, образуя комплементарный комплекс. Фермент зашивает дефекты в созданной структуре, и образуется жесткая двойная спираль. Это первый ход. Если использовать синтетические молекулы ДНК, содержащие так называемые палиндромные, т. е. одинаково читаемые (как слева направо, так и справа налево: "а-роза-упала-на-лапу-Азора") структуры, то такая последовательность легко образует крестообразные структуры самопроизвольно. Комбинация крестообразных структур,

которая тоже может иметь "липкий конец", позволяет получить решетчатые структуры на поверхности. При этом в силу того, что крестообразные структуры имеют определенную гибкость, полученная структура может сложиться в объект, представляющий кубик из молекул ДНК размером приблизительно в 200 нм. Анализ полученных структур осуществляется с помощью атомной силовой микроскопии или электронной микроскопии.

Сверхзадача проекта состоит в том, чтобы создать трехмерную структуру, содержащую молекулы "гостей", т. е. чужеродных соединений, встроенных в эту систему, и использовать такие образования в нанoeлектронике, в оптике и т. д.

Очевидно, что массовое создание рассмотренных структур сопряжено с наличием высокоразвитой биотехнологической промышленности, поскольку нужно иметь синтетические молекулы ДНК с известными свойствами, системы ферментативного расщепления, сшивания молекул ДНК и т. д. Кроме того, нужно иметь разработанную систему выбора из такой системы нужной молекулы, что, конечно, связано

с большими затратами. Тем не менее, этот проект сейчас очень активно развивается. И отголоски его ощущаются уже в европейском проекте по нанотехнологиям, который с прошлого года начал действовать.

При отсутствии средств соревноваться на этом поле довольно сложно, если не безнадежно. Но можно идти к решению задачи другим путем.

Было решено использовать не единичную готовую молекулу ДНК, а пространственно упорядоченную структуру, в которой содержится множество молекул ДНК, спонтанно упорядоченных в пространстве. В силу физических свойств молекул ДНК такая структура пространственно закручивается, образуя так называемую холестерическую жидкокристаллическую фазу или жидкокристаллическую дисперсию, состоящую из отдельных частиц. Наша неординарная идея состояла в том, чтобы внутри частицы жидкокристаллической дисперсии встроить управляющий элемент.

Теоретически между молекулами ДНК можно построить плоский наномостик (рис. 1). Наномостик обладает симметрией, что

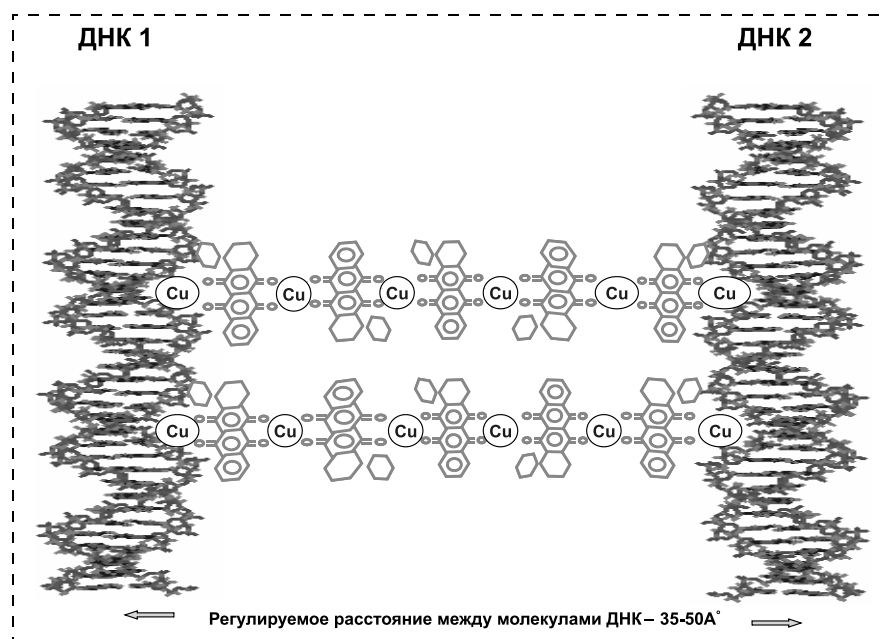


Рис. 1. Плоский наномостик между молекулами ДНК

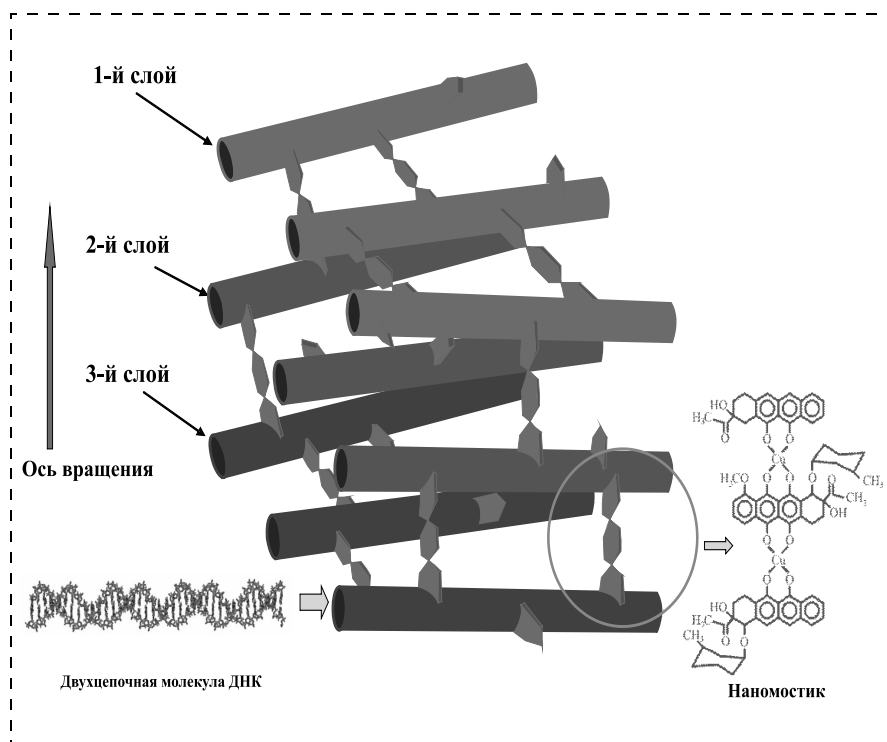


Рис. 2. Гипотетическая трехмерная структура наноконструкции на основе ДНК

накладывает очень жесткие стерические условия на взаимное расположение соседних молекул ДНК в квазинематическом слое жидкого кристалла. Этот плоский наномостик можно создать, комбинируя молекулы антибиотика и ионы меди. При этом расстояние между молекулами ДНК можно регулировать. Конструкция, показанная на рис. 1, обладает интересными магнитными и другими свойствами, что привлекает к ней внимание специалистов разных областей науки.

Итак, если мы правы, такая конструкция может быть создана. Все ее нанопараметры регулируем, контролируем. Что же возникает на практике?

На практике были получены удивительные результаты. Например, ранее жидкие кристаллы молекул ДНК становятся "твердыми", трехмерными (рис. 2). И при этом аномальные оптические свойства не только сохраняются, но и возникает дополнительная аномальная оптиче-

ская активность. Это говорит о том, что в состав ДНК-ового холестерика встраивается другой холестерик, состоящий из наномостиков. Возникают две разные структуры с разными способами управления их свойствами, а следовательно, с совсем разными физическими свойствами, которыми можно управлять с помощью разных факторов. В частности, можно встраивать разные ионы металлов, разные антибиотики — и все это регулируется!

Если созданная система "твердая", то за ней можно легко наблюдать с помощью атомного силового микроскопа. Частицы наноконструкции немножко вытянуты, имеют размер порядка 500 нм. В каждой частичке содержится гигантская концентрация молекул ДНК (порядка 100 мг/мл (!!!)), а следовательно, и гигантская концентрация антибиотика и ионов металла. Учитывая это обстоятельство, можно выделить три очевидные области применения таких наноструктур:

- наноструктуры на основе нуклеиновых кислот — великолепные биодатчики для определения соединений, взаимодействующих как с ДНК, так и со строительными элементами наномостиков;
- наноструктуры — великолепные носители генетического материала (т. е. ДНК), антибиотиков или тех элементов, которые встроены в такую структуру;
- наноструктуры с управляемыми свойствами — уникальные фильтры, "фильтрующие" аномальную оптическую активность и потому используемые в самых разных областях техники.

Очевидно, что создаваемые наноконструкции могут найти широкое применение в различных областях биотехнологии, медицины, экологии и т. д.

С учетом указанных выше возможностей Институт молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта РАН совместно с Институтом спектроскопии РАН (г. Троицк) создал уникальный прибор — аналитическую систему, в которой работают нанобиодатчики на основе ДНК. Система имеет Сертификат РФ, производится и отмечена различными призами. В настоящее время идет разработка приборов для нужд отдельных потребителей.

Наш опыт показывает, что подобные работы оказываются результативными лишь при объединении усилий ученых разных специальностей — от биотехнологов, физиков до специалистов в области оптики и микроэлектроники, усилий разных исследовательских центров, в том числе российских и зарубежных. Необходимо обеспечить сами работы и взаимодействие ученых в процессе реализации таких работ средствами, которые могут быть выделены в рамках создаваемой национальной программы России по нанотехнологии.

УДК 539.2:530.145

И. В. Запорожкова, канд. физ.-мат. наук,
Волгоградский государственный университет**НАНОТУБУЛЯРНЫЕ СТРУКТУРЫ:
СТРОЕНИЕ, СВОЙСТВА
И ПЕРСПЕКТИВЫ**

Представлен краткий обзор современного состояния исследований строения, способов получения и основных физико-химических свойств нанотубулярных структур (нанотрубок). Описаны основные области применения углеродных нанотрубок. Наибольшее внимание уделено рассмотрению возможностей использования тубуленов в электронике. Анализируется связь строения нанотрубок с их электропроводностью. Приводятся результаты теоретических расчетов механизмов отдельных моделей роста тубуленов, электронно-энергетических свойств полубесконечных нанотубулярных структур и энергетических характеристик процессов заполнения углеродных тубуленов атомарным водородом. Рассматриваются возможности протонной проводимости нанотрубок.

Введение

Нанотехнология — наука об изготовлении и свойствах элементов техники на атомном и молекулярном уровне — в настоящее время является одной из самых интересных и привлекательных. Наноприборы и наномашинны из области исследований уже переходят в современную жизнь. И частью этой науки является быстро растущая область нанотрубных и фуллереновых исследований, объединяющая научные группы физиков, химиков и материаловедов. Проблема создания твердотельных наноструктур с заданными свойствами и контролируемыми размерами входит в число важнейших проблем XXI века. Ее решение вызовет революцию в электронике, материаловедении, механике, химии, медицине и биологии.

Одним из основных исследуемых объектов современной нанонауки являются уникальные макромолекулярные системы — углеродные и неуглеродные нанотрубки, или нанотубулены (НТ). Эти замкнутые поверхностные структуры проявляют ряд специфических свойств, которые позволяют использовать их как интересные своеобразные физические и химические системы. Ввиду малых размеров (диаметр трубок — несколько нанометров, а длина — до нескольких микрометров) нанотрубки представляют собой новый класс квазиодномерных объектов. Углеродные нанотрубки (УНТ) химически и термически стабильны, имеют превосходную теплопроводность, уникальные прочностные и механические характеристики [1—9]. Свой-

ства УНТ сильно меняются в зависимости от их формы и кривизны, способа допирования и выбора внедряемого элемента. Ученых привлекают их необычные электронные свойства, их потрясающая жесткость и упругость, их интересные сорбционные свойства, возможность служить наносупрами. Отсюда и возникает теоретический и практический интерес к этим структурам.

Однако углеродные нанотрубки — не единственно возможная форма существования нанотубулярных структур. Успехи в синтезе УНТ инициировали работы по получению иных веществ в нанотубулярной форме. К числу наиболее изученных в смысле получения можно отнести нанотрубки на основе слоистых борсодержащих фаз — гексагонального нитрида бора, карбида и карбонитрида. К настоящему времени синтезированы нанотрубки на основе слоистых диалкогенидов, исследуются возможности получения тубулярных наноструктур кремния, карбидов металлов и др. [10]. Поэтому прогностические исследования строения и физико-химических свойств неуглеродных или смешанных нанотубулярных структур также чрезвычайно актуальны.

Прогресс в области физических методов изучения наноструктур, таких как фото- и рентгено-электронная спектроскопия, спектроскопия энергетических потерь электронов, дифракция медленных электронов и т. д., а также совершенствование традиционных методов (ИК и УФ спектроскопия, электронная микроскопия, методы ЭПР и ЯМР) привели к более углубленным представлениям об их структуре и свойствах. Тем не менее для детального описания электронного строения и химической связи в тубуленах, а также различных процессов на их поверхности использование только экспериментальных подходов оказывается недостаточным. Эффективность получаемых в экспериментах сведений во многом зависит от успеха в их интерпретации, т. е. в установлении корректных соотношений между спектральными и другими характеристиками вещества и особенностями его электронной структуры. Поэтому физические методы исследования требуют также применения последовательных теоретических подходов и эффективных моделей. Модельные представления и квантомеханические расчеты электронной структуры имеют и самостоятельную ценность, так как способны предоставить более полную информацию об особенностях электронного строения нановещества, чем известные экспериментальные методы, а также предсказать его возможные свойства и сферы применения. Эффективное применение вычислительных методов квантовой теории к решению материаловедческих вопросов нановеществ, рассматриваемых во взаимосвязи электронное строение —

состав — структура — свойства, позволяет говорить о становлении в настоящее время нового направления — квантового материаловедения наноструктур.

Одной из наиболее перспективных областей, остро заинтересованной в исследовании и применении нанотубулярных структур, является область электронной техники. Сфера прогнозируемого и реального применения нанотрубок в электронике чрезвычайно широка и необычайно интересна. В последние годы в журналах появилось множество статей, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию этих уникальных структур, были написаны монографии [1–3, 8, 9, 10], систематизирующие сведения об электронной структуре и физико-химических свойствах этой новой квазиодномерной формы вещества. Тем не менее, обобщение исследовательского материала по вопросу о возможном применении нанотрубок в электронике и новые перспективы развития этой сферы — нанoeлектроники — является важным и полезным для круга читателей, работающих в области электронной техники.

1. Структура и классификация нанотубулярных материалов

Широко известно, что углерод может образовывать две кристаллические структуры — алмаз и графит. Во второй половине 1980-х годов были открыты новые формы существования углерода — фуллерены и нанотрубки (тубулены), в которых еще в большей степени проявилась склонность углерода к образованию поверхностных структур [1–9].

Нанотубулены представляют собой длинные (до нескольких микрометров) трубки диаметром в несколько нанометров, поверхность которых выполнена правильными шестичленными углеродными циклами (гексагонами). В зависимости от условий получения могут образовываться однослойные или многослойные тубулены, имеющие открытые или закрытые концы. Принятая в настоящее время классификация [3] опирается именно на этот принцип подразделения нанотубулярных структур.

Структуру тубуленов обычно описывают в терминах бесконечных цилиндрических поверхностей, на которых расположены атомы углерода, связанные в единую сеть с гексагональными ячейками — sp^2 -сетку — аналогично монослою графита. Вводят два вида таких нанотрубок: хиральный и ахиральный. Хиральные тубулены имеют винтовую симметрию, ахиральные — цилиндрическую и разделяются на два типа. В первом из них два ребра каждого гексагона параллельны оси цилиндра (так называемые *zig-zag*-трубки), во втором — два ребра каждого гексагона перпендикулярны оси цилиндра (*arm-chair*-трубки). В общем случае углеродные на-

нотубулены могут быть описаны заданием хирального вектора

$$\mathbf{C}_h = n\mathbf{a}_1 + m\mathbf{a}_2, \quad (1)$$

диаметра трубки d_t , хирального угла Θ и основного вектора трансляции $\mathbf{T}$ (рис. 1).

Вектор $\mathbf{C}_h$ связывает два кристаллографически эквивалентных состояния O и A на двумерной (2D) графеновой плоскости, в которых расположены атомы углерода [1, 2]. На рис. 1 показан хиральный угол Θ нанотрубки типа *"zig-zag"* ($\Theta = 0$) и единичные векторы $\mathbf{a}_1$ и $\mathbf{a}_2$ гексагональной решетки. Тубулену *"arm-chair"* соответствует угол $\Theta = 30^\circ$. Ансамбль возможных хиральных векторов может быть задан уравнением (1). Каждая пара символов (n, m) определяет различный способ скручивания графеновой поверхности в углеродную нанотрубку. Различия в хиральном угле Θ и в диаметре тубулена d_t приводят к различиям в свойствах углеродных нанотрубок. В символике (n, m) , используемой для точного определения хирального вектора $\mathbf{C}_h$ в уравнении (1), обозначение (n, m) относится к тубуленам, обладающим хиральной симметрией, $(n, 0)$ обозначает *"zig-zag"*-тубулены, а (n, n) — *"arm-chair"*-тубулены, при этом чем больше значение n , тем больше диаметр трубки (рис. 2). Как $(n, 0)$, так и (n, n) трубки обладают исключительно высокой симметрией, и плоскость зеркальной симметрии перпендикулярна оси тубулена. В терминах индек-

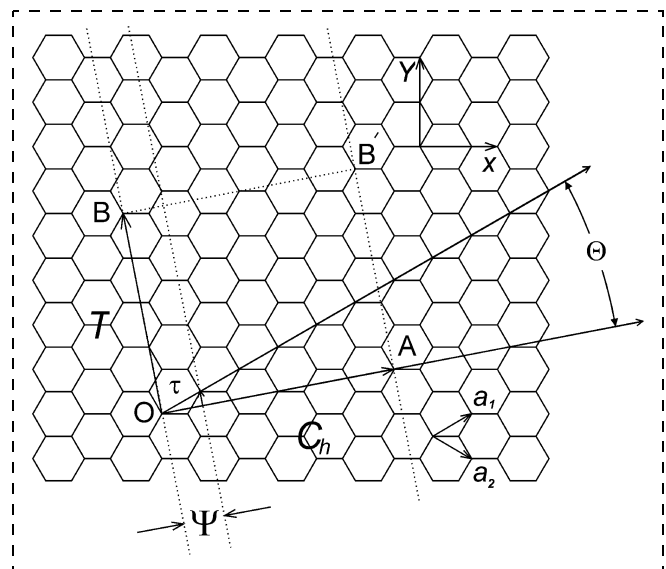


Рис. 1. Решетка нанотубуленов:

$\vec{OA} = \mathbf{C}_h = n\mathbf{a}_1 + m\mathbf{a}_2$ — хиральный вектор, определенный единичными векторами $\mathbf{a}_1$ и $\mathbf{a}_2$; Θ — хиральный угол; $\vec{OB} = \mathbf{T}$ — вектор решетки одномерной элементарной ячейки; Ψ — угол вращения; τ — вектор трансляции, задающий операцию симметрии

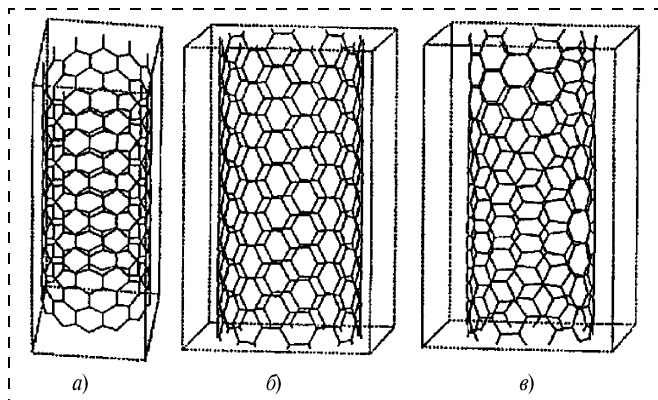


Рис. 2. Фрагменты однослойных нанотубулярных структур различных типов:

a — трубка типа "zig-zag" ($n, 0$); *b* — трубка типа "arm-chair" (n, n); *в* — трубка с хиральной симметрией (n, m)

сов (n, m) диаметр тубулена записывается следующим образом:

$$d_t = C_h / \pi = \sqrt{3} a_{c-c} (m^2 + mn + n^2)^{1/2} / \pi, \quad (2)$$

где a_{c-c} — расстояние между ближайшими атомами углерода (0,1421 нм в графите), C_h — длина хирального вектора C_h . Хиральный угол Θ задается выражением

$$\Theta = \tan^{-1} [\sqrt{3} m / (m + 2n)]. \quad (3)$$

Описание геометрии многослойных нанотруб (МНТ) является более сложным. Простейшая модель МНТ — система коаксиальных однослойных нанотрубок, сохраняющих идеальную цилиндрическую форму и расположенных друг относительно друга на расстояниях порядка межслоевых расстояний в графите (рис. 3) [3]. В этом случае используется формализм, развитый для однослойных НТ, который распространяется на систему цилиндров. В то же время существуют модели более сложных конфигураций МНТ, наиболее популярными из которых являются призматические, спиральные и свиткообразные. По мере увеличения числа слоев все в большей степени проявляются отклонения от идеальной цилиндрической формы. В некоторых случаях внешняя оболочка приобретает форму многогранника. Иногда поверхностный слой представляет собой структуру с неупорядоченным расположением атомов углерода. В других случаях на идеальной гексагональной сетке внешнего слоя нанотрубки образуются дефекты в виде пятиугольников и семиугольников, приводящие к нарушению цилиндрической формы [18]. Наличие пятиугольника вызывает выпуклый, а семиугольника — вогнутый изгиб цилиндрической поверхности нанотрубки. Подобные дефекты ведут к появлению изогнутых и спиралевидных нанотрубок.

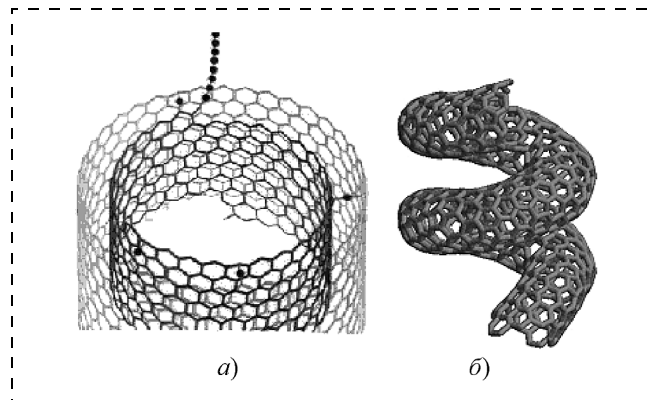


Рис. 3. Модели многослойных нанотруб:

a — двухслойная коаксиальная система (символически изображен процесс роста нанотрубки как последовательное присоединение атомов углерода); *б* — спиральная система

До недавнего времени самой тонкой наблюдаемой трубкой была нанотрубка (4, 0). Такая трубка получается внутри цилиндрических каналов кристаллов цеолитов. Но в 2004 г. удалось обнаружить нанотрубку (2, 0) внутри другой нанотрубки.

2. Генерация и механизмы роста нанотрубок: экспериментальные и теоретические исследования

Одним из наиболее популярных методов получения углеродных нанотрубок является разрядно-дуговой метод, примененный С. Ииджимой [19]. В нем используется термическое распыление графитового электрода в плазме дугового разряда в атмосфере гелия. Этот метод позволяет получить нанотрубки в количестве, достаточном для детального исследования их физико-механических свойств. Процесс синтеза осуществляется в камере, заполненной гелием (рис. 4) под давлением около 66,65 МПа. На торцевой поверхности катода образуется оса-

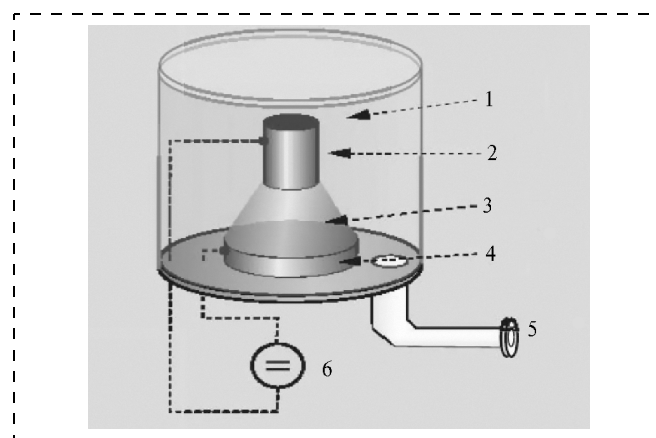


Рис. 4. Камера для разрядно-дугового метода получения нанотрубок в атмосфере гелия:

1 — гелиевая атмосфера; 2 — анод из графита; 3 — плазма; 4 — катод из графита; 5 — насос; 6 — источник напряжения

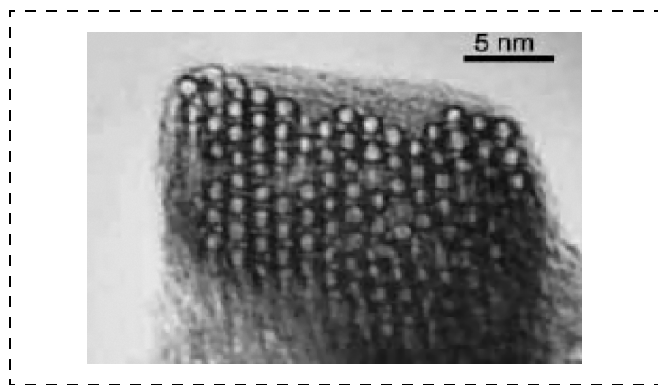


Рис. 5. Сотовая структура в пучке нанотрубок диаметром 1,4 нм (изображение получено с помощью трансмиссионного электронного микроскопа)

док, в котором формируются углеродные нанотрубки. Образующиеся нанотрубки имеют длину порядка 40 мкм. Они нарастают на катоде перпендикулярно плоской поверхности его торца и собираются в цилиндрические пучки диаметром около 50 мкм. Пучки нанотрубок регулярно покрывают поверхность катода, образуя сотовую структуру (рис. 5).

Пространство между пучками нанотрубок заполнено смесью неупорядоченных наночастиц и одиночных трубок. Содержание тубуленов в углеродном осадке (депозите) может приближаться к 60 %. Для разделения компонентов полученного осадка используется ультразвуковое диспергирование.

Еще одним интересным методом получения нанотрубок является метод лазерной абляции графита (рис. 6). Он заключается в обстреле помещенной в вакуумную камеру графитовой мишени импульсным лазером [20, 21]. Выбитый лазерным импульсом углерод оседает на близко расположенной холодной подложке в виде нанотрубок. Добавляя в мишень разные катализаторы и применяя одновременно несколько лазеров с разной длиной волны излучения, можно добиться получения разных видов нанотрубок.

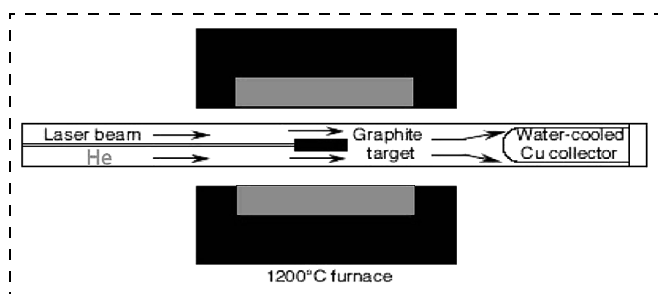


Рис. 6. Схема установки для получения нанотрубок методом лазерной абляции:

источник лазерного излучения, печь, нагретая до 1200 °С, графитовая мишень, охлажденный коллектор, на поверхности которого растут нанотрубки

Одна из проблем получения нанотрубок относится к формированию их однослойности. Один из способов получения однослойных НТ основан на их окислении. Для окисления нанотрубок используется либо обработка кислородом при умеренном нагреве [22], либо обработка кипящей азотной кислотой [23], причем в последнем случае происходит удаление пятичленных графитовых колец, приводящее к открытию концов трубок.

Одной из важнейших задач теории, описывающей свойства нанотубулярных структур, является разработка корректных моделей их образования и роста. Механизм зарождения и формирования цилиндрических нанотрубок чрезвычайно интересен и горячо обсуждается в научной печати. Однако выводы большинства исследований объединяют кинетику роста структуры в рамках выбранной процедуры и условий получения НТ, поэтому их нельзя считать универсальными. Большое количество факторов, влияющих на процесс формирования нанотрубок, и разнообразие получаемых структур привело к возникновению широкого набора моделей, описывающих механизм роста НТ. Все предлагаемые модели берут за основу определенный признак получающейся нанотубулярной структуры. Например, они могут быть ориентированы на конструирование конкретной (одно- или многослойной) структуры, учитывать определенный тип зародыша нанотрубки (полусфера фуллерена, полиеновое кольцо, nanoостровок на поверхности кристаллита-основы, частица катализатора и др.), воспроизводить выбранный процесс роста (с открытого конца НТ или путем "встраивания" атомов в стенку трубы; рост открытой или замкнутой НТ), описывать способ прекращения роста нанотрубок и т. д. Ряд моделей достаточно подробно описан в обзорах [1, 2]. В качестве примера рассмотрим более подробно механизмы роста однослойных углеродных нанотрубок на полиеновых кольцах и полусфере фуллерена [24, 25] путем сорбции мономеров углерода С, димеров С₂, тримеров С₃ или их смешанного набора.

Полиеновые кольца были обнаружены при лазерной абляции графита. На первой стадии плоское углеродное кольцо в присутствии катализатора (например, карбида кобальта Co_mC_n) в плазме испытывает искажения транс- или цис-типа (рис. 7). А затем в процессе присоединения (краевой абсорбции) С, С₂ или С₃ данные формы колец генерируют разнообразный спектр цилиндрических наноструктур (рис. 8). В работе [24] приведены результаты полуэмпирических квантовомеханических MNDO-расчетов [26, 27] электронного строения и энергетических характеристик роста открытых нанотрубок, опирающихся на полиеновые кольца транс- или цис-типа. Исследовались раз-

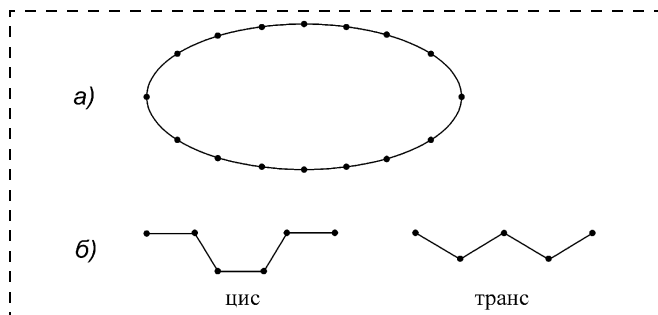


Рис. 7. Модель полиенового кольца (а) и его возможные искажения (б)

личные способы получения первых двух рядов гексагонов, растущих в процессе краевой абсорбции нанотрубок.

Анализ полученных результатов обнаружил, что наименьшей энергией связи обладает кластер с присоединяемым димером или тримером углерода. Энергия связи последующих соединений углерода оказывается существенно большей, чем первичное присоединение. Это свидетельствует о том, что поляризация полиенового кольца первичным кластером ведет к повышению эффективности процессов сорбции.

Справедливо предположить, что подобные результаты могут быть получены при рассмотрении процесса роста открытых нехиральных однослойных нанотрубок, прекурсорами роста которых будет служить либо графеновый лист, свернутый в кольцо, либо полусфера фуллерена, края которой будут ана-

логичны полиеновому кольцу. В работе [25] представлены результаты подобных исследований.

Следует отметить, что синтез однослойных углеродных тубуленов — это существенно каталитический процесс. Однако пока мало известно о влиянии этих веществ-катализаторов на кинетику роста нанотрубок и нет однозначных рекомендаций по использованию тех или иных металлов в качестве эффективных катализаторов. С целью приближения к решению этой проблемы в [25] были выполнены MNDO-исследования процессов роста нанотубулена типа (6, 6) на основе полусферы фуллерена в присутствии различных катализаторов для выяснения их влияния на скорость роста трубки. В качестве катализаторов были выбраны элементы: литий Li, натрий Na, магний Mg, алюминий Al, кремний Si, калий K, кальций Ca, цинк Zn и галлий Ga. Атом-катализатор помещался внутрь кластера на основе полусферы, содержащего 72 атома углерода (рис. 9), который в присутствии данного атома можно считать фрагментом эндоэдрального фуллерена. Атом дефекта представляет собой квантовую точку в структуре изучаемого кластера на основе полуфуллерена, которая изменяет поляризацию (зарядовое распределение) углеродного базиса, а следовательно, влияет на процессы зарождения и дальнейшего роста нанотубулена. Для моделирования процесса роста первого гексагонового ряда углеродной нанотрубки (6, 6)-типа к полученной базисной основе в присутствии катализатора последовательно присоединялись димеры углерода C_2 . Квантово-химические расчеты позволили определить, какие элементы целесообразнее исполь-

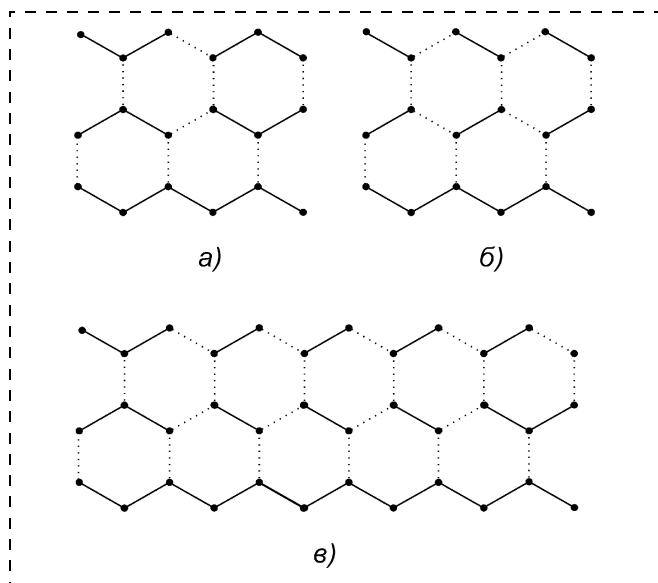


Рис. 8. Способы образования двух первых слоев гексагонов нанотрубок трансформы типа (6, 0) путем присоединения: а — тримеров C_3 ; б — димеров C_2 ; в — набора $2(C_3 + 4C_2 + C)$

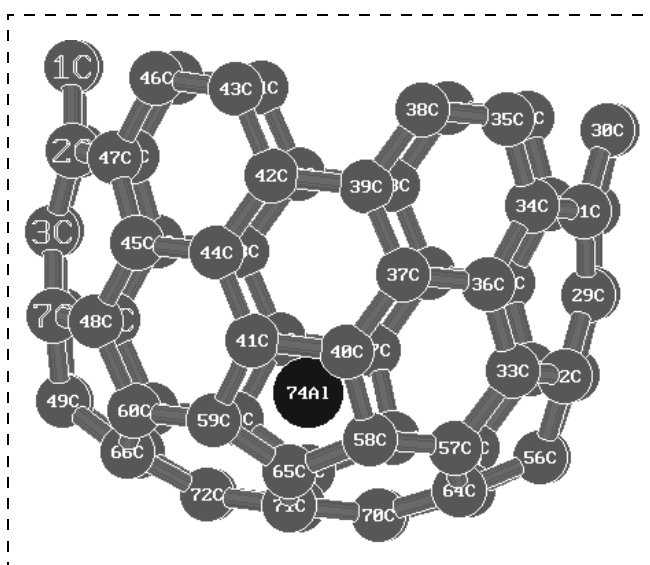


Рис. 9. Геометрическая модель кластера на основе полусферы фуллерена с внедренным атомом алюминия; цифрами отмечены номера атомов в модели молекулярного кластера (используются при расчетах)

зовать в качестве катализаторов роста нанотрубок. Был получен следующий ряд приоритетов по наибольшей суммарной энергии абсорбции димеров углерода: Si, K, Mg, Na, Li, Zn, Ca, Al, Ga. Как оказалось, наибольшее влияние на кинетику роста тубуленов оказывает атом кремния. Алюминий и галлий оказались наиболее слабыми катализаторами в выбранном ряду элементов, их каталитические способности примерно на 40—45 % ниже, чем у остальных веществ.

В работе [28] рассмотрены модели зарождения графеновых нанотрубок из углерода и нитрида бора на кристаллах алмаза. Необходимым условием зарождения однослойной трубы является наличие наноостровка, а многослойной нанотрубы — наличие (111)-террас на вершине кристаллита. Превращение фазы высокого давления в наиболее стабильную в процессе нагрева алмаза начинается, в первую очередь, на дефектах поверхности. Поэтому, если один или несколько атомов на поверхности (111) закрыты атомами углерода (или другого элемента, например, H или N), то вокруг них будет формироваться цилиндрическая графитовая поверхность — нанотруба. Она опирается на охватывающую такой островок замкнутую цепочку углеродных атомов. На одной площадке (111) могут вырастать несколько однослойных труб вокруг нескольких наноостровков. Многослойная труба может образовываться только на кольцах "зародышевых" атомов, принадлежащих разным плоскостям (111) террасовой структуры алмаза, образующейся вблизи вершины нанокристалла при нагреве до 2000 К в процессе отжига. Аналогичным образом будет происходить зарождение BN-нанотруб на вершине частицы из кубического нитрида бора.

3. Строение и электропроводность

Для создания электронных устройств и их объединения в сложные приборы требуются полупроводники и материалы с высокой электропроводностью. Нанотрубки с разными значениями индексов (n , m) — это полимеры разного строения, а потому они должны обладать разными электрическими свойствами. Зависимости электрических свойств НТ от геометрических параметров были предсказаны на основе квантово-химических расчетов их зонной структуры еще до экспериментального исследования нанотрубок.

Углеродные нанотрубки — это сопряженные ароматические системы, в которых три из четырех валентных электронов каждого углерода образуют sp^2 -гибридные орбитали и локализованные σ -связи C—C, а четвертый электрон участвует в образовании делокализованной π -системы. Эти π -элек-

троны слабо связаны со своими атомами, поэтому именно они участвуют в переносе заряда в системе. Металлическая проводимость должна появиться, если занятые состояния не отделены энергетической щелью от вакантных состояний. В противном случае нанотрубка является полупроводником, если щель малая, или диэлектриком при большой щели. Расчеты, выполненные в 1992 г., показали, что металлическим типом зонной структуры обладают те УНТ, для которых разность $n - m$ кратна трем. Остальные нанотрубки должны быть полупроводниками с шириной запрещенной зоны от нескольких десятых до примерно одного электрон-вольта, возрастающей с уменьшением диаметра нанотрубки [29—31]. Потребовалось шесть лет, чтобы квантово-химический прогноз подтвердился экспериментально.

Самый простой способ определения электрических свойств нанотрубок состоит в использовании сканирующего туннельного микроскопа (СТМ). С помощью острия СТМ удается подцепить одну НТ и вытянуть ее из массива (рис. 10). Нанотрубка при этом удерживается на острие за счет сил Ван-дер-Ваальса. Теперь к острию микроскопа и массиву нанотрубок, расположенному на проводящей подложке, можно приложить напряжение и измерить ток в цепи. Окончательно вопрос о зависимости между геометрической и электронной структурами НТ был решен методами сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии. Для индивидуальных нанотрубок удалось определить и атомную структуру (геометрию — по топографическим изображениям), и электропроводность (по зависимости тока через нанотрубку от напряжения смещения) (рис. 11). В полупроводниковых НТ ширина запрещенной зоны оказалась обратно пропорциональна диаметру нанотрубки (рис. 12).

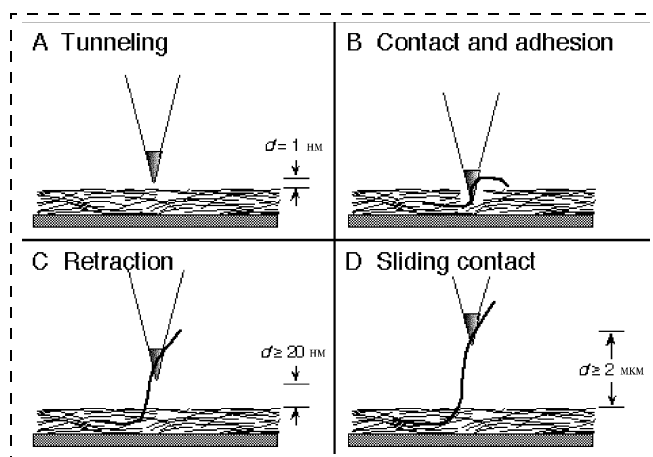


Рис. 10. Схема измерения электропроводности нанотрубки с помощью острия сканирующего туннельного микроскопа

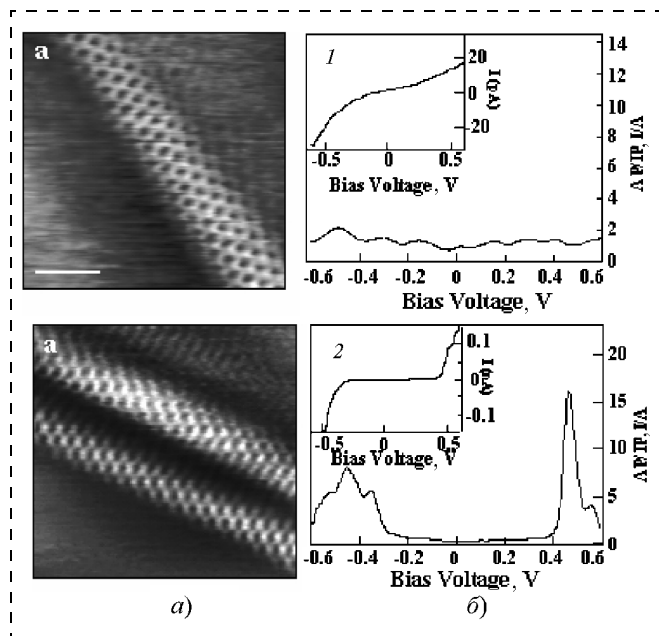


Рис. 11. Изображения нанотрубок (а), полученные сканирующим туннельным микроскопом; плотность электронных состояний в области уровня Ферми (б) и зависимость тока I от напряжения смещения V (вставка):

1 — металлическая нанотрубка; 2 — полупроводниковая нанотрубка

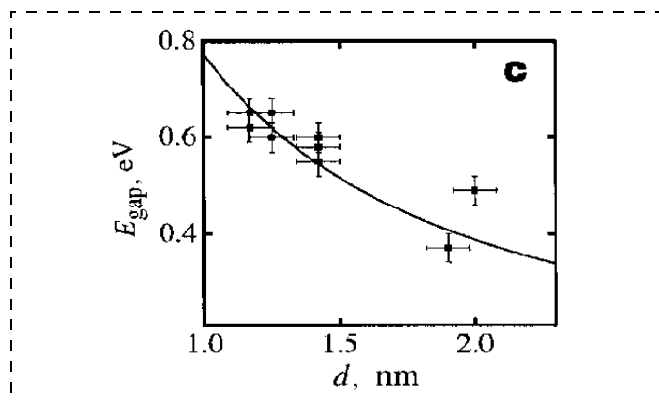


Рис. 12. Зависимость ширины запрещенной зоны от диаметра полупроводниковой нанотрубки

4. Основные области применения нанотрубок

Еще в 1992—1993 гг. определились основные потенциальные области применения нанотрубок. Необычные электрические свойства тубуленов делают их одним из основных материалов наноэлектроники. Нанотрубки демонстрируют целый спектр самых неожиданных электрических, магнитных, оптических свойств. Например, в зависимости от конкретной схемы сворачивания графитовой плоскости НТ могут быть и проводниками, и полупроводниками. В них наблюдается и сверхпроводимость. В то время как проводимость обычного провода обратно пропорциональна его длине и прямо

пропорциональна поперечному сечению, для нанотрубки она не зависит ни от ее длины, ни от ее диаметра и равна кванту проводимости — предельному значению проводимости, которое отвечает свободному переносу электронов, делокализованных по всей длине проводника.

На основе углеродных нанотрубок создают электронные устройства нанометрового размера. Ожидается, что в ближайшем будущем они заменят элементы аналогичного назначения в электронных схемах различных приборов, в том числе современных компьютеров. В результате будет достигнут теоретический предел плотности записи информации (порядка одного бита на молекулу), и вычислительные машины обретут практически неограниченную память и быстродействие, лимитируемое только временем прохождения сигнала через прибор.

Уже сейчас созданы опытные образцы полевых транзисторов на основе НТ: прикладывая запирающее напряжение в несколько вольт, можно изменять проводимость однослойных нанотрубок на пять порядков. Важное применение в наноэлектронике — создание гетероструктур, т. е. структур типа "металл — полупроводник" на стыке двух разных нанотрубок. Все, что требуется, это в процессе роста трубки создать в ней структурные дефекты, например, заменить некоторые из углеродных шестиугольников на пятиугольники и семиугольники. Тогда одна часть НТ может быть металлической, а другая — полупроводящей, а сама нанотрубка будет изогнута (рис. 13). Если рассматривать данные части изолированно, то с разных сторон относительно изгиба электроны на уровне Ферми обладают разной энергией. В единой системе выигрыш энергии приводит к перетеканию заряда и образованию потенциального барьера (барьера Шоттки), высота которого равна примерно половине ширины запрещенной зоны полупро-

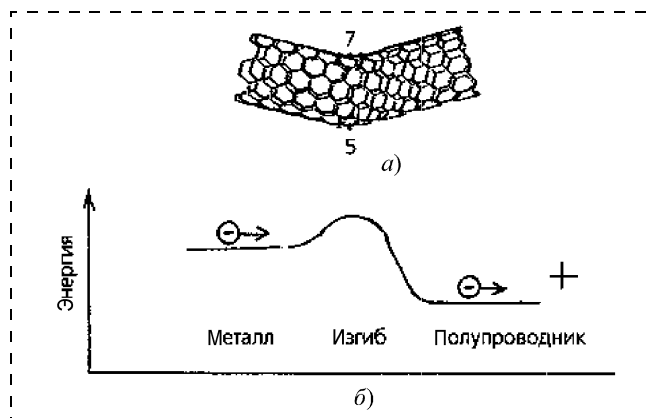


Рис. 13. Влияние дефекта "семиугольник-пятиугольник" на геометрию нанотрубки (а) и энергию подвижных электронов (б)

водниковой нанотрубки. Электрический ток в таком переходе течет только в том случае, если электроны перемещаются из области нанотрубки с большей энергией Ферми в область с меньшей энергией. Иначе говоря, ток может течь только в одном направлении. Впервые такое одностороннее прохождение тока было замечено при измерениях электропроводности нанотрубок с помощью острия сканирующего туннельного микроскопа еще без контроля геометрии НТ. "Одностороннее" прохождение тока через нанотрубку с изгибом используется для создания выпрямляющего диода.

Углеродные нанотрубки могут быть полезны и для создания дисплеев нового поколения, работа которых основана на эффекте эмиссии электронов под действием электрического поля. УНТ обладают высокими эмиссионными характеристиками. Это определяется, в первую очередь, тем, что благодаря высокому аспектному отношению L/R , где L — межэлектродное расстояние, R — радиус сферической "шапки" тубулена, электрическое поле в окрестности нанотрубки в сотни раз превышает среднее по объему значение отношения падения напряжения к длине межэлектродного промежутка. В результате эмиссионные свойства нанотрубок проявляются при существенно более низких значениях приложенного напряжения по сравнению с традиционно используемыми автоэмиссионными катодами, изготовленными на основе макроскопических металлических острий. Эмиссионные свойства нанотрубок детально описаны в обзоре [6].

В настоящее время созданы и опробованы прототипы тонких плоских дисплеев, работающих на матрице из НТ. Под действием напряжения, прикладываемого к одному из концов трубки, с другого конца испускаются электроны, которые попадают на фосфоресцирующий экран и вызывают его свечение. Получающееся при этом зерно изображения может быть чрезвычайно малым: порядка микрометра. Холодные эмиттеры на нанотрубках — ключевой элемент плоского телевизора будущего, они заменят горячие эмиттеры современных электронно-лучевых трубок и позволят избавиться от гигантских и небезопасных разгонных напряжений в 20—30 кВ.

Однако традиционные теоретические подходы для описания эмиссионных свойств эмиттеров [6] не вполне применимы для нанотрубок. Это связано с тем, что НТ-эмиттеры содержат тубулярные элементы с различными структурными параметрами и, соответственно, различными электронными структурами. Последовательного теоретического описания материала, составленного из большого числа трубок, пока нет. Однако теоретические расчеты свойств одиночных, закрытых фуллереновыми "крышками", нанотрубок, являющихся источ-

никами автоэлектронной эмиссии, выполняются. Так, авторами работы [32] выполнены исследования электронно-энергетических характеристик однослойных полубесконечных тубуленов. Установлено, что для них сохраняется тенденция уменьшения ширины запрещенной зоны по мере увеличения диаметра нанотрубки. Расчеты показали, что уровни молекулярных орбиталей группируются в валентную зону и зону проводимости, разделенные запрещенной энергетической щелью. Дно зоны проводимости составлено из молекулярных орбиталей (МО), основной вклад в которые дают энергетические уровни, соответствующие $2p$ -атомным орбиталям (АО) атомов углерода крышек полубесконечных тубуленов. Состояниям валентной зоны отвечают МО, вклад в которые вносят $2s$ - и $2p$ -АО атомов С всего тубулена, а "потолок" валентной зоны выполнен из $2p$ -АО атомов С цилиндрической трубки. Анализ зарядового распределения закрытых тубуленов обнаружил, что в отличие от бесконечной НТ с нулевыми зарядами на атомах С, атомы крышки тубулена, соответствующие плоскому верхушечному гексагону, имеют некоторый заряд (порядка 0,2). Этот заряд уменьшается при переходе к цилиндрической поверхности нанотрубки вплоть до нулевого значения. Такая зарядовая неоднородность верхушки тубулена и является одним из основных факторов усиления электрического поля вблизи нее.

Нанотрубка может использоваться как острие сканирующего туннельного или атомного силового микроскопа [11—16]. Обычно такое острие представляет собой остро заточенную вольфрамовую иглу, но по атомным меркам такая заточка все равно достаточно грубая. Нанотрубка же представляет собой идеальную иглу диаметром порядка нескольких атомов. Исключительно большое отношение длины к диаметру НТ позволяет изучать с помощью такого микроскопа, например, структуру глубоких трещин в микроэлектронных устройствах. Благодаря способности нанотрубки упруго складываться при механической нагрузке такое острие оказывается достаточно устойчивым по отношению к механическому разрушению, и в то же время его давление на исследуемую поверхность ограничено, что может быть особенно важно при изучении биологических систем.

Совершенно новые возможности открываются при использовании в атомно-силовой микроскопии химически модифицированных НТ со специально подобранными функциональными группами на конце острия (рис. 14). В этом случае удастся исследовать не только рельеф поверхности исследуемого образца, но и химический состав поверхности. С помощью нанотрубок, прикладывая определенное напряжение, можно подхватывать ато-

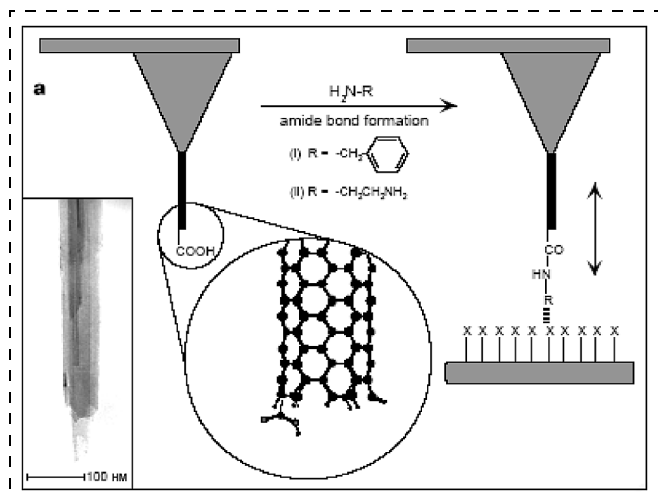


Рис. 14. Нанотрубка с функциональной химической группой как острое кантилевера сканирующего атомно-силового микроскопа; показано движение острия при определении энергии взаимодействия (адгезии) функциональной группы с поверхностью образца

мы и целые молекулы, находящиеся на подложке непосредственно под иглой, и переносить их с места на место.

Целый класс возможных применений нанотрубок связан с заполнением их внутренних полостей теми или иными веществами. Так, было продемонстрировано использование НТ в качестве хранилища для газообразного водорода [17]. Механизм заполнения однослойной УНТ атомарным водородом будет рассмотрен ниже. Промышленная реализация этой разработки поможет созданию экологически безопасного автомобиля на водородном топливе. Известен ряд исследований по применению НТ в качестве пористого материала в фильтрах, в аппаратах химической технологии и т. п.

В нанотрубки можно буквально вливать вещество. Как показали эксперименты, открытая НТ обладает капиллярными свойствами, т. е. она как бы втягивает в себя вещество [17]. Таким образом, нанотрубки можно использовать как микроскопические контейнеры для перевозки химически или биологически активных веществ: белков, ядовитых газов, компонентов топлива и даже расплавленных металлов. Концы нанотрубок могут быть надежно запаены, и в таком виде активные атомы или молекулы можно безопасно транспортировать. В месте назначения НТ раскрывают с одного конца и выпускают их содержимое в строго определенных дозах. Не исключено, что на базе этой технологии будет проводиться лечение заболеваний: например, больному вводят заранее приготовленные нанотрубки с биологически активными веществами, эти НТ собираются в определенном месте организма некими микроскопическими механизмами и вскрываются в определенный момент времени.

Современная технология уже практически готова к реализации такой схемы.

Наконец, возможно применение нанотрубок в качестве очень прочных микроскопических стержней и нитей. Обычно длина НТ составляет десятки и сотни микрометров, однако длина нанотрубок, получаемых в лаборатории, постепенно увеличивается и уже описан синтез многослойной НТ длиной в 2 мм. Можно надеяться, что в будущем научатся выращивать нанотрубки длиной в сантиметры и более. Это сильно повлияет на будущие технологии: трос тоньше человеческого волоса, способный удерживать груз в сотни килограмм, найдет бесчисленное множество применений.

Отметим, что пока углеродные нанотрубки довольно дорогой материал. Например, в 2003 г. американская компания *Carbon Nanotechnologies*, производящая нанотрубки для IBM и различных исследовательских институтов, могла получать всего 0,5–1 кг материала в день и продавала их по цене 500 долл. за грамм. В 2005 г. планируется довести производство однослойных УНТ до 45 кг за смену и приступить к строительству полномасштабного коммерческого производства, что позволит получать до полутонны нанотрубок в смену, что неизбежно приведет к их резкому удешевлению.

5. Основные механизмы заполнения углеродных нанотрубок атомарным водородом

Как уже отмечалось, углеродные нанотрубки могут быть использованы в качестве водородопоглощающих материалов. УНТ имеют чисто поверхностную структуру, что позволяет использовать их как объект для заполнения газообразным веществом посредством поверхностной физической сорбции. Тем самым количество поглощенного вещества оказывается пропорциональным поверхности данной структуры. Кроме того, УНТ обладают внутренней полостью, которая при благоприятных условиях может быть обратимо заполнена газообразным водородом. В этом случае имеет место не только поверхностная сорбция газа, но также объемное заполнение полости, поэтому степень заполнения материала газообразным веществом может значительно превышать значение, которое достигается в случае поверхностной адсорбции.

Выполненные к настоящему времени теоретические квантово-химические исследования доказали возможность эффективной множественной адсорбции атомарного водорода на внутренней и внешней поверхностях углеродных нанотрубок [33–39]. Эти теоретические исследования подтверждаются серией опубликованных в последние годы экспериментальных результатов, сообщающих о высокой степени заполнения углеродных наноструктур водородом [40–42].

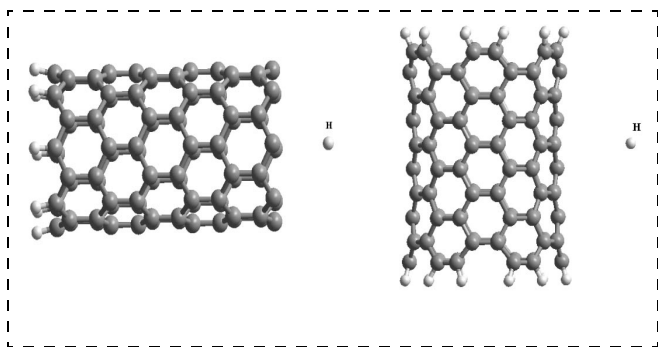


Рис. 15. Модель процесса проникновения атома водорода в углеродную нанотрубку (8, 0) "капиллярным" способом (а) и в нанотрубку (6, 6) методом "просачивания" (б)

Однако следует отметить, что до сих пор до конца не выяснен механизм заполнения внутреннего объема углеродных нанотрубок атомами водорода. Можно предложить два способа внедрения адсорбирующихся атомов внутрь УНТ: 1) "капиллярный" — когда внедряющийся атом проникает внутрь трубки через ее торцевое отверстие (рис. 15, а); 2) внедрение путем "просачивания" — когда внедряющийся атом проникает внутрь трубки через боковую поверхность тубулена (рис. 15, б) [43].

В работе [43] рассмотрены молекулярные кластеры нанотрубок типа "zig-zag" (n, n) и типа "arm-chair" ($n, 0$), $n = 6, 8$, обладающие цилиндрической симметрией. Внутри трубок внедрялся атом водорода Н, причем в случае 1 он проходил через центр торцевого отверстия НТ, а в случае 2 — через середину поверхностного гексагона. В результате выполненных MNDO-расчетов были построены профили поверхности потенциальной энергии процессов проникновения атома Н в нанотрубки выбранных типов (рис. 16) и определены потенциальные барьеры,

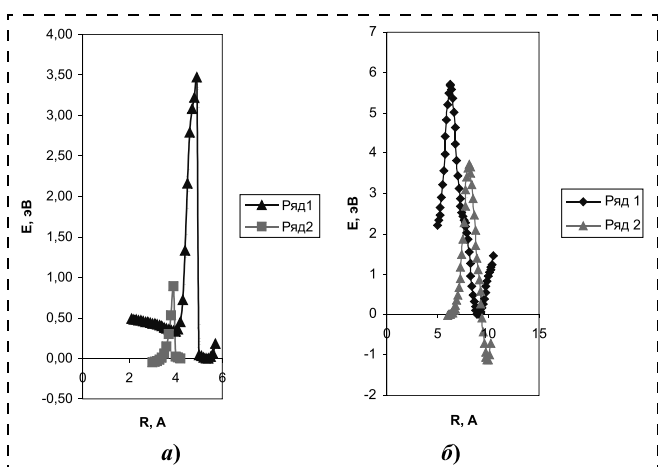


Рис. 16. Профили поверхности потенциальной энергии процесса внутреннего насыщения углеродной НТ:

а — "капиллярный" метод; ряд 1 — для НТ (6, 6); ряд 2 — для НТ (8, 0); б — метод "просачивания"; ряд 1 — для НТ (8, 0); ряд 2 — для НТ (6, 6)

еры, которые преодолевает атом при внедрении. Исследованы способы преодоления барьера Н-атомом: классический и квантовый (туннелирование). Определены основные энергетические характеристики этих процессов.

Было установлено, что для трубок "zig-zag" наиболее эффективным способом насыщения является "капиллярный" способ. Для НТ "arm-chair" энергетически более эффективно насыщение путем "просачивания". Расчеты показали, что для "капиллярного" способа заполнения НТ наиболее вероятным оказывается процесс классического преодоления потенциального барьера атомами водорода. При этом наиболее устойчивым является размещение проникающего в трубку атома Н в центре тубуленов на главной продольной оси.

6. Протонная проводимость однослойных углеродных нанотрубок

Одним из направлений развития современных физики и химии является поиск твердых электролитов с протонной проводимостью. Перспективы их практического применения чрезвычайно интересны [44]. Так, на основе подобных веществ созданы высокоэффективные топливные элементы, использующие реакцию окисления водорода, электролизеры водяного пара, высокочувствительные сенсоры на водород и некоторые другие газы и т. д. Все это предопределило широкое развитие работ в области поиска и исследования новых твердых протонпроводящих материалов.

Как уже указывалось, углеродные нанотрубки имеют непрерывную сетку π -связей, которые способствуют переносу заряда. Кроме того, УНТ — хорошие аккумуляторы различных газов, в частности водорода. В связи с этим можно предположить, что нанотрубки могут являться материалами, имеющими протонную проводимость. В работах [45, 46] рассмотрены возможные механизмы миграции протона по внешней поверхности однослойной углеродной нанотрубки (ОНТ). В качестве объекта исследований выбирали ОНТ типов (n, n) и ($n, 0$), $n = 6$ и 8. Расчеты выполняли в рамках модели ионно-встроенного ковалентно-циклического кластера (ИВ-КЦК) [47] с использованием адаптированной схемы MNDO. Рассмотрены два варианта (механизма) миграции одиночного протона H^+ вдоль поверхности ОНТ между двумя стационарными состояниями адсорбированной частицы: 1) "прыжковый" механизм, когда H^+ движется от одного атома углерода поверхности до другого над двумя следующими друг за другом гексагонами (путь I на рис. 17); 2) "эстафетный" механизм, когда H^+ перемещается от одного атома С до другого вдоль соединяющей их связи (путь II на рис. 17).

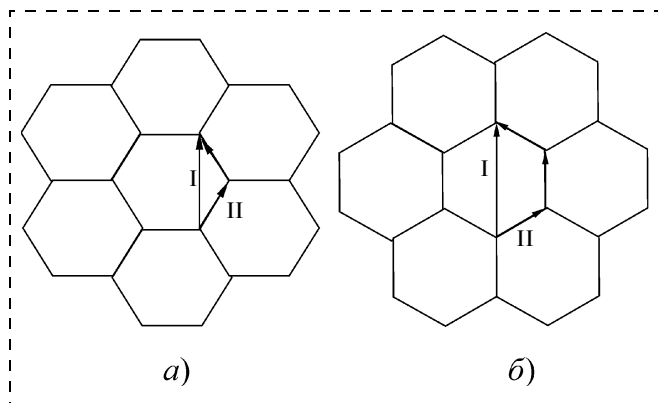


Рис. 17. Варианты миграции протона по поверхности НТ: а — "arm-chair"; б — "zig-zag"

Для обоих вариантов построены кривые потенциальных энергий процессов миграции протона от одного атома углерода до другого (рис. 18) с использованием метода координаты реакции. Расстояния между протоном H^+ и поверхностью трубки в начальном и конечном состояниях (над опорными атомами углерода поверхности нанотрубки) были выбраны равными (0,11 нм), что соответствует оптимальному для данного расчетного метода расстоянию адсорбции атомарного водорода на поверхности нанотубулена [39]. В качестве координаты реакции R было выбрано расстояние между протоном и точкой, соответствующей конечному

стационарному состоянию частицы на поверхности ОНТ.

Ион H^+ двигался к конечной точке миграции путем пошагового приближения с изменением координаты реакции на значение $\Delta R = 10^{-3}$ нм. Частица (H^+) имела две степени свободы в двух взаимно ортогональных направлениях, ортогональных также и направлению движения протона. В процессе миграции H^+ геометрия поверхности нанотрубки оптимизировалась на каждом шаге.

Установлено, что во всех случаях на потенциальной кривой имеется максимум, который отождествляется с энергией активации E_a (потенциальный барьер) (см. рис. 18). За ноль энергии принималась энергия начального стационарного состояния комплекса "нанотрубка — ион H^+ ". Полученные значения E_a позволяют рассчитывать температурную зависимость относительной протонной проводимости на внешней поверхности тубулена по известной формуле [48]

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right).$$

Выполненные исследования протонной проводимости доказали возможность реализации двух предложенных механизмов миграции H^+ для трубки (6, 6); для $(n, 0)$ тубуленов, рассмотренных в работах [45, 46], более вероятным является "прыжковый" механизм переноса протона.

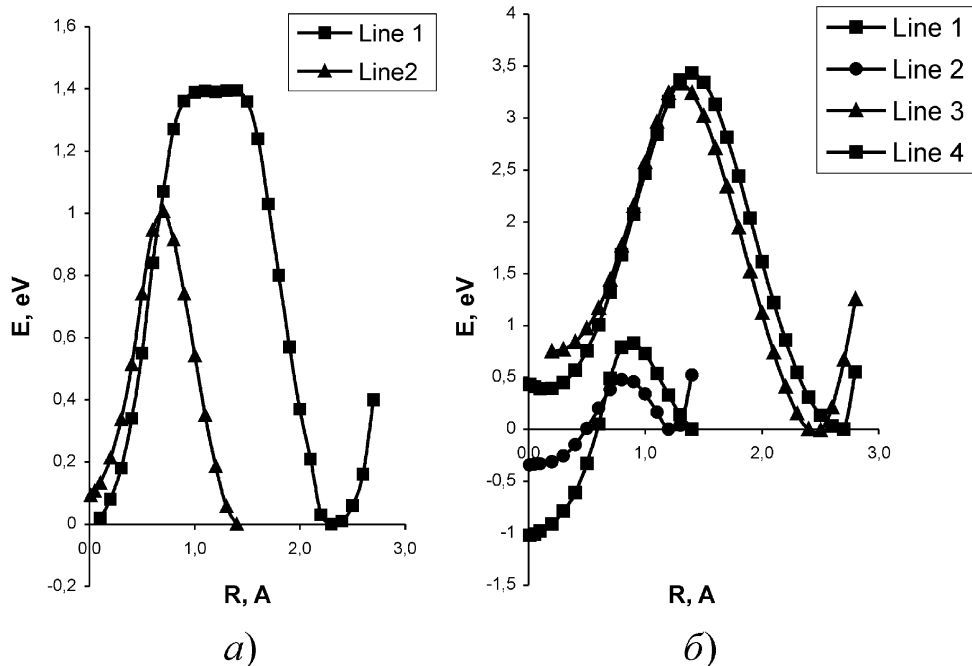


Рис. 18. Зависимость потенциальной энергии от расстояния на пути протона от одного атома С поверхности УНТ до другого:

а — трубка (6, 6); кривая 1 — путь I; кривая 2 — путь II; б — трубка (6, 0); кривая 1 — путь I; кривая 2 — путь II; трубка (8, 0); кривая 3 — путь I; кривая 4 — путь II

Заклучение

За время, прошедшее с момента открытия углеродных нанотрубок, учеными и исследователями пройден большой путь. В числе наиболее значимых открытий на этом пути можно назвать открытие многослойных, а затем и однослойных нанотрубок, установление связи между структурными и электронными характеристиками тубуленов, открытие различных способов получения нанотрубок, в том числе и неуглеродных, открытие явления капиллярности и возможности заполнения нанотрубок атомами и молекулами различных веществ, открытие автоэлектронной эмиссии нанотрубок, создание многих приборов для нанoeлектроники, в том числе диодов, транзисторов, резисторов, создание макетного образца плоского дисплея с холодным катодом на основе углеродных нанотрубок, получение однослойных нанотрубок, заполненных по длине фуллеренами, и т. д. На наших глазах произошел переход от описания протяженных нанотубулярных объектов к созданию надежно работающих уникальных устройств на основе нанотрубок. Это еще раз доказывает важную роль фундаментальных исследований, развитие которых приводит к быстрому прогрессу прикладных технологий.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-03-96501).

Список литературы

1. Dresselhaus M. S., Dresselhaus G., Eklund P. S. Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes. Academic Press, Inc. 1996. 965 p.
2. Saito R., Dresselhaus M. S., Dresselhaus G. Physical properties of carbon nanotubes. Imperial College Press, 1999. 251 p.
3. Ивановский А. Л. Квантовая химия в материаловедении. Нанотубулярные формы вещества. Екатеринбург: Изд. УРОАН, 1999. 176 с.
4. Лозовик Ю. Е., Попов Ю. Е. // Успехи физических наук. 2003. 165. С. 752.
5. Елецкий А. В. // Успехи физических наук. 2000. 170. С. 113.
6. Елецкий А. В. // Успехи физических наук. 2002. 172. С. 401.
7. Запороцкова И. В. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. ВолГУ, Волгоград. 1997. 178 с.
8. Харрис П. Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века. М.: Техносфера, 2003. 336 с.
9. Reich S., Thomsen C., Maultzsch J. Carbon nanotubes. Basic concepts and physical properties. Berlin: Wiley-VCH Verlag, 2003. 218 p.
10. Захарова Г. С., Волков В. Л., Ивановская В. В., Ивановский А. Л. Нанотрубки и родственные наноструктуры оксидов металлов. Екатеринбург. 2005. 240 с.
11. De Heer W. A., Chatelain A., Ugarte D. // Science. 1995. 270. P. 1179.
12. Fransen M. J., van Rooy Th. L., Kruit P. // Appl. Surf. Sci. 146. 1999. P. 312.
13. Chen Y., Shaw D. T., Guo L. // Appl. Phys. Lett. 2000. 76. P. 2469.
14. Collins P. G., Zettl A. // Phys. Rev. 1997. B55. P. 9391.
15. Kuttel O. M. // Appl. Phys. Lett. 1998. 73. P. 2113.
16. Bonard J.-M. et al. // Appl. Phys. Lett. 1998. 73. P. 918.
17. Елецкий А. В. // Успехи физических наук. 2004. 174. С. 1191.
18. Han J., Anantran M. P., Jaffe R. L., Kong J., Dai H. // Phys. Rev. 1998. B57. P. 14983.
19. Iijima S. // Nature. 1991. 354 P. 56.
20. Dillon A. C. // Nature. 1997. 386. P. 377.
21. Dillon A. C. // Fullerenes. 1999. 3. P. 716.
22. Ajiyan P. M., Ebbesen T. W., Ichihashi T., Iijima S., Tanigaki K., Hiura H. // Nature. 1993. 362. P. 522.
23. Tsang S. C., Chen J. K., Harris P. J. F., Green M. L. N. // Nature. 1994. 372. P. 159.
24. Запороцкова И. В., Лебедев Н. Г. Чернозатонский Л. А. // Журнал физической химии. 2003. 77. № 3. С. 496.
25. Запороцкова И. В., Лебедев Н. Г. Чернозатонский Л. А. // Журнал физической химии. 2003. 77. № 12. С. 2254.
26. Dewar M. J. S., Thiel W. // J. Amer. Chem. Soc. 1977. 99. P. 4899.
27. Dewar M. J. S., Thiel W. // Theoret. Chim. Acta. 1977. 46. P. 89.
28. Lebedev N. G., Zaporotskova I. V., Chernozatonskii L. A. // Hydrogen materials science and chemistry of carbon nanomaterials. NATO Science Ser. II Mathematics, Physics and Chemistry. 2004. 172. P. 259.
29. Mintmire J. W., Dunlap B. I., White C. T. // Phys. Rev. Lett. 1992. 68. P. 631.
30. Saito R., Fujita M., Dresselhaus M. S., Dresselhaus G. // Phys. Rev. 1992. B46. P. 1804.
31. Mintmire J. W., White C. T. // Carbon. 1995. 33. P. 893.
32. Запороцкова И. В., Литинский А. О., Лебедев Н. Г., Чернозатонский Л. А. // Вестник ВолГУ. Серия: Математика. Физика. 1998. Вып. 3. С. 147.
33. Запороцкова И. В., Литинский А. О., Чернозатонский Л. А. // Письма в ЖЭТФ. 1997. 66. № 12. С. 799.
34. Zaporotskova I. V., Lebedev N. G., Chernozatonskii L. A. // Int. Journ. Quant. Chem. 2004. 96. N 2. P. 149.
35. Lebedev N. G., Zaporotskova I. V., Chernozatonskii L. A. // Fullerenes, nanotubes and carbon nanostructures. 2004. 12. N 1. P. 443.
36. Lebedev N. G., Zaporotskova I. V., Chernozatonskii L. A. // Int. Journ. Quant. Chem. 2004. 100. N 4. P. 548.
37. Lebedev N. G., Zaporotskova I. V., Chernozatonskii L. A. // Hydrogen materials science and chemistry of carbon nanomaterials. NATO Science Ser. II Mathematics, Physics and Chemistry. 2004. 172. P. 243.
38. Chernozatonsky L. A., Lebedev N. G., Zaporotskova I. V., Lilinskii A. O., Gal'pern E. G., Stankevich I. V., Chistyakov A. L. // Adsorption Science and Technology. Brisbane, Australia, 14—18 May 2000. P. 125.
39. Запороцкова И. В., Литинский А. О., Чернозатонский Л. А. // Письма в ЖЭТФ. 1997. 66. С. 799.
40. Dillon A. C. // Nature. 1997. 386. P. 377.
41. Dillon A. C. // Fullerenes. 1999. 3. P. 716.
42. Ye Y. // Appl. Phys. Lett. 1999. 74. P. 2307.
43. Zaporotskova I. V., Lebedev N. G., Chernozatonskii L. A. // Abstracts of 5-th Session of the V. A. Fock School on Quantum and Computational Chemistry. 1-st All-Russian Meeting on Electronic Structure of Nanomaterials. Novgorod the Great. 2002. P. 16.
44. Ярославцев А. Б. // Успехи химии. 1994. 63. С. 449.
45. Zaporotskova I. V., Lebedev N. G. // Abstracts of 6-th Session of the V. A. Fock School on Quantum and Computational Chemistry. Novgorod the Great, 12—17 May 2003. P. 764.
46. Запороцкова И. В., Лебедев Н. Г. // Тезисы Всероссийской конференции "Химия твердого тела и функциональные материалы", Екатеринбург, УРО РАН, 25—28 октября. 2004. С. 143.
47. Литинский А. О., Лебедев Н. Г., Запороцкова И. В. // Журнал физической химии. 69. № 1. С. 215.
48. Павлов П. В., Хохлов А. Ф. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 2000. 494 с.

УДК 621.3

А. В. Завьялов, канд. техн. наук,
Федеральный фонд развития электронной
техники, г. Москва,
Н. Г. Коломенская, канд. экон. наук,
Е. Д. Молчанова,
ОАО "РНИИ "Электронстандарт",
г. Санкт-Петербург, NGK@elstandart.spb.ru

СВЕРХБОЛЬШИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ТИПА "СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ" И СЛОЖНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ БЛОКИ: ОСНОВНЫЕ НЮАНСЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

Дан обзор нормативных документов в области сверхбольших интегральных схем типа "система на кристалле" и сложных функциональных блоков, разработанных в рамках Федеральной целевой программы "Национальная технологическая база", отражены некоторые спорные моменты и проблемы в стандартизации данной области.

В настоящее время при постоянном увеличении темпов развития микроэлектроники требования к электронной аппаратуре становятся все более жесткими. В связи с этим аппаратостроители и схемотехники сталкиваются с проблемами микроминиатюризации аппаратуры, сокращения межэлементных соединений, числа дискретных элементов и т. д.

Решить эти проблемы может проектирование сложной функционально законченной части аппаратуры непосредственно на одном кристалле в составе единой микросхемы — сверхбольшой интегральной схемы типа "система на кристалле" (СБИС СНК).

Наилучшие технические и экономические показатели имеют СБИС СНК на основе сложных функциональных (СФ) блоков — виртуальных изделий, полученных на основе компьютерного моделирования (проектирования) функциональных электронных компонентов.

По существу СБИС СНК является заказной микросхемой, и основные затраты приходятся на создание системы проектирования и распространения СФ блоков. Основное преимущество данного подхода проектирования в том, что срок создания СБИС СНК минимален, а каждый изготов-

ленный блок может быть использован во многих изделиях.

На данный момент одной из проблем в области СБИС СНК и СФ блоков является отсутствие нормативной базы. Отсюда вытекают разногласия в терминологии, одни и те же понятия разработчиками интерпретируются по-разному.

В этой статье приведены наиболее острые вопросы, возникшие при разработке проектов нормативных документов, устанавливающих термины и определения СБИС СНК и СФ блоков, классификацию СФ блоков и порядок создания СБИС СНК на основе СФ блоков. Авторы надеются на заинтересованность специалистов микроэлектроники в обсуждении данной темы.

Специалистами ОАО "РНИИ "Электронстандарт" в рамках Федеральной целевой программы "Национальная технологическая база" разрабатывались проект "Программа стандартизации СБИС типа "система на кристалле" и сложных функциональных блоков" и три проекта стандартов, выполненных в соответствии с этой программой: "Микросхемы интегральные. Сверхбольшие интегральные схемы типа "система на кристалле" и сложные функциональные блоки. Термины и определения", "Сложные функциональные блоки. Классификация и система условных обозначений" и "Интегральные схемы типа "система на кристалле" на основе сложных функциональных блоков. Порядок создания".

На первые редакции проектов нормативных документов были получены отзывы от следующих предприятий: ГУ НПК "Технологический центр" МИЭТ, ОАО НПО "Физика", ГУП НПЦ "Элвис", ФГУП "НИИЭТ", ОАО ЦКБ "Дейтон", ОАО "НИИ молекулярной электроники и завод "Микрон", ФГУП НИИ МА "Прогресс", ЗАО "Светлана-МЭ", ООО "Новые электронные компоненты".

На основании полученных отзывов документы были доработаны, однако нельзя сказать, что они удовлетворяют все предприятия.

Рассмотрим особенности разработанных стандартов.

Микросхемы интегральные. Сверхбольшие интегральные схемы типа "система на кристалле" и сложные функциональные блоки. Термины и определения. Основная цель разработки стандарта, устанавливающего термины, — это устранение разночтений одних и тех же понятий. Разработчики стандарта выбирали наиболее часто используемые термины в данной области и после проведения определенных исследований дали наиболее адекватные определения выбранным терминам. После

этого редакция проекта стандарта была разослана на отзыв предприятиям, специализирующимся в данной области.

В проекте стандарта были представлены следующие понятия: "СФ блок", "система на кристалле", СФ блоки типа "Soft", "Hard" и "Firm", а также термины в области проектирования СБИС СНК на основе СФ блоков.

Поскольку область СБИС СНК и СФ блоков является новой, не удивительно, что отзывы, полученные от предприятий, были различными — от "замечаний нет" до предложения полностью переработать стандарт.

Также предприятия предлагали изменить некоторые определения. Причем предлагаемые редакции существенно отличались друг от друга.

Например, некоторые предприятия предлагали такие редакции термина "сложный функциональный блок":

ЗАО "Светлана-МЭ": "Модель (поведенческая, логическая, топологическая) функционально законченного электронного устройства, предназначенного для включения в "систему на кристалле", предполагающая многократное повторное использование системными интеграторами СНК".

ООО "Новые электронные компоненты": "Функционально законченное устройство, имеющее самостоятельную ценность, предназначенное для неоднократного использования в различных разработках, представляющее предмет интеллектуальной собственности и передаваемое другой стороне в виде различного вида описаний".

ФГУП НИИ МА "Прогресс": "Функционально законченные фрагменты СБИС типа СНК (для цифровых схем сложностью условно свыше 50 тыс. транзисторов), предназначенные для повторного использования, универсальные или специализированные по назначению (процессоры, элементы памяти, аппаратно реализуемые цифровые и аналоговые узлы, встроенные шинные архитектуры и т. д.), представляющие предмет интеллектуальной собственности и рыночный продукт и передаваемые другой стороне в виде различного типа моделей: на языке высокого уровня ("Soft"), логической схемы ("Firm") или топологической конструкции ("Hard")".

Причем специалисты ФГУП НИИ МА "Прогресс" считали необходимым указывать в определении и сложность цифровых схем, и их примеры, тогда как, например, специалисты ЗАО "Светлана-МЭ" не считали это целесообразным.

В итоге в окончательной редакции фигурирует определение СФ блока, которое, по мнению разработчиков стандарта, не противоречит предложениям предприятий и отражает суть термина: "Функционально законченный фрагмент СБИС типа СНК,

предназначенный для повторного использования, универсальный или специализированный по назначению, представляющий предмет интеллектуальной собственности и рыночный продукт и передаваемый другой стороне на языке высокого уровня, в виде логической схемы или топологической конструкции".

Спорных моментов, касающихся терминологии, остается достаточно много. Поэтому на данный момент выпускать национальный стандарт, устанавливающий термины в области СБИС СНК и СФ блоков, рано. В связи с этим специалисты ОАО "РНИИ "Электронстандарт" по согласованию с Федеральным фондом развития электронной техники приняли решение о выпуске стандарта организации, содержащего определения основных понятий в данной области. Если этот документ будет устраивать большинство предприятий-разработчиков СБИС, можно будет перевести этот документ в ранг национального стандарта.

"Сложные функциональные блоки. Классификация и система условных обозначений". Стандарт, устанавливающий классификацию и систему условных обозначений СФ блоков, разрабатывался ОАО "РНИИ "Электронстандарт" с привлечением специалистов ЗАО "Светлана-МЭ". Основной целью стандарта является выявление основных классификационных признаков для однозначного понимания типа изделия (СФ блока).

На рис. 1 приведена схема, описывающая классификацию СФ блоков, приведенную в разрабатываемом стандарте.

При создании документа по классификации СФ блоков за основу был взят стандарт отрасли ОСТ 11 073.915—2000 "Микросхемы интегральные. Классификация и система условных обозначений".

Система условных обозначений СФ блоков разработана таким образом, чтобы включить в себя все классификационные признаки, также она включает в себя номер разработки и буквенный код предприятия-разработчика.

"Интегральные схемы типа "система на кристалле" на основе сложных функциональных блоков. Порядок создания". Стандарт, устанавливающий порядок создания, как и классификация, разрабатывался ОАО "РНИИ "Электронстандарт" с привлечением специалистов ЗАО "Светлана-МЭ". Данный стандарт устанавливает порядок создания СБИС СНК на основе СФ блоков (последовательность проводимых работ и функции сторон, участвующих в их выполнении).

В целом разработку СБИС СНК на основе СФ блоков можно представить схемой, представленной на рис. 2. На схеме показаны этапы разработки СБИС СНК и основные исполнители работ.

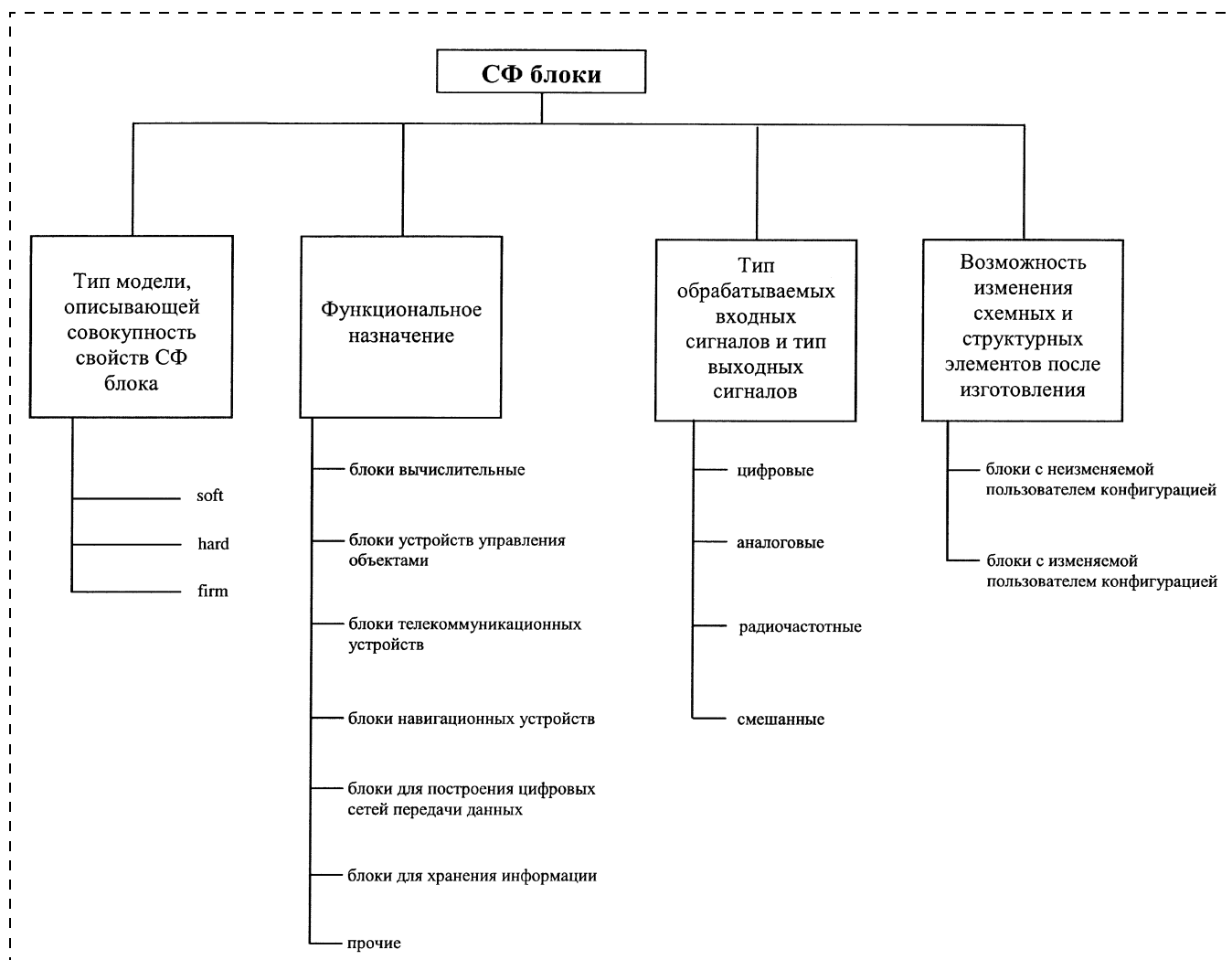


Рис. 1. Классификация СФ блоков

Далее приведены некоторые понятия и сокращения, используемые при описании разработки:

разработчик РЭА — разработчик радиоэлектронной аппаратуры — заказчик работы в случае, когда он проводит разработку за счет собственных средств, или головной исполнитель (интегратор системы) в случае, когда финансирование проводится за счет средств федерального бюджета или сторонней организацией;

центр проектирования — организационно-техническая структура, оснащенная необходимыми средствами проектирования для выполнения сквозного маршрута проектирования СБИС СНК, начиная с системного уровня;

ТЗ — техническое задание;

НИР — научно-исследовательская работа;

ОКР — опытно-конструкторская работа;

RTL — (Register Transfer Level) — уровень описания СФ блока в терминах регистровых передач;

RTL-описание — описание радиоэлектронного устройства (в т. ч. СФ блока) в терминах регистровых передач;

RTL-модель — модель, описанная в терминах регистровых передач;

поведенческая модель (Behavioral Model) — модель, отражающая объект проектирования в форме правил преобразования входных данных в выходные;

ПЛИС — программируемая логическая интегральная микросхема.

Одной из проблем при разработке документа на порядок создания было установление перечня передаваемой документации на каждом из этапов проектирования, поскольку этот перечень может меняться в зависимости от требований заказчика. В связи с этим наиболее удобным для сторон вариантом представляется установление конкретного перечня документации в договоре между сторонами и ТЗ.

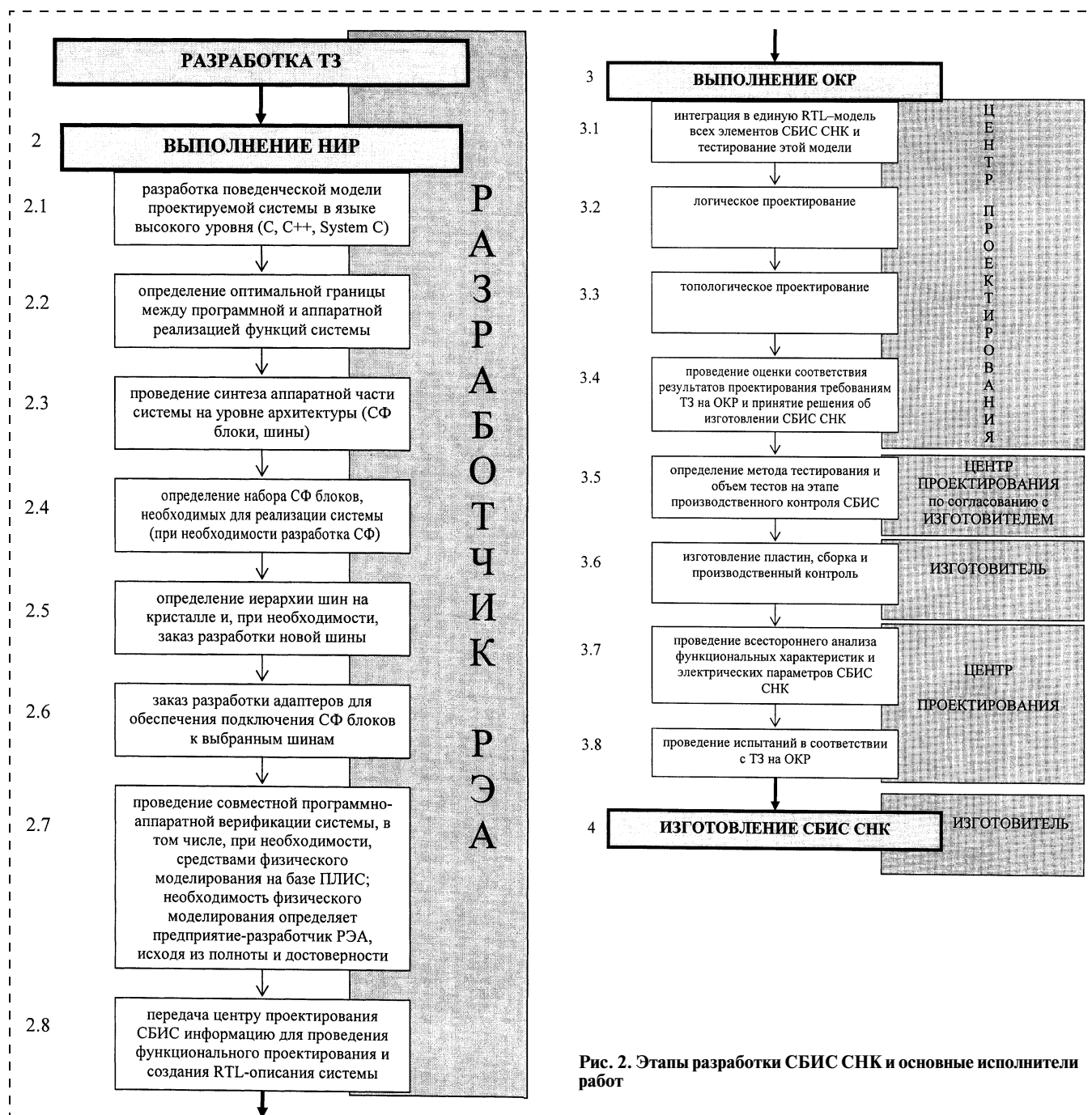


Рис. 2. Этапы разработки СБИС СНК и основные исполнители работ

В заключение хотелось бы сказать, что основной проблемой, с которой столкнулись разработчики стандартов, является недостаточно большая активность предприятий-разработчиков СБИС СНК и СФ блоков. На данный момент разработчикам нормативной документации бывает довольно трудно получить содержательный отзыв на свои документы от некоторых предприятий, и это очень затрудняет процесс разработки документов.

Кроме того, регулярно должны проводиться совещания, на которых специалисты предприятий-

разработчиков и разработчики стандартов могли бы обсуждать основные проблемы нормативной документации в области СБИС СНК и СФ блоков и разрабатывать дальнейшую стратегию стандартизации в этой области.

Список литературы

1. Отчет о НИР "Качество — 2003". Санкт-Петербург: ОАО "РНИИ Электронстандарт". Инв. № 1455.
2. <http://www.ruselectronics.ru>
3. <http://www.asutp.ru>

УДК 621.3.049.75

И. И. Абрамов, д-р физ.-мат. наук, проф.,
О. В. Дворников, канд. техн. наук,
Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

ТЕНДЕНЦИИ И ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ

Показана необходимость создания прецизионных аналоговых интерфейсов для современной радиоэлектронной аппаратуры на основе аналоговых и аналого-цифровых БИС/СБИС. Анализ проблем их проектирования, а именно: организационно-экономических; выбора технологии изготовления; схемотехнического и топологического синтеза и оптимизации; моделирования — позволил установить, что для эффективного проектирования микросистемных аналоговых интерфейсов целесообразно использовать системный подход, а также специализированные базовые матричные кристаллы.

Введение

С момента изготовления первых полупроводниковых ИС и до настоящего времени основные усилия при их разработке направлены на увеличение функциональной сложности и быстродействия, уменьшение энергопотребления. Значительные успехи достигнуты в области цифровых КМОП ИС. Так, самые сложные кристаллы насчитывают около сотни миллионов транзисторов. В то же время информация, поступающая из окружающего нас мира, имеет непрерывную (аналоговую) природу, поэтому во многих цифровых системах требуется предварительное аналого-цифровое преобразование сигналов.

В большинстве случаев непосредственное соединение датчика, преобразующего внешние воздействия в электрические сигналы, с серийно выпускаемым аналого-цифровым преобразователем (АЦП) приводит к потере части информации. Это связано с тем, что АЦП проектируются максимально универсальными и при этом не учитывается специфика реальных источников сигналов. В связи с этим высокока-

чественная система обработки информации должна иметь прецизионный аналоговый интерфейс между датчиком и цифровыми устройствами.

Аналоговый интерфейс осуществляет предварительную обработку поступающей информации, в частности преобразование выходного сигнала датчика в удобный для последующей работы сигнал, увеличение отношения сигнал/шум, выработку управляющих сигналов. Выполнение аналоговых интерфейсов на универсальных ИС малой степени интеграции (операционных (ОУ) и дифференциальных (ДУ) усилителях, охваченных отрицательной обратной связью (ОС), компараторах, источниках опорного напряжения, фильтрах и др.) увеличивает энергопотребление, массу, габаритные размеры, снижает надежность, требует сложной настройки и в конечном итоге может существенно повысить себестоимость радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

В то же время для радиоизмерительных приборов, ядерной электроники и некоторой другой РЭА принципиально невозможно разработка высококачественного аналогового интерфейса на

универсальных ИС [1] вследствие жестких требований, предъявляемых к компонентам входных каскадов. Кроме того, при использовании универсальных ИС возможно несанкционированное повторение оригинальных конструктивно-схемотехнических решений, а некоторые высококачественные импортные ИС просто недоступны.

Указанные причины приводят к тому, что разработчики РЭА стремятся реализовать аналоговый интерфейс на одной полупроводниковой пластине с цифровой системой или в виде отдельной аналоговой ИС вплоть до уровня БИС/СБИС.

Дальнейшее развитие технологий микроэлектроники привело к интеграции аналоговых интерфейсов и датчиков внутри одного микроэлектронного устройства, которое можно отнести к новому классу функционально сложных изделий — преобразователей физических (физико-химических) величин [2, 3]. В таком преобразователе могут быть конструктивно-технологически объединены все основные элементы функционально полного канала обработки аналоговой информации от чувствительного элемента (датчика) на входе до АЦП, микропроцессора и исполнительного устройства на выходе.

В целом применение субмикрометровой технологии для изготовления аналоговых ИС обеспечило значительное увеличение их функциональной сложности, но не позволило автоматически улучшить быстродействие при сохранении прецизионных параметров. Невысокая по сравнению с цифровыми ИС серийность узкоспециализированных аналоговых интерфейсов не обеспечивает окупаемости затрат на совершенствование полупроводниковой технологии их изготовления, поэтому при проектировании таких уст-

ройств необходимо всестороннее изучение существующих технических и экономических возможностей и поиск компромиссного решения.

Проведенный анализ позволил выделить следующие основные комплексы проблем проектирования прецизионных аналоговых БИС/СБИС: организационно-экономические; выбор технологии изготовления; выполнение схмотехнического и топологического синтеза и оптимизации; моделирование. Рассмотрим их по отдельности.

Организационно-экономические проблемы

Во многом успех новой РЭА на рынке определяется ценой в первые годы массовых продаж, которая зависит от стоимости и времени разработки аппаратуры. Применение специализированных БИС/СБИС значительно улучшает технические характеристики РЭА. В то же время процесс разработки ИС часто определяет суммарные материальные и временные затраты на создание РЭА и зависит от уровня квалификации коллектива специалистов, их способности быстро и бездефектно проектировать БИС/СБИС.

В настоящее время не существует "идеального" способа проектирования, гарантирующего одновременно высокий уровень технических характеристик ИС, их малую себестоимость при серийном производстве и простоту, сжатые сроки, невысокие затраты на выполнение разработки. Каждый из способов проектирования имеет свои преимущества и недостатки, и конкретный выбор способа в значительной степени зависит от предполагаемых объемов производства ИС.

В отличие от традиционных способов реализации цифровых микроэлектронных устройств [4] для аналоговых интерфейсов можно выделить три основных направ-

ления их реализации: 1) заказные ИС (*ASIC — Application Specific Integrated Circuit*¹), разрабатываемые на уровне активных и пассивных элементов с привлечением, при необходимости, ранее апробированных узлов и блоков или функционально-завершенных блоков и макроблоков, так называемых IP-компонентов (*Intellectual Property* — интеллектуальная собственность), для систем на кристалле (*SoC — System-on-Chip*); 2) полузаказные ИС (программируемые изготовителем) на базовых матричных кристаллах (*Master Chip Array*) и структурных ИС (*SA — Structured ASIC*); 3) программируемые (потребителем) аналоговые ИС (ПАИС) (*FPAА — Field Programmable Analog Arrays*).

При создании заказных ИС и аналоговых IP-компонентов для систем на кристалле проектируют полный комплект шаблонов, что позволяет лучше использовать возможности полупроводниковой технологии с целью получения требуемых параметров и максимально плотной упаковки, обеспечивающей минимальную площадь и себестоимость кристалла при массовом производстве. Однако такой процесс проектирования требует значительных невозвратных затрат на проектирование (*NRE — NonRecurring Engineering*), которые окупаются только при большой серийности продукции или при изготовлении высококачественных ИС для конкурентоспособной дорогостоящей РЭА.

Разработку заказных ИС и систем на кристалле проводят по техническому заданию (ТЗ) в специализированных центрах проектирования (дизайн-центрах). Многие дизайн-центры не имеют собственного полупроводникового производства, но обеспечивают процесс создания ИС от разработки ТЗ до измерений, испыта-

ний и поставок сертифицированных изделий, за исключением непосредственно изготовления кристаллов, выполняемого в "кремниевых мастерских" по контракту с дизайн-центром.

Системы на кристалле представляют собой сочетание на одном кристалле в виде IP-компонентов таких сложных узлов, как процессоры, память, контроллеры, АЦП, аналоговые макроблоки и др. [6]. Проектирование систем на кристалле проводится в основном на уровне соединений ранее апробированных блоков без изменения их внутренней структуры. Так как большой объем цифровых функций целесообразно выполнять на МОП-элементах, то системы на кристалле и входящие в них аналоговые IP-компоненты изготавливают по МОП-технологиям.

Следует отметить, что большинство дизайн-центров являются широкопрофильными предприятиями, которые не связаны организационно с предприятиями-разработчиками РЭА, и обычно их специалисты не знают специфики применения прецизионных аналоговых интерфейсов в конкретной аппаратуре. Поэтому при создании узкоспециализированных аналоговых ИС необходимо тесное взаимодействие, полное взаимопонимание разработчиков РЭА и ИС, постоянное обсуждение возникающих технических проблем с учетом возможностей выбранной полупроводниковой технологии.

Концепция базовых матричных кристаллов (БМК) предполагает предварительное изготовление полупроводниковых пластин со сформированной матрицей несоединенных базовых ячеек, а также наличие библиотеки стандартных элементов и комплекса программ для схмотехнического и топологического проектирования полузаказных ИС [7—9]. Каждая базовая ячейка состоит из несоединенных актив-

¹ При переводе, по возможности, использовался словарь [5].

ных и пассивных элементов, соединения между которыми выполняют в кремниевой мастерской. Специализация БМК осуществляется формированием дополнительных технологических слоев межсоединений (металлизации) и межслойных контактов. Для этого необходима разработка и изготовление дополнительных шаблонов, число которых гораздо меньше, чем для заказных ИС. Библиотека элементов содержит всю необходимую для проектирования информацию, а именно: схему электрическую принципиальную (СХЭП), результаты измерений или моделирования параметров, топологические чертежи. В значительной степени состав библиотеки определяется экспертным путем и включает те элементы, которыми привыкли оперировать разработчики аналоговых систем на основе ИС малой и средней степени интеграции. Элементы библиотеки спроектированы для конкретного БМК, поэтому топологические чертежи содержат только слои специализации, и применение элементов библиотеки возможно в БМК с одинаковой структурой ячейки. Библиотека элементов и комплекс программ проектирования доступны потребителям. В результате проектирование полузаказной ИС может осуществляться как в дизайн-центре, так и на предприятии, разрабатывающем РЭА, на уровне элементов БМК и/или элементов библиотеки, но изготовление всегда происходит в кремниевой мастерской. В последние годы появилась тенденция к изменению взаимодействия при создании полузаказных ИС. Так, возросшая сложность проектов полузаказных ИС требует применения специальных дорогостоящих аппаратных и программных средств разработки топологии, недоступных многим предприятиям, разрабатывающим РЭА. В связи с этим проектирование полузаказных ИС целесо-

образно проводить на предприятиях-изготовителях ИС или в дизайн-центрах.

Основное отличие структурной ИС [10, 11] от БМК заключается в том, что некоторые соединения элементов выполнены заранее. Следовательно, структурные ИС представляют собой спроектированную и изготовленную полупроводниковую пластину с встроенными блоками памяти, интерфейсами ввода-вывода, функциональными аналоговыми блоками и матрицей несоединенных элементов. Для специализации структурных ИС также используются дополнительные шаблоны, но проектирование выполняется на уровне блоков. При этом часто указывают, что структурные ИС имеют архитектуру "море модулей" (*sea of modules*) по сравнению с "морем вентилях" (*sea of gates*) многих БМК.

Использование в структурных ИС и БМК ранее апробированных блоков уменьшает риск проектирования и требования к квалификации разработчиков ИС, а наличие до начала этапа проектирования почти полностью сформированных полупроводниковых пластин сокращает время изготовления полузаказных ИС. Исходные пластины БМК и структурных ИС изготавливают массовым способом, что уменьшает их себестоимость. Однако существующие аналоговые блоки, как правило, универсальны и часто не устраивают разработчиков прецизионных аналоговых интерфейсов значениями параметров. Кроме того, ориентация на производство сложнофункциональных изделий привела к тому, что большинство БМК и структурных ИС выполнены по МОП-технологиям и имеют присущие МОП-элементам недостатки. Только некоторые компании предлагают БМК для проектирования прецизионных аналоговых ИС, например семейство *Quick Chip* фирмы *Maxim*, серия базовых

кристаллов *700 Series Chips* фирмы *Array Design Inc.* [12] или АБМК_1_2 [13, 14].

ПАИС [15, 16] по способам специализации подобны широко известным программируемым логическим ИС (*FPGA — Field Programmable Gate Arrays*). В ПАИС задание требуемых аналоговых функций осуществляется потребителем программным путем без участия кремниевой мастерской и дизайн-центра. Наиболее известны среди них следующие: *isPAC (In-System Programmable Analog Circuit)* компании *Lattice Semiconductor*; *FPAD (Field Programmable Analog Devices)* компании *Fast Analog Solution*; *FPAА* компании *Anadigm*.

ПАИС при минимальных затратах обеспечивают максимальную гибкость проектирования, в частности, быструю специализацию требуемых функций, программное изменение характеристик, возможность неоднократного перепрограммирования. Это уменьшает риск проектирования, позволяет экспериментально апробировать несколько вариантов одного изделия, предоставляет уникальную возможность получения отличающихся функций и/или параметров в различные моменты времени на одной и той же ИС путем изменения управляющей информации.

Недостатком всех программируемых ИС является низкая экономическая эффективность при средней и большой серийности выпуска, что связано с 3–5-кратной избыточностью их элементов [17]. Универсальность ПАИС затрудняет, а во многих случаях исключает реализацию прецизионных аналоговых характеристик. Даже основное преимущество (возможность многократного перепрограммирования) может ограничить их применение в жестких условиях эксплуатации, так как допускает появление дефектов самопроизвольного изменения внутренних связей.

Кроме того, необходимо учитывать, что стоимость зарубежных программируемых ИС для жестких условий эксплуатации в десятки-сотни раз превышает стоимость аналогичных ИС коммерческого исполнения, а их применение в ряде изделий специального назначения ограничено нормативными документами [18]. Таким образом, на ПАИС можно быстро и эффективно провести макетирование аналогового интерфейса, пригодного только для обеспечения требуемого функционирования. В дальнейшем такое изделие необходимо оптимизировать и реализовать на отечественном БМК или в виде заказной ИС. Сложившаяся в области программируемых ИС ситуация привела к созданию технологии замещения импортных программируемых ИС отечественными БМК [17], элементы которой можно использовать для аналоговых применений.

Проведенный анализ показывает, что изготовление прецизионных аналоговых интерфейсов возможно в виде заказных ИС или на БМК. Заказные ИС имеют лучшие технические характеристики и меньшую себестоимость каждого кристалла при массовом производстве, однако материальные и временные затраты на их разработку довольно значительны. Более того, их проектирование требует применения дорогостоящего программного обеспечения. По экономическим соображениям более выгодно применение БМК, которые должны быть доработаны для высокоточного выполнения аналоговых функций.

Выбор технологии изготовления

Характеристики аналоговых блоков обычно ухудшаются при уменьшении размеров элементов, даже вдали от предельно возможных, и при этом усложняется проектирование прецизионных аналоговых интерфейсов. В связи

с этим при выборе технологии изготовления последних учитывают следующие факторы:

- номенклатуру и параметры интегральных элементов;
- адекватность и точность моделей элементов;
- доступность для использования при проектировании апробированных схемно-топологических решений;
- возможность и эффективность одновременной реализации аналоговых и цифровых функций;
- максимальный размер полупроводниковой пластины;
- себестоимость и сроки изготовления партий пластин;
- средний процент выхода годных кристаллов типовых размеров;
- стабильность технологического процесса и воспроизводимость его параметров;
- стойкость элементов к внешним воздействиям.

Наибольшую сложность при разработке прецизионных аналоговых интерфейсов представляет выбор номенклатуры и параметров активных элементов, который невозможно правильно сделать без оценки допустимой погрешности выполнения требуемой аналоговой функции и выявления наиболее значимых источников погрешности.

Все погрешности можно условно разбить на четыре группы [19]: статические, динамические, случайные и обусловленные детерминированными помехами/фоном.

В идеальном случае "точное" выполнение аналоговой функции должно осуществляться для любых сигналов вне зависимости от их формы и амплитуды. Сложность выполнения этого условия привела к тому, что в серийно выпускаемых универсальных ИС малая погрешность достигается в ограниченной области параметров входных сигналов, в соответствии с которой их допустимо

классифицировать следующим образом:

- прецизионные, характеризующиеся хорошими статическими параметрами и малым уровнем шума;
- широкополосные, обеспечивающие требуемые малосигнальные параметры в широкой полосе частот;
- быстродействующие (для обработки сигналов с большой амплитудой и короткими фронтами).

Прецизионные аналоговые интерфейсы являются изделиями, предназначенными для работы с конкретными источниками сигналов. От них требуется обеспечение малой погрешности в заданной области параметров входного сигнала. В связи с этим необходим поиск компромисса между статическими параметрами, уровнем шума, полосой пропускания и скоростью нарастания. Поэтому аналоговые интерфейсы могут не соответствовать ни одному из указанных классов.

Основными способами уменьшения статической погрешности являются: улучшение параметров элементов, схемотехническое усовершенствование аналоговых узлов, введение корректирующих цепей для подстройки параметров ИС при измерениях на полупроводниковой пластине и в корпусе.

При использовании аналоговых блоков с ОС статические погрешности блоков целесообразно уменьшать только до уровня, сравнимого с погрешностью, вносимой элементами ОС. Дальнейшее улучшение аналоговых блоков приведет к усложнению схемы и, тем самым, к снижению надежности и ухудшению ее частотных свойств без значительного уменьшения суммарной погрешности.

Подстройка позволяет уменьшить как мультипликативную, так и аддитивную составляющую статической погрешности, в том

числе вносимую функциональными элементами ОС. Это уменьшение достигается при фиксированной температуре, но наличие температурных дрейфов приводит к ухудшению параметров в рабочем диапазоне температур. Более того, применение подстройки параметров на полупроводниковой пластине приводит к увеличению трудоемкости изготовления и площади ИС. Такой подход допустим в ИС малой степени интеграции и сильно усложняет создание аналоговых БИС/БИС с большим числом прецизионных функций.

Уменьшить статические погрешности можно путем увеличения коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером биполярных транзисторов (БТ), крутизны полевых транзисторов (ПТ) и выходного дифференциального сопротивления транзисторов, улучшения идентичности параметров элементов, уменьшения объемных сопротивлений полупроводниковых областей транзисторов.

К сожалению, как уже отмечалось, переход к субмикрометровым размерам вызывает увеличение погрешностей аналоговых ИС. Так, МОП-транзисторы с малой длиной канала имеют большую крутизну и малое выходное сопротивление истоковых повторителей, что уменьшает мультипликативную составляющую погрешности при работе на низкочастотную нагрузку. В то же время они имеют ряд недостатков, ограничивающих их применение в аналоговых блоках, а именно: значительный разброс порогового напряжения и удельной крутизны, приводящий к появлению большого напряжения смещения ОУ и ДУ; высокий уровень низкочастотного шума типа $1/f$; нестабильность рабочего режима вследствие температурного и временного дрейфа порогового напряжения; сильная модуляция длины канала, которая значи-

тельно уменьшает выходное дифференциальное сопротивление и усиление каскадов с активной нагрузкой. Небольшие вертикальные и горизонтальные размеры приводят к уменьшению пробивного напряжения, что требует уменьшения напряжения питания и ухудшает отношение сигнал/шум. Частично недостатки субмикрометровых МОП-элементов могут быть устранены за счет применения в аналоговых блоках транзисторов с длиной канала большей, чем в цифровых узлах. Однако этого недостаточно для выполнения прецизионных аналоговых функций. Даже главное преимущество МОП-транзисторов (малый обратный ток затвора) трудно использовать в полной мере для аналоговых блоков вследствие необходимости применения элементов защиты затвора от пробоя электростатическим зарядом, которые обычно имеют утечку, превышающую обратный ток затвора.

Уменьшение размеров БТ также приводит к появлению ряда отрицательных последствий. Малая глубина залегания базовой области вызывает сильное влияние коллекторного напряжения на толщину активной базы. Результатом этого является уменьшение выходного дифференциального сопротивления и напряжения смыкания БТ. Увеличение последнего приводит к уменьшению коэффициента передачи тока. В БТ с мелкой глубиной залегания базы усиливается влияние токов рекомбинации в приповерхностных базовых областях, на эмиттерном контакте и в области эмиттера, что существенно уменьшает коэффициент передачи тока. Кроме того, полупроводниковые структуры малых геометрических размеров имеют больший разброс параметров.

Таким образом, высокая плотность упаковки, малая емкость и большая граничная частота со- временных интегральных БТ, к

сожалению, совмещены с низкими выходным дифференциальным сопротивлением, пробивными напряжениями $p-n$ -переходов и промежутка коллектор — эмиттер, а также малым значением коэффициента передачи тока и его сильным спадом в микро-режиме.

В последние годы заметно расширилось применение в аналоговых ИС полевых транзисторов с $p-n$ -переходом (ПТП) (*JFET — junction field effect transistor*) [20]. В отличие от МОП-элементов влияние поверхностных эффектов на основные характеристики в ПТП незначительно. В связи с этим преимуществом ПТП по сравнению с МОП ПТ является малый уровень низкочастотного шума, более высокая стабильность параметров. Экспериментальные исследования выявили, что деградация характеристик ПТП при радиационном воздействии значительно меньше, чем МОП-элементов, горизонтальных и даже вертикальных БТ с тонкой базовой областью. Для ПТП не нужна защита затвора от пробоя электростатическим зарядом. Они имеют больший обратный ток затвора, чем МОП ПТ, однако применение двухзатворных конструкций [21], эффекта самокомпенсации тока затвора [22] позволяет получить обратный ток затвора менее 10^{-14} А.

Отметим, что ПТП технологически совместимы как с МОП-элементами, так и с БТ, причем p -канальный ПТП образует комплементарную пару с вертикальным $n-p-n$ -транзистором и позволяет во многих схемотехнических решениях отказаться от горизонтального $p-n-p$ -транзистора. К сожалению, синтезировать сложнофункциональные аналоговые ИС только на ПТП крайне тяжело, но применение ПТП в качестве входного элемента аналоговых каскадов позволяет получить новое качество как в биполярных, так и в МОП ИС. Указан-

ные свойства ПТП стимулировали появление ряда совмещенных ПТП-МОП, ПТП-БТ (*JFET-MOS*, *JFET-BJT*) технологий.

Таким образом, для прецизионных аналоговых применений предпочтительнее совмещенная технология, позволяющая одновременно формировать БТ и ПТП, причем наиболее удачным является сочетание вертикального *n-p-n* БТ и *p*-канального ПТП. Так, для БТ характерна лучшая идентичность параметров, чем для МОП-элементов, меньший уровень низкочастотного шума, высокая крутизна при малых геометрических размерах, позволяющая эффективно работать с низкоомной и емкостной нагрузкой. ПТП позволяют создать входные каскады для работы с высокоимпедансным источником сигнала, а совместное применение *n-p-n* и *p*-канального ПТП — высококачественные каскады с активной нагрузкой. В то же время переход к субмикрометровым размерам приводит к увеличению погрешностей аналоговых ИС и требует дополнительной схемотехнической и топологической модернизации аналоговых блоков.

Проблемы схемотехнического и топологического синтеза и оптимизации

В классическом подходе к синтезу система рассматривается путем перехода от частного к общему, т. е. в результате объединения ее подсистем, разрабатываемых отдельно [23]. Известны и апробированы алгоритмы расчета и оптимизации электронных схем [24], методы синтеза топологии ИС [25], которые с успехом применялись при разработке ИС разной степени сложности и функционального назначения. Новый уровень параметров субмикрометровых элементов ИС, повышенные требования к точности выполнения аналоговых функций, возросшая схемотехническая и топологическая сложность

прецизионных аналоговых интерфейсов приводят к необходимости корректировки некоторых основных положений.

В рамках классического подхода процесс проектирования аналоговых ИС может быть представлен в виде блок-схемы, показанной на рис. 1.

Сначала синтезируются основные аналоговые блоки, составляющие библиотеку стандартных элементов, а именно: ОУ и ДУ, аналоговые умножители, компараторы и пр. Они экспериментально апробируются, параметры паспортизируются, а дальнейший схемотехнический синтез традиционно выполняется на структурном уровне с использованием элементов библиотеки, охваченных при необходимости цепями ОС. Результатом структурного синтеза является схема электрическая функциональная (СХЭФ).

Схемотехнический синтез обычно осуществляется эвристическими методами. В подавляю-

щем большинстве случаев требования ТЗ пытаются удовлетворить путем применения известных технических решений и проведением параметрической оптимизации. Такой подход вполне применим к сложнофункциональным аналоговым ИС со средним уровнем параметров, но не позволяет получить прецизионные характеристики аналоговых интерфейсов.

Новым направлением схемотехнического синтеза аналоговых ИС является использование нелинейных корректирующих цепей [26], принципа само- и взаимной компенсации [27].

Нелинейные корректирующие цепи позволяют реализовать потенциальные возможности аналоговых ИС, в частности, приблизить их быстродействие в режиме большого сигнала к быстродействию для случая малого сигнала без ухудшения энергетических параметров. Главная проблема применения нелинейных корректирующих цепей в прецизионных аналоговых ИС заключается в

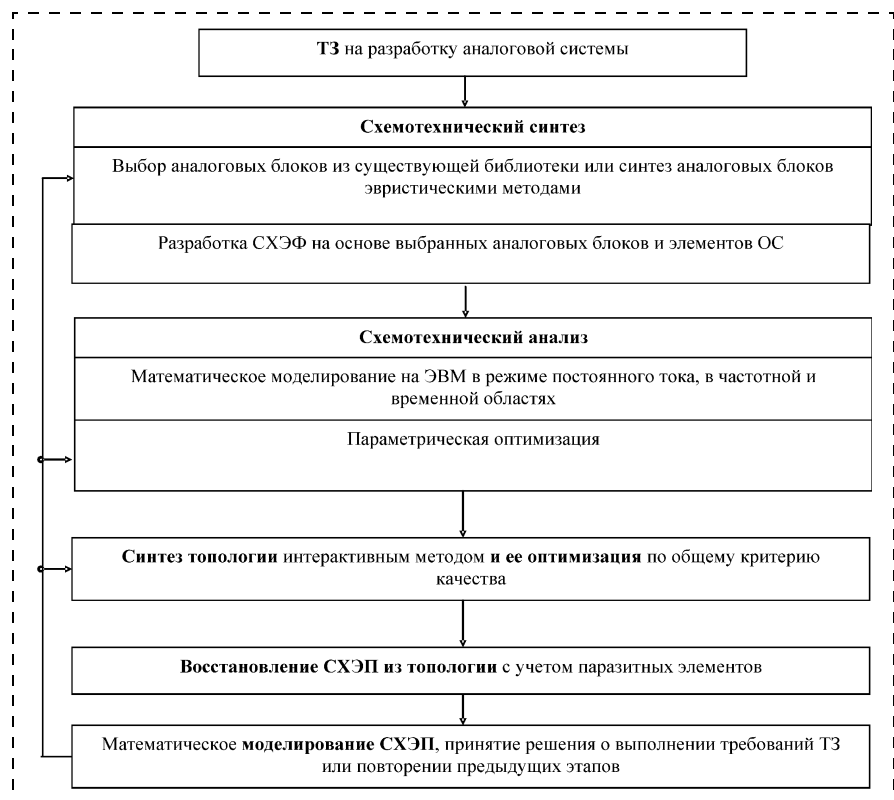


Рис. 1. Классический подход к проектированию аналоговых БИС

минимизации влияния подключаемой нелинейной корректирующей цепи на основные мало-сигнальные и статические параметры.

Применение принципа само- и взаимной компенсации [27] позволяет за счет использования ОС в цепи обоих входов усилителей значительно уменьшить погрешность выполнения аналоговых функций. Успех применения этого принципа связан со степенью свободы исходной схемы, определяемой числом входов дифференциальных активных элементов, которое можно увеличить при создании мультидифференциальных ОУ [28]. Последние по энергетическим характеристикам практически идентичны традиционным ОУ, но допускают значительное функциональное и структурное разнообразие, что позволяет реализовать сложные аналоговые функции в предельно экономичных режимах работы [29]. К сожалению, вследствие существующего технологического разброса параметров элементов мультидифференциальные ОУ имеют отличающиеся статические параметры по разным входам, что снижает эффективность применения принципа само- и взаимной компенсации.

После разработки СХЭП синтезируется топология ИС. Из известных методов проектирования топологии [25]: стандартных ячеек, универсальных ячеек, символического, на основе БМК, интерактивного только два последних применяются в аналоговых ИС.

Интерактивный метод предполагает многократное применение процедур ввода и редактирования геометрических фигур на основе технических требований, определяющих минимально допустимые размеры элементов, зазоры между элементами и параметры их физической структуры. Преимуществом этого метода является то, что он позволяет наиболее полно использовать воз-

можности технологического процесса, обеспечить высокую плотность упаковки, т. е. создать в некотором смысле оптимальный проект. В то же время такая разработка топологии носит творческий характер, а ее успешное выполнение зависит от квалификации исполнителя, знания им схемотехники разрабатываемого изделия и влияния топологии элементов на их параметры.

В общем случае оптимизация ИС является параметрической. Ее цель заключается в определении вектора параметров, минимизирующих целевую функцию при заданных ограничениях [24, 30]. В качестве целевой функции чаще всего используется различие между текущим значением требуемой характеристики и критерием качества. Главными проблемами оптимизации являются отсутствие уверенности в том, что найденное решение является глобально наилучшим, а также выбор критерия качества.

Обычно применяют общие критерии качества [24, 30, 31]. Для схемотехнической оптимизации — это реализация заданных частотно-временных характеристик, минимизация чувствительности выходных характеристик к разбросу параметров элементов, устранение неустойчивости в усилителе или активном фильтре и/или обеспечение заданного запаса устойчивости, минимизация энергопотребления. При топологической оптимизации — это минимизация занимаемой площади на кристалле, длины соединений, числа паразитных элементов.

Синтез и оптимизация прецизионных аналоговых интерфейсов затруднены вследствие недостаточности высокого уровня параметров субмикрометровых элементов, а также увеличения функциональной сложности изделий и появления в связи с этим новых схемотехнических и топологических особенностей.

Анализ специализированных БИС/СБИС радиоизмерительной техники и ядерной электроники позволил выделить следующие схемотехнические особенности:

- многовариантность схемотехнических решений одного и того же функционального аналогового блока, обусловленную различными требованиями к полосе пропускания, скорости нарастания выходного напряжения и погрешности выполнения аналоговой функции;
- возможность реализации различных аналоговых функций на основе одного аналогового блока при использовании различных цепей ОС;
- большой динамический диапазон входного и выходного сигналов;
- широкая номенклатура активных и пассивных элементов, оптимизированных для работы в конкретном режиме;
- значительное число ОС;
- использование нескольких источников питания, шин нулевого потенциала;
- необходимость применения в определенных блоках пассивных элементов с параметрами, которые не могут быть получены в рамках полупроводниковой технологии, а именно, конденсаторов больших емкостей, высокоточных резисторов, высокоомных резисторов;
- применение подстроечных элементов (внешних или настраиваемых на пластине) для выполнения особоточных аналоговых функций.

Схемотехнические особенности аналоговых БИС/СБИС приводят к усложнению разработки топологии, что существенно влияет на уровень получаемых параметров ИС и процент выхода годных.

Высокая техническая сложность разработки топологии оп-

ределяется следующими основными причинами:

- большой номенклатурой разногабаритных активных и пассивных элементов;
- нерегулярностью топологии;
- необходимостью согласования отдельных элементов по электрическим и тепловым параметрам;
- большим числом различных шин аналоговых сигналов, питания, ОС, расположение и пересечение которых между собой влияет на работу ИС;
- наличием и влиянием на основные электрические параметры тепловых потоков от мощных элементов и механических напряжений, возникающих в процессе производства ИС;
- необходимостью экранирования во многих случаях отдельных аналоговых блоков от остальной части кристалла;
- трудностью правильной компоновки аналоговой и цифровой частей, входных и выходных шин и контактных площадок для уменьшения паразитного электрического взаимодействия;
- сложностью трассировки металлических шин с учетом эффекта электромиграции;
- противоречивостью требований к повышенному быстродействию, и следовательно, минимальным размерам активных и пассивных элементов и точности выполнения аналоговых функций, не достижимой при чрезмерно малых размерах.

В итоге для прецизионных аналоговых ИС даже значительные вычислительные ресурсы часто не позволяют провести машинную схемотехническую и топологическую оптимизацию лучше, чем интерактивным путем с привлечением высококвалифицированных разработчиков.

Таким образом, применение классического подхода к схе-

техническому и топологическому синтезу и оптимизации прецизионных аналоговых интерфейсов затруднено вследствие увеличения статических погрешностей аналоговых блоков при переходе к субмикрометровым размерам элементов и значительного роста функциональной сложности аналоговых ИС. Можно выделить следующие перспективные направления совершенствования схемотехнического и топологического проектирования аналоговых интерфейсов: разработка элементов библиотек с малыми погрешностями; адаптация принципов нелинейных корректирующих цепей, само- и взаимной компенсации; разработка новых методов проектирования; формулировка новых критериев качества.

Проблемы моделирования аналоговых интерфейсов

Синтез СХЭП неразрывно связан с ее анализом, который в большинстве случаев выполняется путем математического моделирования с применением ЭВМ поведения ИС в режиме постоянного тока, в частотной и временной областях. Погрешность математического моделирования во многом определяется адекватностью и точностью моделей элементов, полнотой описания ИС с учетом паразитных элементов топологии и корпуса.

С увеличением степени интеграции, в частности при переходе к субмикрометровым размерам элементов, влияние на характеристики ИС паразитных эффектов настолько усиливается, что полупроводниковые структуры уже невозможно разделить на активные, пассивные и паразитные элементы. Их надо рассматривать как единое целое без существенных упрощений. В этом случае при моделировании необходимы качественно новые подходы, например применение методологии автоматического синтеза компактных эквивалентных схем по-

лупроводниковых приборов и структур [32, 33]. К сожалению, методы такого синтеза только начинают развиваться [32]. Возможно моделирование небольших фрагментов и на уровне численных диффузионно-дрейфовых моделей [33]. Этот подход, однако, требует значительных затрат вычислительных ресурсов ЭВМ. В связи с этим при моделировании современных БИС/СБИС целесообразно искать компромиссные решения в выборе моделей элементов ИС [34], в идентификации их параметров и в упрощенном описании паразитных элементов [35, 36].

Большинство программ схемотехнического моделирования основаны на алгоритмах и даже используют исходные тексты программы *Spice2G6*, поэтому их обычно называют "*Spice*-подобными". В них, как правило, применяют компактные электрические модели элементов. Исходные параметры этих моделей определяются либо экспериментально, либо с помощью физикотопологического моделирования. При идентификации моделей с сосредоточенными параметрами используются прямые электрические измерения или применяются оптимизационные процедуры [37]. Идентификация же параметров распределенных электрических моделей обычно проводится с привлечением результатов физикотопологического моделирования [37].

Основные требования к "хорошей" модели транзисторных структур сформулированы в работах [34, 38, 39]. Был также разработан упрощенный подход к схемотехническому моделированию ИС, предполагающий, что в зависимости от режима работы и особенностей применения допускается описание элемента несколькими различными моделями или наборами параметров одной и той же модели [40].

Точность результатов схемотехнических расчетов во многом непосредственно зависит от адекватности и точности моделей элементов и методов идентификации их параметров. При этом под адекватностью модели понимаем степень соответствия или правильность отображения моделью физических процессов, реально протекающих в полупроводниковой структуре [37], а под точностью модели — степень совпадения описания моделью характеристик элементов с экспериментальными данными [37].

Идентификация параметров электрических моделей основана на сопоставлении некоторых экспериментально полученных характеристик с численными значениями для них, найденными с помощью модели. При этом параметры модели подбираются таким образом, чтобы достичь требуемого совпадения экспериментальной и расчетной характеристик. Для определения динамических параметров могут дополнительно применяться специальные тестовые структуры, изготавливаемые с рассматриваемым элементом в едином технологическом процессе. Идентификация параметров на практике, как правило, проводится с помощью параметрической оптимизации и имеет все присущие этому методу особенности [41]: необходимость выработки критерия качества, существование нескольких локальных экстремумов и целесообразность привлечения дополнительных физических соображений для отбора одного экстремума из установленного набора, выбор критерия для оценки отклонения результатов измерений и моделирования.

Проблема идентификации параметров моделей значительно обострилась в последнее время [41]. С одной стороны, это связано с желанием создать универсальную модель, пригодную для применения на различных эта-

пах создания БИС/СБИС, а именно: проверки функционирования, анализа чувствительности СХЭП к изменению параметров элементов, прогнозирования характеристик при изменениях технологического процесса и размеров элементов, оптимизации параметров. Для успешного решения каждой из указанных задач модель должна удовлетворять различным требованиям. Поэтому "хорошая" модель создается на основе компромисса между многими, часто противоречивыми требованиями. С другой стороны, переход к субмикрометровым размерам элементов ИС приводит к появлению новых эффектов, которые необходимо учитывать в модели. В то же время повышенный разброс параметров таких элементов затрудняет сравнение результатов моделирования с результатами измерений, так как может быть неясно, результаты измерений каких структур (каких партий, пластин, конструкций и др.) следует принимать за основу для сравнения.

Учитывая важность проблем модернизации моделей элементов и идентификации их параметров, в рамках Альянса предприятий электронной промышленности (*Electronic Industry Alliance — EIA*) был создан Совет по компактным моделям (*Compact Model Council — CMC*). Подобные работы проводятся и в рамках Ассоциации полупроводниковых фирм-разработчиков (*Fabless Semiconductor Association*) [42].

Указанный Совет сформулировал основные требования к компактным моделям [43], в числе которых есть подробная документированная методология идентификации параметров. В частности, модель должна быть адекватна, что определяется по качественным тестам, и иметь хорошую точность. При определении последней необходимо указывать, погрешность какой величины была измерена, способы ее опре-

деления и границы допустимого динамического диапазона [41]. Главная проблема в оценке точности модели заключается в выборе характеристики, по которой необходимо проводить оценку. Так, высокая точность моделирования функции (вольт-амперной характеристики) не свидетельствует о хорошей точности моделирования производной функции (малосигнальных параметров — выходного дифференциального сопротивления, дифференциального коэффициента передачи тока БТ, крутизны ПТ), которые определяют основные параметры аналоговых ИС. В общем случае погрешность является функцией тока и напряжения и может сильно зависеть от того, какую из этих величин считать независимой. Способ определения погрешности на практике следует выбирать исходя из поставленной цели.

На точность моделирования значительно влияют паразитные элементы, поэтому для прецизионных аналоговых ИС проводят повторное схемотехническое моделирование после разработки топологии и выделения паразитных элементов. При моделировании современных БИС/СБИС также необходимо учитывать ряд дополнительных факторов [44]: разброс параметров элементов, перекрестные помехи, индуктивность и сопротивление шин питания, нулевого потенциала, взаимные индуктивности, влияние корпуса ИС.

Точность моделирования зачастую является настолько проблематичной и связанной с риском финансовых потерь, что многие разработчики ИС перепроверяют параметры моделей, полученные из кремниевой мастерской, и даже выполняют физическое моделирование — предварительную проверку изготовленных отдельных фрагментов ИС. При проектировании особо сложных изделий для идентификации параметров моделей при-

меняют самостоятельно разработанные тестовые структуры, в том числе отдельные простейшие аналоговые и цифровые узлы. В качестве физического моделирования также можно рассматривать предварительное макетирование отдельных макроблоков на программируемых ИС перед их реализацией в виде заказных или полузаказных ИС.

Таким образом, фрагменты ИС, содержащие аналоговые функционально завершённые блоки с субмикрометровыми элементами, при моделировании необходимо, строго говоря, рассматривать как единое целое без существенных упрощений. Невозможность в настоящее время реализации этого подхода в полном объёме привела к развитию упрощающих подходов: совершенствованию компактных электрических моделей и методов выделения паразитных элементов. При этом основными проблемами являются: повышение адекватности описания физических процессов и точности моделирования транзисторных структур, разработка критериев качества для определения погрешности моделей, создание методик идентификации параметров моделей и учета влияния наиболее существенных паразитных элементов.

Системный подход к проектированию аналоговых интерфейсов

Постоянная потребность рынка в прецизионных аналоговых интерфейсах заставляет искать эффективные способы разрешения рассмотренных проблем проектирования. Поэтому, с нашей точки зрения, целесообразен отказ от классического подхода и переход на системный подход к их проектированию.

Системный подход к синтезу предполагает последовательный переход от общего к частному с постоянным ориентированием на достижение поставленной цели [23]. В соответствии с этим и про-

веденным анализом системный подход к проектированию аналоговых интерфейсов должен быть направлен на получение требуемых параметров ИС при наличии большого числа ограничений: экономических, технологических, схемотехнических и топологических. Необходимо четко определить главную цель, с учетом которой сформулировать задачи для всех этапов проектирования, выделить приоритетные направления и выбрать из большого многообразия факторов только влияющие на достижение поставленной цели. Предлагаемое изменение процесса проектиро-

вания микроэлектронных аналоговых интерфейсов в рамках системного подхода отражено в общей блок-схеме (рис. 2).

Первоочередным этапом системного подхода является формулирование главной цели, содержащей технические и экономические характеристики. Другим существенным отличием системного подхода от классического является разработка СХЭФ на основе идеальных аналоговых блоков с предварительной выработкой граничных требований к параметрам используемых блоков и элементов ОС, необходимых для достижения главной цели.

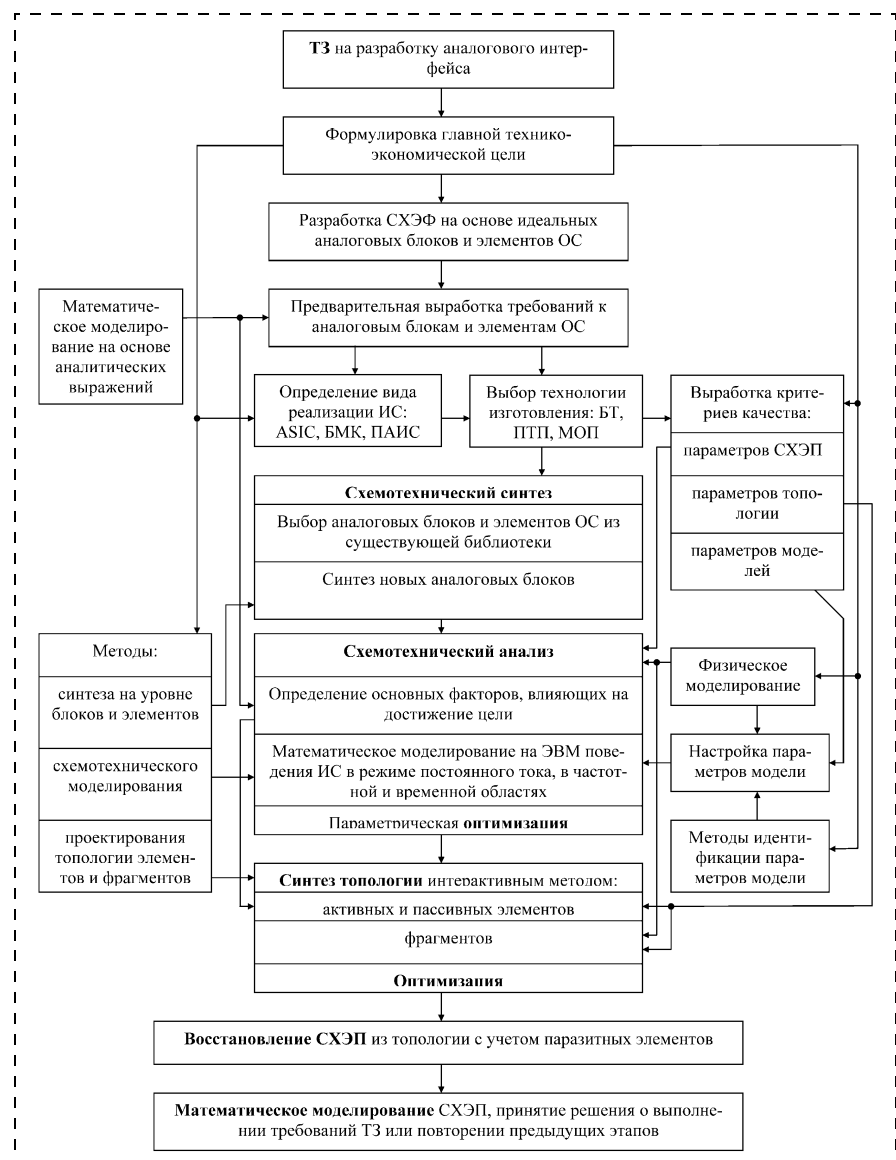


Рис. 2. Системный подход к проектированию прецизионных аналоговых интерфейсов

Экономическая цель проекта существенно влияет на способ реализации аналогового интерфейса в виде заказной ИС, полужаказной ИС или ПАИС. Техническая цель в соответствии с требованиями к основным аналоговым блокам определяет выбор технологии изготовления. На основе технической цели и выбранной технологии изготовления формулируют критерии качества для идентификации параметров моделей, схмотехнической и топологической оптимизации.

Если от аналогового интерфейса, главным образом, требуются прецизионные характеристики, то его разрабатывают в виде заказной ИС, а при необходимости уменьшения временных и материальных затрат — на специализированном БМК с использованием совмещенной ПТП-БТ технологии.

При схмотехническом проектировании ИС необходимо найти источники максимальной погрешности (аналоговые блоки или элементы функциональной ОС), выяснить возможность уменьшения погрешности методами само- и взаимной компенсации, применением подстроек на пластине параметров особо точных элементов/узлов или использованием внешних элементов с требуемыми характеристиками.

При синтезе СХЭП на уровне элементов особое внимание уделяют входным и выходным цепям, модернизацию которых допустимо проводить эвристическим путем. Выбор активных и пассивных элементов осуществляют с учетом типовых значений паразитных параметров, одновременно предусматривая уменьшение влияния паразитных параметров схмотехническим (выбор режима работы, введение компенсирующих и фильтрующих цепей) и конструктивно-топологическими способами (уменьшение взаимодействия через полупроводниковую подложку индук-

тивностей и емкостей корпуса, выбор конструкций элементов с наименьшей емкостной связью с подложкой). Эти работы выполняют непосредственно при синтезе СХЭП до разработки топологии. После разработки топологии восстанавливают СХЭП из топологии и уточняют значения параметров паразитных элементов.

При синтезе топологии также ориентируются на достижение цели, в соответствии с которой не просто масштабируют площади элементов, а оптимизируют конструкции для минимизации паразитных емкостей, объемных сопротивлений, уровня низкочастотного шума, обеспечения наилучших малосигнальных характеристик при требуемом рабочем токе, создают функционально-интегрированные структуры. Такое многообразие конструкций элементов значительно усложняет восстановление СХЭП из топологии, но обеспечивает наилучшее сочетание точности выполнения аналоговых функций, быстродействия, энергопотребления.

При моделировании могут применяться все его известные типы, а именно: физическое, аналитическое математическое (процессы функционирования записываются в виде некоторых функциональных зависимостей, которые исследуются аналитическими методами), математическое на ЭВМ. Последнее — наиболее распространенный тип моделирования. Однако иногда применение его для анализа поведения ИС затруднено вследствие отмеченных ранее проблем. В этом случае возможно использование аналитических выражений требует высокой квалификации разработчиков и не дает необходимой точности вычислений, однако позволяет выделить тенденции влияния параметров и значительно упрощает процесс последующего матема-

тического моделирования на ЭВМ или физического моделирования. Примером использования аналитических выражений является выбор режима работы ПТП, при котором ток прямо-смещенного истокового перехода компенсирует ток обратосмещенного стокового [22]. Отметим также выбор отношения ширины затвора к длине ПТ истокового повторителя, в котором смещение по постоянному току входного транзистора задается обратным током p - n -перехода. В этих случаях аналитические выражения позволили сделать важные качественные и приблизительные количественные выводы по конструкции и режимам работы транзисторов, которые подтвердились экспериментально.

Физическое моделирование требует значительных временных и материальных затрат, однако дает максимально достоверные результаты. Чаще всего физическое моделирование применяют при создании аналоговых блоков, которые определяют важнейшие параметры заказных ИС, или тестовых схем (кольцевые генераторы, простейшие ДУ и пр.) для идентификации параметров моделей при так называемой калибровке кремнием. Настройка параметров моделей при системном подходе проводится в основном для тех характеристик, которые определяют достижение цели проектирования.

Пример проектирования аналоговых интерфейсов на специализированном БМК

Применение описанного системного подхода позволило создать специализированный БМК [13, 14]. В отличие от традиционных БМК, выполняемых максимально универсальными, специализированные БМК предназначены для изготовления определенного класса изделий. Это позволяет оптимально спроектировать топологию элементов и базовой ячейки, выбрать достаточное число активных и пассивных элементов без

значительной избыточности, сформулировать жесткие требования к их параметрам, предусмотреть возможность подгонки параметров ИС на пластине. Кроме того, одновременно с проектированием топологии кристалла разрабатываются и специализированные библиотеки стандартных элементов, удовлетворяющие поставленной цели. Специализированные БМК имеют дополнительное важное преимущество перед заказными ИС — это значительно более простое и точное восстановление СХЭП из топологии с учетом паразитных элементов.

Примером специализированного БМК может служить биполярно-полевой АБМК_1_2, созданный специально для получения маломощных и быстродействующих ИС ядерной электроники и измерительной техники. Для решения данной задачи он включает маломощные n - p - n и p -ПТП, двухзатворные ПТП с предельно малым входным током и входной емкостью. Состав и структура базовой ячейки АБМК_1_2 позволяет получить типовые схемотехнические решения в выбранной области. Одновременное применение универсальных и функционально-интегрированных элементов значительно расширили возможности и позволили спроектировать изделия, на которые АБМК_1_2 первоначально не был рассчитан: микромощные счетверенные ОУ, усилители с программируемыми параметрами, радиационностойкие и др.

Многokратная экспериментальная апробация АБМК_1_2 подтвердила достаточную, с инженерной точки зрения, точность совпадения результатов моделирования и измерений, в том числе уровня шума и скорости нарастания. Достигнутые результаты объясняются высокой точностью идентификации параметров моделей, простым и достоверным выделением паразитных элементов.

Выводы

1. Рассмотрение тенденций разработки прецизионных аналоговых интерфейсов на основе БИС/СБИС позволило выделить четыре комплекса проблем их проектирования: организационно-экономические; выбор технологии изготовления; выполнение схемотехнического и топологи-

ческого синтеза и оптимизации; моделирование.

2. В результате анализа данных проблем сформулирован системный подход к проектированию прецизионных аналоговых интерфейсов на базе БИС/СБИС, "идеальная" блок-схема которого приведена на рис. 2.

3. Применение предложенного системного подхода привело к разработке высококачественного специализированного биполярно-полевого БМК, созданного для реализации маломощных и быстродействующих ИС ядерной электроники и измерительной техники.

Список литературы

1. Дворников О. В. Элементная база нового поколения радиоизмерительной техники // Компоненты и технологии. 2004. № 6. С. 58—63.
2. Мокров Е. А. Проблемы и перспективы развития датчиковой аппаратуры // Микросистемная техника. 2003. № 9. С. 11—17.
3. Телец В. А., Никифоров А. Ю. Микроэлектронные преобразователи физических величин и компоненты датчиков — перспективная элементная база микросистемной техники // Микросистемная техника. 2001. № 1. С. 6—12.
4. Адамов Ю. Ф., Сомов О. А., Шевченко Е. А. Системы на кристалле в современной электронике // Микросистемная техника. 2004. № 5. С. 34—38.
5. Прохоров К. Я., Орликовский А. А., Соколов А. Г. Англо-русский словарь по микроэлектронике. М.: Рус. яз., 1993. 391 с.
6. Системы на кристалле: возможности технологии и дизайна // Chip News. 1998. N 8—10.
7. Басаев А. С., Вернер В. Д., Ермак В. В. и др. Элементная база для разработки радиоэлектронной аппаратуры нового поколения // Микросистемная техника. 2002. № 12. С. 31—34.
8. <http://www.angstrem.ru>
9. <http://www.asic.ru>
10. Бухтеев А., Немудров В. Системы на кристалле. Новые тенденции // Электроника: НТБ. 2004. № 3. С. 52—56.
11. Бухтеев А., Морозов С., Соколов С. Структурные ASIC — виток эволюции БМК или готовая платформа для создания систем на кристалле // Chip News. 2004. N 8. С. 5—17.
12. <http://www.arraydesign.com>
13. Дворников О. В., Чеховский В. А. Аналоговый биполярно-полевой базовый матричный кристалл с расширенными функциональными возможностями // Chip News. 1999. N 2. С. 21—24.

14. Baturistsky M. A., Dvornikov O. V., Tchekhovski V. A. An analog bipolarjfet master slice array for front-end electronics design // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2003. A 498 (1—3). P. 443—452.
15. <http://www.anadigm.com>
16. Стешенко В. Б. Практика автоматизированного проектирования радиоэлектронных устройств. М.: Ноллидж, 2002. 768 с.
17. Евстигнеев В., Кошарновский А., Дегтярев Е. и др. Импортзамещающая технология ПЛИС — БМК. Часть I. Разработка радиоэлектронной аппаратуры двойного применения // Компоненты и технологии. 2004. № 7. С. 80—86.
18. Пресс-служба РАСУ. Корр. АРМС-ТАСС. Задача создания отечественной элементной базы по-прежнему остается нерешенной // Chip News. 2004. N 4. С. 28.
19. Полонников Д. Е. Операционные усилители: Принципы построения, теория, схемотехника. М.: Энергоатомиздат, 1983. 216 с.
20. Дворников О. В. Создание конкурентоспособных аналоговых БИС по совмещенной ВJT-JFET технологии // Электроника: НТБ. 1998. № 3—4. С. 59—62.
21. Дворников О. В., Чеховский В. А. Интегральные сверхмаломощные зарядочувствительные усилители // Проблемы современной аналоговой микросхемотехники: Сб. материалов Межд. научно-практ. семинара. Шахты: Изд. ЮРГУЭС, 2003. Ч. 1. С. 94—107.
22. Дворников О. В., Просандеев Д. Е., Володкевич А. А. Способ включения полевого транзистора с управляющим p - n -переходом. Патент № 2046455 (РФ), заявл. 3.04.92. опубл. 20.10.95.
23. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. М.: Высш. шк., 1985. 271 с.
24. Сигорский В. П., Петренко А. И. Алгоритмы анализа электронных схем. М.: Сов. радио, 1976. 608 с.
25. Гурский Л. И., Степанец В. Я. Проектирование ИС. Минск: Навука і тэхніка, 1991. 295 с.
26. Прокопенко Н. Н. Нелинейная активная коррекция в прецизионных аналоговых микросхемах. Ростов-на-Дону: Изд. Северо-Кавказского науч. центра высш. шк., 2000. 223 с.
27. Крутинский С. Г. Структурный синтез аналоговых электронных схем. Ростов-на-Дону: Изд. Северо-Кавказского науч. центра высш. шк., 2001. 180 с.
28. Старченко Е. И. Операционные усилители с мультидифференциальными входными каскадами // Проблемы современной аналоговой микросхемотехники: Сб. материалов Межд. научно-практ. семинара. Шахты: Изд. ЮРГУЭС, 2002. Ч. 1. С. 35—42.
29. Крутинский С. Г., Старченко Е. И. Мультидифференциальные операционные усилители и прецизи-

онная микросхемотехника // Проблемы современной аналоговой микросхемотехники: Сб. материалов Межд. научно-практ. семинара. Шахты: Изд. ЮРГУЭС, 2003. Ч. 2. С. 125—137.

30. Бубенников А. Н., Садовников А. Д. Физико-технологическое проектирование биполярных элементов кремниевых БИС. М.: Радио и связь, 1991. 288 с.

31. Казеннов Г. Г., Щемелинин В. М. Топологическое проектирование нерегулярных БИС. М.: Высш. шк., 1990. 112 с.

32. Абрамов И. И. Методология автоматического синтеза компактных эквивалентных схем полупроводниковых приборов и структур // Микросистемная техника. 2002. № 6. С. 18—23.

33. Абрамов И. И. Моделирование физических процессов в элементах кремниевых интегральных микросхем. Минск: БГУ, 1999. 189 с.

34. Абрамов И. И., Харитонов В. В. Проблемы моделирования элементов кремниевых интегральных схем // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 1991. Вып. 5. С. 3—9.

35. Дворников О. В. Описание элементов в Pspice для высокоточного моделирования аналоговых биполярных ИС. Часть 1. Интегральные резисторы // Проблемы современной аналоговой микросхемотехники: Сб. материалов Межд. научно-практ. семинара. Шахты: Изд. ЮРГУЭС, 2003. Ч. 1. С. 23—27.

36. Дворников О. В. Описание элементов в Pspice для высокоточного моделирования аналоговых биполярных ИС. Часть 2. Интегральные конденсаторы // Проблемы современной аналоговой микросхемотехники: Сб. материалов Межд. научно-практ. семинара. Шахты: Изд. ЮРГУЭС, 2003. Ч. 1. С. 45—48.

37. Абрамов И. И. Курс лекций "Моделирование элементов интегральных схем". Минск: БГУ, 1999. 92 с.

38. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / Под ред. П. Антонетти, Д. Антониадиса, Р. Даттона, У. Оулдхема. М.: Радио и связь, 1988. 496 с.

39. Кремлев В. Я. Физико-топологическое моделирование структур элементов БИС. М.: Высш. шк., 1990. 144 с.

40. Бубенников А. Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. М.: Высш. шк., 1989. 320 с.

41. Денисенко В. Моделирование МОП-транзисторов. Методологический аспект // Компоненты и технологии. 2004. № 7, 8, 9.

42. <http://www.fsa.org>

43. Compact Model Council Homepage. <http://www.eigroup.org/cmcc/>

44. Денисенко В. Проблемы схемотехнического моделирования КМОП СБИС // Компоненты и технологии. 2002. № 3, 4.

От редакции

В статье "Одноэлектронные приборы" (авторы Д. О. Рынков, В. В. Чеча, А. А. Щука, НМСТ, 2005. № 4) разделы 3 и 4 почти дословно воспроизводят текст статьи "Классификация приборных структур одноэлектроники" (авторы И. И. Абрамов, Е. Г. Новик, ж-л "Физика и техника полупроводников". 1999. Т. 33, вып. 11. С. 1388—1394).

Авторы и редакция приносят извинения И. И. Абрамову и Е. Г. Новик за отсутствие ссылки на их работу.

УДК 621.382.3

И. А. Каштанкин, Н. Т. Гурин, д-р физ.-мат. наук, Ульяновский государственный университет
ido@ulsu.ru, kashtankin@mail.ru

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ БИПОЛЯРНЫХ N-ПРИБОРОВ С УПРАВЛЯЕМОЙ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Выполнено моделирование и экспериментальное исследование динамических характеристик фоточувствительных N-приборов на основе двух кремниевых маломощных биполярных транзисторов с общей подложкой. Исследовано влияние инфракрасного излучения на время включения и выключения данных полупроводниковых приборов. Показано, что время переключения N-прибора с шунтированием эмиттерного перехода не превышает 20 нс, N-прибора с модуляцией тока базы — 35 нс.

Приведенные нами в [1, 2] результаты исследования фоточувствительности биполярных полупроводниковых приборов с N-образной вольт-амперной характеристикой открывают возможность создания принципиально новых

датчиков света, элементов генераторной техники и других электронных устройств. Знание динамических характеристик этих устройств при их разработке является немаловажным фактором.

Целью данной работы является

моделирование и экспериментальное исследование динамических характеристик, а также влияния инфракрасного (ИК) излучения (мощностью 10—20 мВт и длиной волны 950 нм) на динамические характеристики двух типов биполярных N-приборов (рис. 1) с шунтированием эмиттерного перехода и с модуляцией тока базы, выполненных на основе планарной кремниевой структуры с общей подложкой [1, 2].

В N-приборах с шунтированием эмиттерного перехода для формирования участка отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) применяется шунтирование эмиттерного перехода. Цепь положительной обратной связи в данном приборе образована транзистором T_2 , коллектор-эмиттерная цепь которого управляет током база-эмиттер транзистора T_1 , формируя N-об-

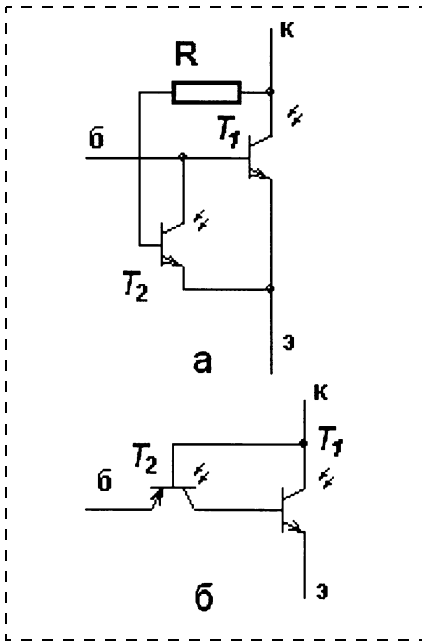


Рис. 1. Схемы замещения N -приборов: a — с шунтированием эмиттерного перехода; b — с модуляцией тока базы

разную выходную вольт-амперную характеристику (ВАХ). Резистор R с сопротивлением 100 Ом предотвращает переход транзистора T_2 в режим насыщения. Значение тока максимума ВАХ такого прибора при увеличении интенсивности засветки базовой области транзистора T_2 снижается из-за увеличения его шунтирующего действия вплоть до полного спрямления при мощности излучения 120 мВт. Облучение базы транзистора T_1 вызывает существенное увеличение тока максимума. При облучении обоих транзисторов превалирует эффект шунтирования (рис. 1, a) [1, 2].

В N -приборах с модуляцией тока базы цепь положительной обратной связи по напряжению образована биполярным транзистором T_2 (рис. 1, b). По мере увеличения напряжения коллектор-эмиттер N -прибора растет потенциал базы транзистора T_2 относительно его эмиттера, транзистор T_2 из активного режима переходит в режим отсечки, при этом ток базы транзистора T_1 , равный току коллектора транзистора T_2 , уменьшается до силы то-

ка утечки коллекторного $p-n$ -перехода транзистора T_2 , что, в свою очередь, приводит к возникновению участка ОДС N -типа на ВАХ. Инфракрасное облучение приводит к росту значения тока максимума ВАХ [2].

Динамические модели N -транзисторов построены в пакете OrCad 9.2 на основе расчетов емкостных и резистивных параметров полупроводниковых пластин. Модель засветки — модифицированная модель транзисторных оптронов с учетом отражения и поглощения ИК излучения поверхностными слоями пластины [1, 2].

Для измерения динамических параметров бистабильных приборов существуют два метода:

1) измерение времени перехода прибора из одного стабильного состояния в другое под воздействием управляющего входного импульса; при этом происходит изменение формы выходной характеристики прибора при стабильном положении нагрузочной прямой;

2) измерение времени перехода прибора из одного стабильного состояния в другое при изменении напряжения питания или нагрузочного сопротивления в выходной цепи; при этом изменяется положение нагрузочной прямой, а форма выходной характеристики не изменяется.

Экспериментальное исследование проводилось с использованием генератора Г5-89 и осциллографа С1-122/13. Ток коллектора I_k фиксировался с нагрузочного резистора $R_n = 10$ Ом, включенного последовательно с коллектором N -прибора. Облучению подвергались одновременно и в равной степени оба транзистора, образующих N -приборы. Световые импульсы формировались с помощью ИК светодиодов АЛ106Д, имеющих следующие характеристики: длина волны 950 нм, время нарастания светового импульса 15 нс, время спада 30 нс. Световой пучок фокусировался на пластине с помощью микроскопа. Погрешность измерения временных характеристик не превышала 8 %, выходных токов — 6 %.

При исследовании динамических характеристик N -прибора с шунтированием эмиттерного перехода (рис. 1, a) управляющий прямоугольный импульс с периодом 200 нс, длительностью 100 нс и напряжением $U_6 = 0,7$ В подавался на базовый электрод N -прибора при постоянном напряжении коллектора $U_k = 1$ В. Как следует из рис. 2, время включения и выключения, полученное первым методом исследования, составило 10 и 20 нс соответственно.

Процесс переключения прибора (как включение, так и вы-

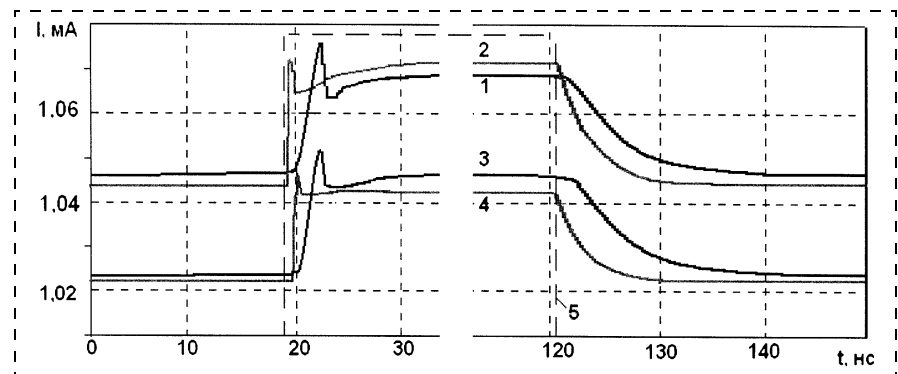


Рис. 2. Временная диаграмма включения и выключения N -прибора с шунтированием эмиттерного перехода при изменении U_6 :

1, 2 — без облучения; 3, 4 — при воздействии постоянного ИК излучения мощностью 30 мВт; 1, 3 — экспериментальные данные; 2, 4 — данные моделирования; 5 — управляющий импульс (показан схематично)

ключение) можно разделить на два этапа:

- рассасывание для выключения (инжекция для включения) неосновных носителей в активной области базы;
- накопление для выключения (стекание для включения) заряда в приколлекторной области.

Небольшой пик, наблюдаемый на диаграмме включения, характеризует переход рабочей точки через участок ОДС с последующим выходом на участок паразитной вторичной ветви ВАХ. Воздействие постоянного ИК излучения существенно не влияет на время переключения, наблюдается лишь уменьшение тока коллектора, вызванное фотогенерацией носителей в приколлекторной и в базовой областях транзистора T_1 , что приводит к усилению шунтирующего эффекта [1, 2].

При измерении динамических характеристик вторым методом прямоугольный импульс подавался на коллекторный электрод N-прибора при постоянном напряжении базы $U_6 = 0,5$ В, имел амплитуду $U_k = 0,6$ В, период 200 нс, длительность 100 нс. Время переключения при этом не превышает 15 нс (рис. 3). При облучении наблюдается уменьшение времени включения и времени выключения до 7 нс, обусловленное снижением заряда в приколлекторной области транзистора T_1 .

Характеристика переключения N-прибора под действием импульса ИК излучения мощностью 25 мВт при постоянных $U_6 = 0,5$ В и $U_k = 0,4$ В представлена на рис. 4. Длительность импульса — порядка 120 нс. Как следует из рис. 4, время включения и выключения даже без учета времени нарастания и спада светового импульса не превышает 30 нс.

Рассмотрим динамические характеристики N-прибора с модуляцией тока базы (см. рис 1, б).

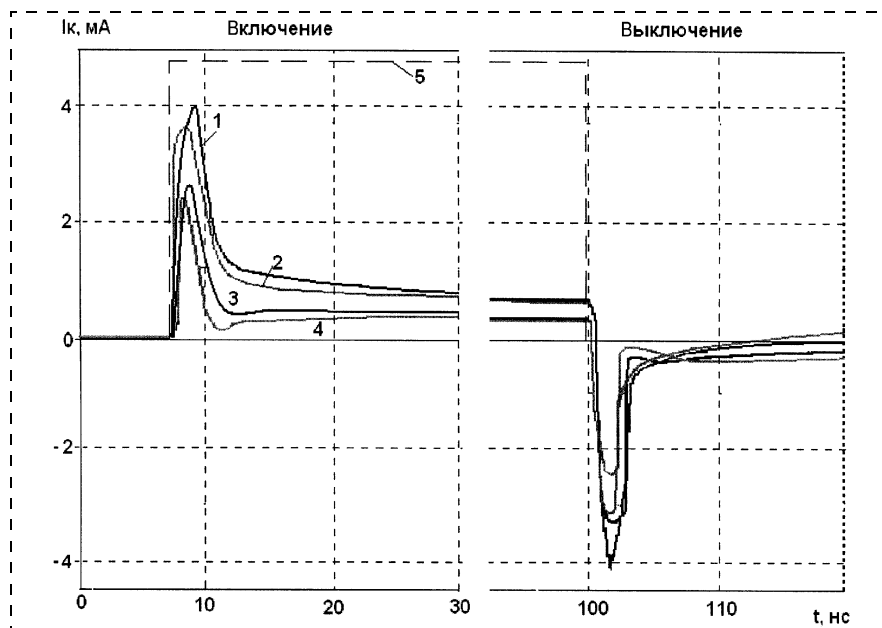


Рис 3. Временная диаграмма включения и выключения N-прибора с шунтированием эмиттерного перехода при изменении U_k :

1, 2 — без облучения; 3, 4 — при воздействии постоянного ИК излучения мощностью 50 мВт; 1, 3 — экспериментальные данные; 2, 4 — данные моделирования; 5 — управляющий импульс (показан схематично)

При измерении характеристик первым методом амплитуда импульса, подаваемого на базу, составляла $U_6 = 1$ В, длительность 150 нс, напряжение коллектора $U_k = 1$ В. Как и в первом случае (см. рис. 2), на временных диаграммах (рис. 5) наблюдаются

пики, обусловленные переходом рабочей точки через участок ОДС. Отсутствие вторичной ветви на ВАХ [2] характеризует спад выходного тока после преодоления участка ОДС до значений порядка 1 мА. Время включения составляет 35 нс, при облучении —

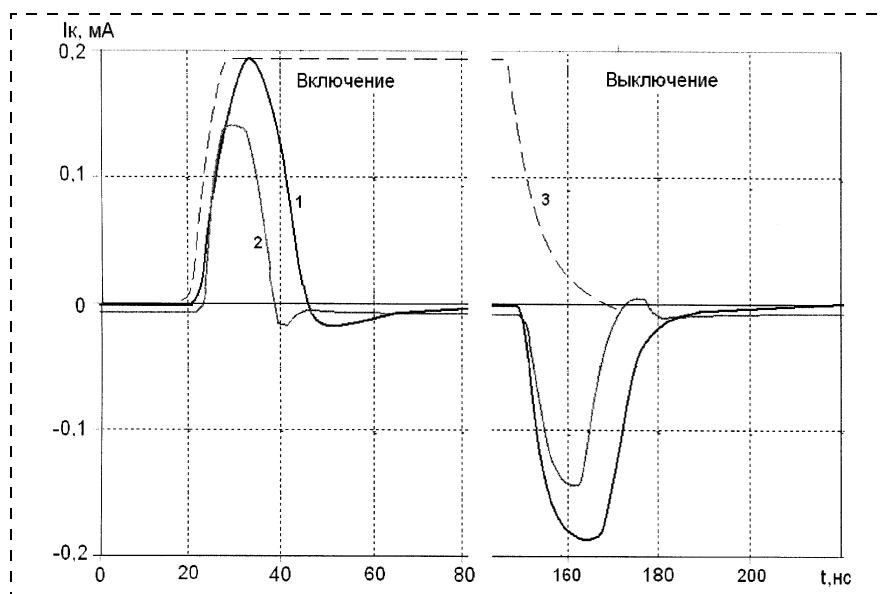


Рис 4. Временная диаграмма включения и выключения N-прибора с шунтированием эмиттерного перехода при подаче импульса ИК мощностью 25 мВт:

1 — экспериментальные данные; 2 — данные моделирования; 3 — управляющий ИК импульс (показан схематично)

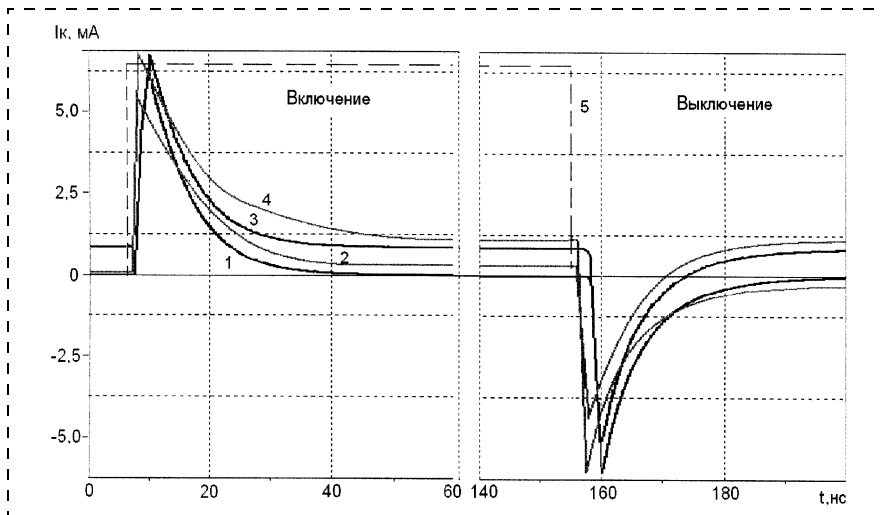


Рис 5. Временная диаграмма включения и выключения N -прибора с модуляцией тока базы при изменении U_6 :

1, 2 — без облучения; 3, 4 — при воздействии импульса ИК излучения мощностью 20 мВт; 1, 3 — экспериментальные данные; 2, 4 — данные моделирования; 5 — управляющий импульс (показан схематично)

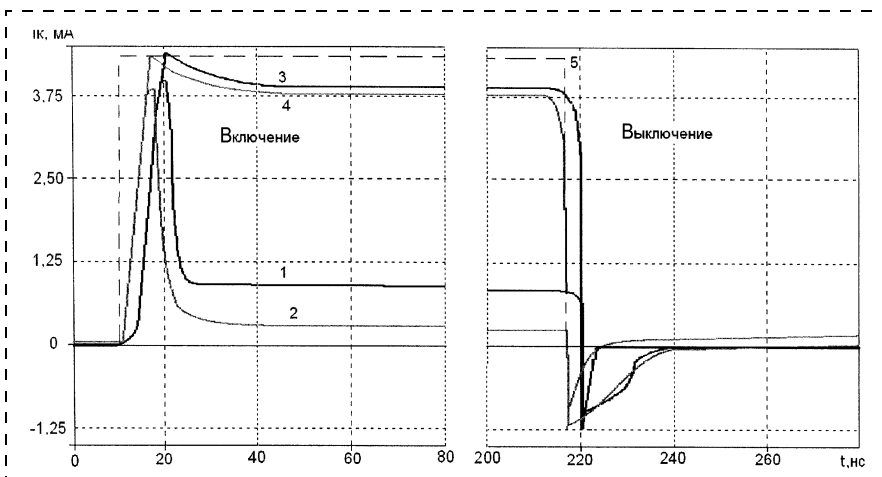


Рис 6. Временная диаграмма включения и выключения N -прибора с модуляцией тока базы при модуляции напряжения питания U_k :

1, 2 — без облучения; 3, 4 — при воздействии импульса ИК излучения мощностью 50 мВт; 1, 3 — экспериментальные данные; 2, 4 — данные моделирования; 5 — управляющий импульс (показан схематично)

40 нс; время выключения — 35 нс.

При измерении динамических характеристик вторым методом амплитуда импульса, подаваемого на коллектор, составляла $U_k = 1$ В, длительность 140 нс, напряжение базы $U_6 = 1$ В, время включения 15 нс, время выключения 7 нс. В отличие от предыдущего варианта N -прибора, в котором вызванный засветкой процесс шунтирования уменьшал количество заряда в приколлекторной области транзистора T_1 , во втором ва-

рианте N -прибора происходит увеличение времени переключения до 20 нс (рис. 6) из-за того, что при воздействии ИК излучения фотогенерация в данном N -приборе в конечном итоге приводит к накоплению заряда в приколлекторной области транзистора T_1 . При этом N -участок исчезает, N -прибор выходит в область насыщения подобно обычному биполярному транзистору [2].

Динамические характеристики N -прибора с модуляцией тока

базы под действием управляющего ИК импульса мощностью 20 мВт, длительностью порядка 140 нс при $U_6 = 1$ В и $U_k = 0,3$ В представлены на рис. 7. Из рис. 7 следует, что без учета времени нарастания и спада светового импульса время включения N -прибора составляет 30 нс, время выключения — 35 нс.

Энергия переключения рассмотренных N -приборов при модуляции коллекторного тока не превышает 90 пДж. Потребляемая мощность одного N -прибора в статическом режиме не превышает 2 мВт.

Таким образом, фоточувствительные биполярные N -приборы помимо возможности управления формой ВАХ в зависимости от пространственных параметров и интенсивности ИК излучения и малого рабочего напряжения (до 0,7 В) характеризуются также и достаточно малым временем включения и выключения, не превышающим 35 нс для N -прибора с модуляцией тока базы и 20 нс для N -прибора с шунтированием эмиттерного перехода. При этом возможно переключение N -приборов как электрическими импульсами во входной и выходной цепях, так и при воздействии импульсов ИК излучения на транзисторы, образующие положительную обратную связь (шунтирующий или модулирующий), и на управляемый транзистор N -прибора. Возможно управление и при совместном действии электрических и световых импульсов. При подаче импульса ИК излучения наблюдается уменьшение времени переключения N -транзистора с шунтированием эмиттерного перехода и увеличение времени переключения N -прибора с модуляцией тока базы. По энергии переключения рассмотренные приборы соответствуют логическим базовым элементам СБИС. Следует отметить, что рассмотренные фоточувствительные N -приборы не оптимизированы по конструкции для

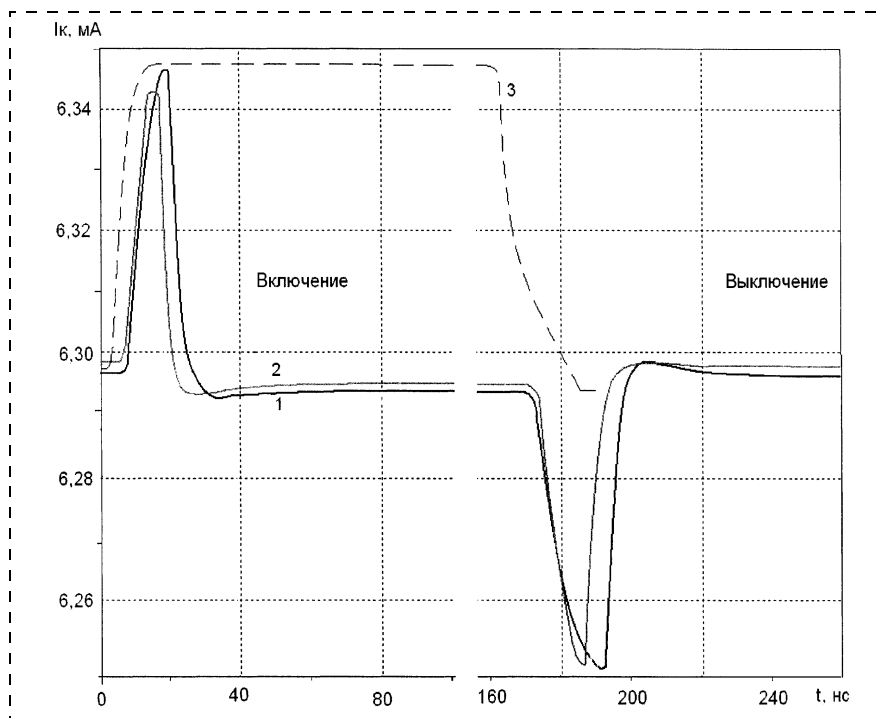


Рис 7. Временная диаграмма включения и выключения *N*-прибора с модуляцией тока базы при воздействии импульса ИК излучения мощностью 20 мВт:

1 — экспериментальные данные; 2 — данные моделирования; 3 — управляющий импульс (показан схематично)

достижения минимального времени переключения.

Полученные результаты показывают, что исследованные фоточувствительные *N*-приборы могут быть использованы в быстродействующих фоточувствительных динамических датчиках, оптоэлектронных генераторах, АЦП и в устройствах микросистемной техники.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации № НШ-1482.2003.8.

Список литературы

1. Каштанкин И. А., Гури́н Н. Т. Фоточувствительный кремниевый биполярный *N*-прибор с управляемой вольт-амперной характеристикой // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 31. Вып. 13. С. 46—49.
2. Каштанкин И. А., Гури́н Н. Т. Фоточувствительные кремниевые биполярные *N*-приборы с управляемой вольт-амперной характеристикой // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 6. С. 39—42.

УДК 681.586'33

С. А. Поломошнов,
Ю. А. Чаплыгин, чл.-корр. РАН, проф., МИЭТ,
г. Москва (Зеленоград);
В. В. Амеличев, канд. техн. наук,
И. В. Годовицын, канд. техн. наук,
ГУ НПК ТЦ МИЭТ, г. Москва (Зеленоград);
О. М. Иванова, канд. хим. наук,
С. А. Крутоверцев, канд. техн. наук,
ОАО "Практик НЦ", г. Москва (Зеленоград)

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДАТЧИКА ВЗРЫВООПАСНЫХ ГАЗОВ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МЕМБРАНЕ

Разработан преобразователь датчика взрывоопасных газов на диэлектрической мембране (около 1 мкм). Кристалл преобразователя изготовлен с применением микросистемных технологий. Газочувствительный слой на основе SnO_2 наносился на мембрану с помощью толстопленочной технологии. Исследованы основные метрологические характеристики изготовленных экспериментальных образцов преобразователей датчика взрывоопасных газов на основе SnO_2 в присутствии взрывоопасных газов H_2 , CH_4 , C_4H_{10} .

Введение

Миниатюрные микроэлектронные датчики широко используются в современных управляющих, контрольно-измерительных системах во многих отраслях промышленности: машиностроительной, добывающей, аэрокосмической, электронной, автомобильной и др. Перспективы создания портативных газоанализаторов с высокой чувствительностью и приемлемой стоимостью открылись после разработки и освоения массового производства полупроводниковых газовых датчиков [1, 2]. Принцип действия таких датчиков основан на явлении изменения электрического сопротивления пленочного полупроводника при адсорбции на его поверхности молекул различных газов: чем больше концентрация молекул в окружающем пленку газе, тем больше число адсорбированных на поверхности молекул и тем больше изменение сопротивления пленки.

При изготовлении датчика на его поверхность наносится слой полупроводникового материала, который проявляет чувствительность к детектируемым газам при повышенных температурах. Составом чувствительного слоя и свойствами детекти-

руемого газа определяется рабочая температура преобразователя при измерении того или иного газа. В настоящее время номенклатура детектируемых газов значительно возросла благодаря легированию металлооксидных пленок различными примесями. Использование примесей позволяет также повысить разрешающую способность первичного преобразователя, так как в случае высокоактивных и высокотоксичных газов требуется сигнализировать о концентрации в диапазоне $1-1000 \cdot 10^{-7}$ об. % (или $1-1000$ ppb).

Конструкция преобразователя

Обязательным элементом газочувствительного датчика на основе металлооксидных пленок является нагреватель, обеспечивающий достижение рабочих температур в диапазоне $100-550^\circ\text{C}$ в зависимости от типа детектируемого газа. Для уменьшения рассеяния теплоты и снижения потребляемой мощности нагреватель помещают на основание, обладающее хорошими теплоизоляционными свойствами. В большинстве известных датчиков в качестве такого основания выступает керамическая пластина толщиной $0,2-0,4$ мм. У имеющихся на рынке приборов потребляемая нагревателем мощность при напряжении питания 5 В составляет не менее 200 мВт (например, газочувствительные датчики фирмы Figaro [3]). Такое высокое значение потребляемой мощности ограничивает использование датчиков в составе портативных устройств и систем.

Представленный в данной статье преобразователь, предназначенный для использования в датчике взрывоопасных газов (ДВОГ), изготовлен с применением технологии микромеханики. Конструкция кристалла преобразователя ДВОГ показана на рис. 1. Она представляет собой профилированный кремниевый кристалл размером 4×4 мм. Основой конструкции преобразователя является тонкая диэлектрическая мембрана, состоящая из диэлектрических слоев оксида кремния (SiO_2) и нитрида кремния (Si_3N_4). На мембране нанесен слой на основе оксида олова (SnO_2), который использует-

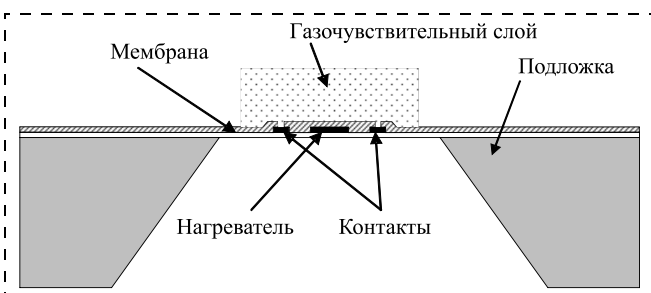


Рис. 1. Конструкция кристалла преобразователя датчика взрывоопасных газов

ся для детектирования водородосодержащих взрывоопасных газов. Выбор в качестве газочувствительного материала SnO_2 в данной работе обусловлен изученностью его свойств [4].

Моделирование процессов рассеяния теплоты в ДВОГ показало, что оптимизация конструкции датчиков позволит снизить потребляемую мощность до $20-25$ мВт, тем самым сделав их перспективными с точки зрения использования в портативных устройствах [5, 6].

Технология изготовления преобразователя

Технология изготовления кристалла преобразователя ДВОГ состоит из стандартных операций тонкопленочной технологии кремниевых интегральных схем и операций объемной микрообработки кремния для формирования мембраны (рис. 2). На первом этапе (рис. 2, а) с использованием технологических операций окисления, осаждения пленки Si_3N_4 и фотолитографии с обратной стороны пластины формируют маску для анизотропного травления кремния. В результате травления кремния в водном растворе КОН формируются кремниевые мембраны, толщина которых оптимизирована исходя из необходимости обеспечения надежности пластины в течение всего цикла изготовления кристалла, за исключением последнего этапа. На втором этапе методами стандартной тонкопленочной технологии в области мембраны на лицевой поверхности пластины формируется тонкопленочный резистор нагревателя, контакты к газочувствительному слою и выходные контактные площадки (рис. 2, б). На следующем этапе осаждается пассивирующая пленка (рис. 2, в), в которой методами фотолитографии формируются необхо-

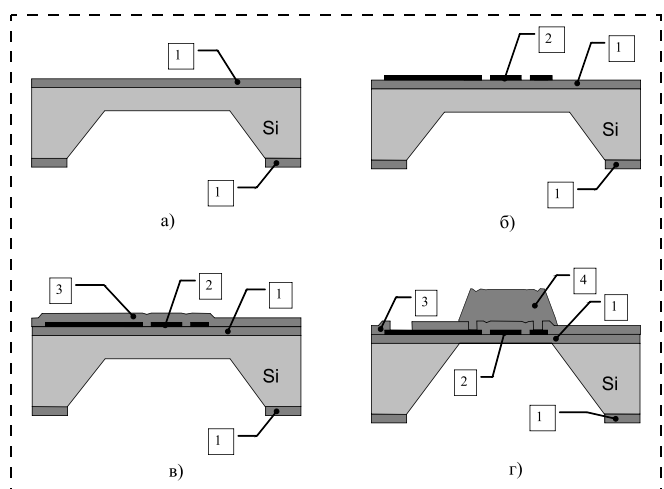


Рис. 2. Технологические этапы изготовления преобразователя датчика взрывоопасных газов:

1 — нитрид кремния Si_3N_4 ; 2 — металлический нагреватель и контакты к газочувствительному слою; 3 — пассивирующий слой; 4 — газочувствительный слой

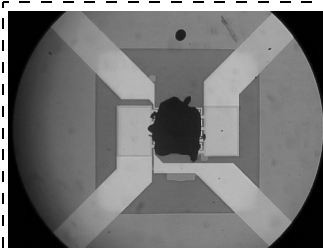


Рис. 3. Мембрана с газочувствительным слоем, нанесенным точечным способом, из пасты на основе SnO_2

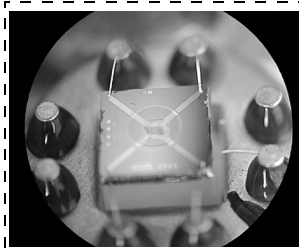


Рис. 4. Преобразователь датчика взрывоопасных газов, собранный в металlostеклянном корпусе

димые контактные окна. Затем в результате травления кремния в селективном к SiO_2 травителе осуществляют сквозное травление кремния в области мембраны с обратной стороны подложки до диэлектрика. На последнем этапе на мембрану наносится газочувствительный слой на основе SnO_2 толщиной 10—15 мкм (рис. 2, з). Сборка кристалла преобразователя ДВОГ осуществляется в металlostеклянный корпус с отверстиями в крышке.

Было проведено исследование возможности формирования газочувствительных слоев точечным способом. Для детектирования взрывоопасных газов использовались слои на основе паст SnO_2 , легированных палладием Pd. Фотография мембраны с газочувствительным слоем представлена на рис. 3. После нанесения газочувствительного слоя из пасты выполнялся отжиг на воздухе при температуре 500 °С. Толщина полученной пленки составляла 10—15 мкм. Фотография преобразователя в металlostеклянном корпусе приведена на рис. 4.

Исследования

Для проведения измерений основных метрологических характеристик экспериментальных образцов датчиков на основе SnO_2 использовался компьютеризированный стенд на основе генератора газовых смесей сер. 4000 фирмы Environics (США). Изучение чувствительности полученных пленок к взрывоопасным и другим газам в воздухе выполнялось с помощью стенда динамического смешения газов, на котором создавались необходимые концентрации. Измерения проводились в потоке газовой смеси 0,1 л/мин. При исследованиях использовались образцовые газовые смеси и устройство для получения газовых смесей RG-230 фирмы Riken Keyki.

При термотренировке нихромового нагревателя в течение 100 ч при температуре 450 °С (рис. 5) происходит стабилизация его сопротивления. Исследования показали, что потребляемая разработанными датчиками мощность не превышает 40 мВт при рабочей температуре 450 °С для разных образцов. На

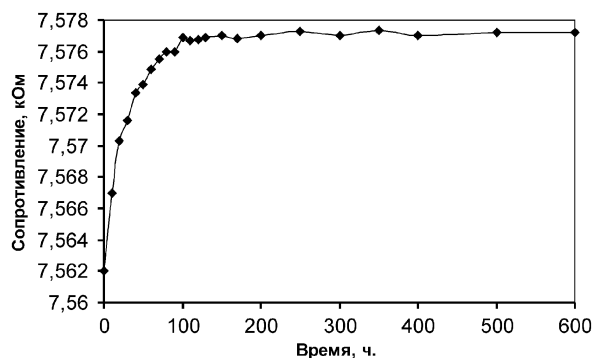


Рис. 5. Временная стабильность нагревателя преобразователя ДВОГ, расположенного на мембране, при температуре 450 °С

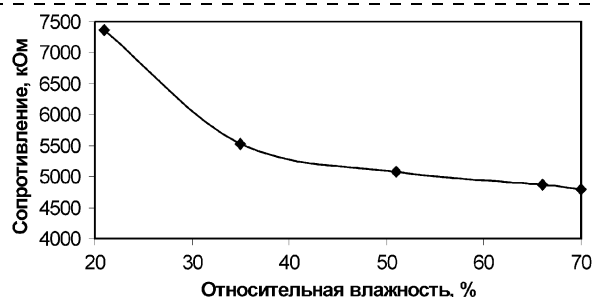


Рис. 6. Типичная зависимость сопротивления чувствительного элемента преобразователя датчика взрывоопасных газов от относительной влажности воздуха

рис. 6 приведена типичная зависимость сопротивления преобразователя датчика взрывоопасных газов от относительной влажности воздуха. Как видно на рисунке, в диапазоне значений относительной влажности 40—70 % сопротивление газочувствительного слоя незначительно зависит от указанного параметра окружающей среды.

Чувствительность разработанного преобразователя ДВОГ к водороду является высокой, диапазон

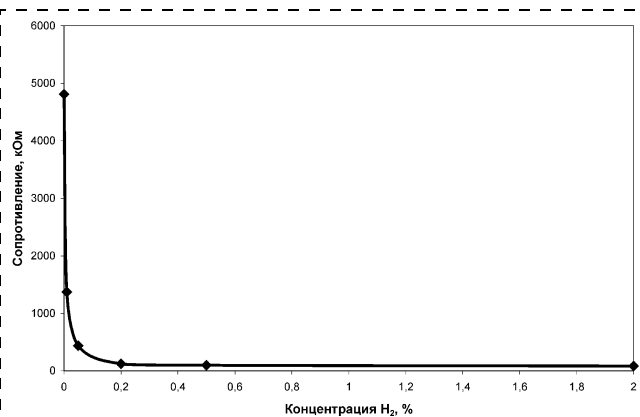


Рис. 7. Типичная зависимость сопротивления чувствительного элемента преобразователя ДВОГ от концентрации водорода в воздухе при температуре нагревателя 350 °С и относительной влажности воздуха 53 %

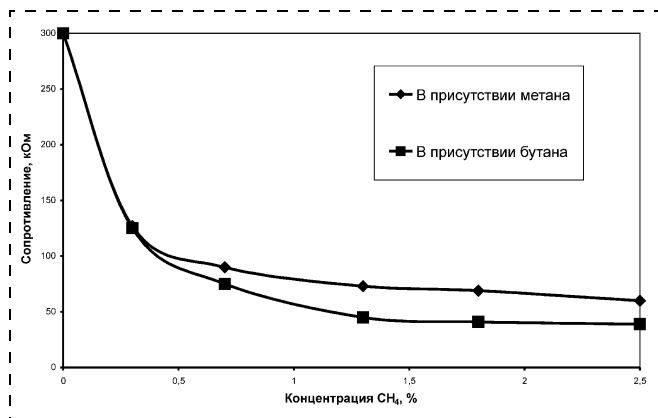


Рис. 8. Типичная зависимость сопротивления чувствительного элемента преобразователя ДВОГ от концентрации метана и бутана в воздухе при температуре нагревателя 500 °С и относительной влажности воздуха 50 %

срабатывания для легированного SnO₂ составляет 0,02—0,50 об. % (рис. 7).

Чувствительность к метану разработанных преобразователей несколько хуже и составляет 0,05—2,50 об. %, но тем не менее калибровочные характеристики имеют хорошо выраженную стабильность показаний при изменении незначительной концентрации метана в воздухе (рис. 8). Для сравнения на рис. 8 приведена характеристика того же преобразователя по отношению к бутану. Как видно на рисунке, изменение сопротивления во втором случае больше. Влажность воздуха не изменяет концентрационный порог срабатывания преобразователя. Быстродействие преобразователя ДВОГ составляет 0,5—1,0 с.

Заключение

Разработан и изготовлен преобразователь ДВОГ на диэлектрической мембране. На мембрану с помощью толстопленочной технологии наносился газочувствительный слой на основе SnO₂. Исследованы основные метрологические характеристики изготовленных экспериментальных образцов преобразователей ДВОГ на основе SnO₂ в присутствии взрывоопасных газов H₂, CH₄, C₄H₁₀. Установлено, что наибольшей чувствительностью экспериментальные образцы преобразователей ДВОГ обладают к водороду. Полученные газочувствительные слои характеризуются хорошей стабильностью. Потребляемая мощность экспериментальных преобразователей составляет 35—40 мВт. Моделирование процессов рассеяния теплоты в кристалле преобразователя ДВОГ с диэлектрической мембраной показывает, что путем оптимизации отдельных элементов данной конструкции возможно достичь мощности потребления в 20—25 мВт.

Список литературы

1. Васильев А. А. Микромощные полупроводниковые сенсоры на тонких диэлектрических мембранах // Микросистемная техника. 2004. № 10. С. 7—12.
2. Васильев А. А., Олихов И. М., Соколов А. В. Газовые сенсоры для пожарных извещателей // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2005. № 2. С. 24—27.
3. Figaro: датчики газов // Библиотека электронных компонентов. Вып. 30. М.: Издательский дом "Додэка-XXI". 2003. 64 с.
4. Chiorino A., Chiotti G., Prinetto F., Carotta M. C., Martinelli G., Merli M. Characterization of SnO₂-based gas sensors. A spectroscopic and electrical study of thick films from commercial and laboratory-prepared samples // Sensors and Actuators B: Chemical. 1997. Vol. 44. P. 474—482.
5. Амеличев В. В., Годовицын И. В., Красюков А. Ю., Поломошнов С. А., Чаплыгин Ю. А. Разработка интегрального газочувствительного датчика с использованием средств моделирования // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления. Сб. материалов XVI научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов / Под ред. В. Н. Азарова. М.: МГИЭМ, 2004. С. 43—44.
6. Амеличев В. В., Годовицын И. В., Красюков А. Ю., Поломошнов С. А., Чаплыгин Ю. А. Оптимизации конструкции мембраны в теплодисперсионном датчике взрывоопасных газов // Изв. вузов. Сер. "Электроника". 2005. № 3. С. 60—67.

VII Всероссийская конференция Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем

22—24 ноября, 2005 год
Ершово, Московская обл.

Межрегиональное научно-техническое
общество материаловедов (МОМ)
Московский инженерно-физический институт
(МИФИ)

Тематика конференции

- Общие и теоретические вопросы наноразмерного состояния вещества.
- Способы получения ультрадисперсных (нано-) частиц и объемных материалов с наноструктурой.
- Особенности структуры и свойств, связанные с малым размером вещества.
- Методы исследования и аттестации.
- Применение наноматериалов в практике.
- Вопросы коммерциализации нанотехнологий на российском и зарубежных рынках.

Тел.: (095) 323-92-03; 324-06-30
Факс: (095) 323-90-64, 324-21-11
E-mail: petrunin@atomic.mephi.ru

Продукты нанотехнологий завоевывают мировой рынок

Компания NANOIDENT AG, мировой лидер в области органических фотонных сенсоров, представила первый органический полупроводниковый фотонный сенсор высокого разрешения для промышленных применений. Разрешение сенсора составляет 250 dpi при размере 50×50 пикселей. Применение органической пленки в качестве основы сенсора позволило сделать его гибким и тонким. Как говорят эксперты, органический сенсор от NANOIDENT открывает новый класс в области фотонных сенсоров. Основная особенность нового продукта, помимо высокого разрешения, — его низкая стоимость, поэтому наносенсор будет лидировать на мировом рынке (рис. 1).

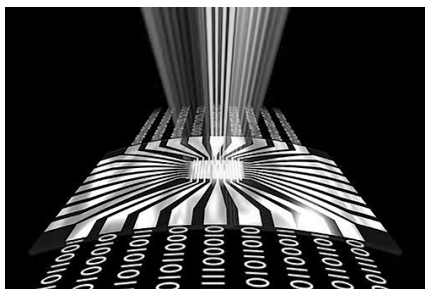


Рис. 1. Работа фотонного сенсора от NANOIDENT

Появление на рынке органического фотонного сенсора, созданного с помощью нанотехнологий, означает, что коммерциализация нанопродуктов успешно началась. Если ранее подобные устройства можно было сделать в единичных экземплярах в лаборатории, то сегодня их производят массово и они конкурентоспособны на мировом рынке. "Рынок фотонных сенсоров возник еще около 40 лет назад, а с появлением органического наносенсора мы предвидим большие маркетинговые изменения, — говорит глава компании NANOIDENT Клаус Шретер. — Это первый в мире гибкий наносенсор, позволяющий детектировать фотоны с высоким разрешением". Как далее заявляет Клаус, новый продукт будет использоваться в системах распознавания отпечатков пальцев, так называемых умных карточках и различных биочипах.

Органический сенсор состоит из гибкой PET-пленки, содержащей ультратонкие слои микроструктурированных электродов и фотоактивных полупроводников (рис. 2). "Мы смогли разработать технологию, позволяющую наносить полупровод-

никовые слои на пленку подобно тому, как происходит печать изображения на струйном принтере. Грубо говоря, мы просто печатаем на пленке несколько слоев наносенсоров специальным составом, содержащим жидкие полупроводники. Это позволяет существенно снизить производственные затраты и, как следствие — себестоимость продукта и его конечную цену", — говорит Клаус.

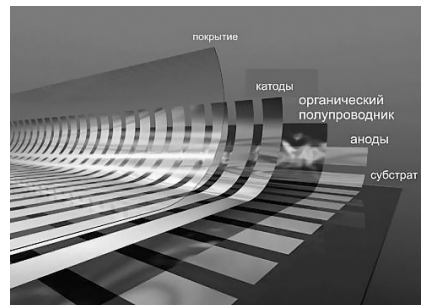


Рис. 2. Структура фотонного чипа

Многие мировые эксперты-маркетологи уверены в том, что появление этого нанопродукта ознаменовало начало коммерциализации нанотехнологий и продуктов с их использованием. "Чтобы производить это устройство в больших количествах, нам потребовалось провести не один год научно-технических исследований в области органической фотоники, нанофизики, физики покрытий и органических полупроводников. Но зато теперь можно с уверенностью сказать, что годы разработок окупятся", — говорит Клаус. Компания NANOIDENT также сотрудничает с несколькими научно-исследовательскими организациями, благодаря которым были проделаны исследования в области органических полупроводников, необходимые для производства сенсора.

Источник: Nanotechnology-Now: NANOIDENT AG realizes the first high-resolution organic photonic sensor

Нановелосипед покажет себя на Tour de France

В этом году участники велогонки *Tour de France* увидят первый велосипед с рамой из композита, содержащего нанотрубки. На нем выступят члены команды *Phonak Team*. Изготовлен велосипед швейцарской компанией *BMC*, которая утверждает, что спортивная машина при массе менее 1 кг характеризуется высокой прочностью.

Рама велосипеда выполнена из композитного материала на основе нанотрубок, разработанного

специалистами из компании *Easton*, которая состоит в тесном сотрудничестве с компанией *Zyvex*. Специальный композит формирует из нанотрубок пространственную сетку-матрицу, благодаря которой достигается столь большая жесткость при небольшой массе материала.

Вклад компании *Zyvex* состоит в том, что она разработала состав, позволяющий модифицировать поверхность углеродных нанотрубок таким образом, чтобы они легко входили в состав композита-наполнителя, составляющего основу велосипедной рамы.

Компания *ВМС* первой сделала велосипед с нанорамой на основе углеродных нанотрубок. Рама после производства требует дальнейшей обработки, так как это может повредить волокна нанотрубок, она была изготовлена по прецизионной технологии. После выпуска первого велосипеда компания *ВМС* заявила, что она собирается впредь вкладывать деньги в нанотехнологии и композитные материалы на основе нанотрубок. Так что, скорее всего, гоночный велосипед откроет новую линию продуктов, доступных и обычным потребителям.

Источник: Nanotechweb: Nanotube bike enters Tour de France

Мозг на нанопроводниках

Представьте себе, что через ваши артерии врачи проводят тонкие нанопроводники, которые достигают головного мозга, устанавливая мониторинговую связь с ним. Зачем это нужно? Для лечения и диагностики различных заболеваний, например, болезни Паркинсона или Альцгеймера, говорят исследователи из Массачусетского технологического института, США.

Ученый в области нейронаук Рудольфо Ллинас и его коллеги предвидят, что с помощью подобной процедуры можно будет получать информацию в реальном времени о различных отделах мозга пациента. Теоретически можно будет "подобраться" к отдельным нервным узлам и даже клеткам по тонким кровеносным сосудам.

В июльском выпуске "Журнала исследования наночастиц" ученые поясняют, как будет проходить процедура имплантации нанострун. В одну из крупнейших артерий больного вводится катетер, через который пучок нанострун проникнет в кровеносную систему (рис. 3). Так как их диаметр исчисляется несколькими нанометрами, в то время как диаметр самых тонких капилляров составляет несколько микрометров, то наноструны не смогут помешать естественной циркуляции крови, переносу газов и транспорту нутриентов. Потом "нанобукет" проводится непосредственно в мозг, где отдельные наноструны распределяются на передачу

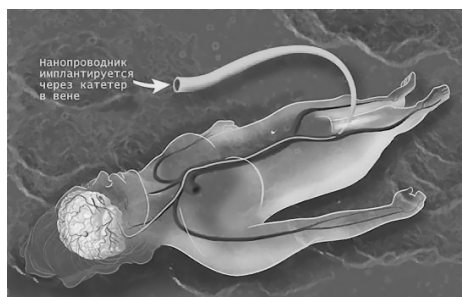


Рис. 3. Процесс имплантации нанозонда

информации от различных участков головного мозга.

Для подтверждения нового метода диагностики ученые поставили ряд экспериментов с живыми образцами ткани. Им удалось ввести платиновый нанопровод по кровеносному сосуду и с его помощью получать сигналы от нервных клеток, лежащих около капилляра.

Как говорит Рудольфо Ллинас, современные методы диагностики мозга (томография и магниторезонансная диагностика) не дают полной информации о тех электрических процессах, которые происходят в головном мозге. И, естественно, они не могут выделить из общей картины сигналы от нервного узла, не говоря уже об отдельных клетках. "Поэтому мы решили предложить метод, позволяющий изучать мозг на уровне отдельных взаимодействий "нейрон—нейрон". При этом внедрение нанoeлектродов будет нетравматичным", — говорит Майкл Роко, председатель Национальной Инициативы США в области нанотехнологии. Как оказалось, Роко тоже заинтересован этой проблемой и наблюдает за достижениями ученых.

С помощью нанoeлектродов также можно будет посылать в мозг электрические сигналы, что дает надежду на излечение таких заболеваний, как болезнь Паркинсона. Только вот как заставить нанопроводник проникнуть в строго определенные отделы головного мозга? Для этого ученые предлагают использовать полимерный нанопроводник, который изгибается в зависимости от поданного на него напряжения. Так, следя за имплантом с помощью традиционных методов диагностики, врач сможет направить нанопровод-зонд через капилляры в интересующие его места головного мозга. Нанопроводники-полимеры в 20 раз тоньше платиновых, а это значит, что с их помощью врач сможет добраться до отдельных нервных клеток.

"Этот новый класс наноматериалов характеризуется большой степенью свободы (при активации полимера электричеством). И создание управляемого гибкого импланта стало возможным только благодаря нанотехнологиям, — говорит один из

исследователей Массачусетского технологического института. — Так что не исключено, что в скором времени у врачей появится новый нейроинструмент, который будет диагностировать и лечить заболевания головного мозга".

Источник: Nanotech-Now: Wiring the Brain at the Nanoscale

Микроорганизмы синтезируют проводящие нанонити

Команда исследователей из Массачусетского университета в Амхерсте открыла электропроводящие органические структуры. Это достижение позволит разработать методы очистки сточных вод микроорганизмами и попутно вырабатывать электроэнергию.

Исследователи-микробиологи открыли нитчатую структуру, названную ими "микробный нанопроводник", которую формируют микроорганизмы *Geobacter*. Нанопроводники имеют гладкую структуру и толщину всего 3—5 нм. Длина же их может составлять около 30—50 мкм (рис. 4).

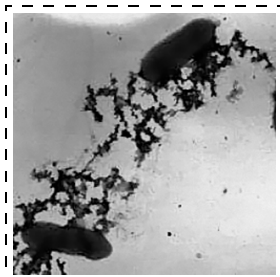


Рис. 4. Бактерии формируют проводящую наносеть

"Такие длинные проводящие биологические структуры в биологических системах ранее не встречались, — говорит один из исследователей, доктор Лавли. — Это

открытие заставляет нас пересмотреть процессы переноса электронов в микроорганизмах. Может быть, нанопроводники, сформированные с помощью микроорганизмов, станут основой многих сверхмалых микроэлектронных устройств".

"Микромир все еще не перестает удивлять нас", — говорит доктор Аристид Патрино из Департамента энергетики США. Эта организация финансирует все исследования, проводимые в области использования микроорганизмов *Geobacter* для очистки сточных вод и производства электроэнергии.

"Эти удивительные биологические наноструктуры можно заставить работать на пользу человечеству. Представьте себе мини-реакторы, очищающие сточные воды и попутно вырабатывающие электроэнергию. Их также можно использовать в роли сенсоров, определяющих, заражена ли окружающая среда теми или иными опасными веществами", — продолжил Аристид.

Доктор Лавли был первооткрывателем микроорганизма *Geobacter* в 1987 г. С тех пор прошло много времени, сформировалась нанотехнология как наука и течение в технологии. Стали возможны взаимосвязи между кремниевой электроникой и органической. Поэтому доктор уверен, что недав-

нее открытие нанонитей, сформированных бактериями, позволит сделать эту взаимосвязь еще прочнее.

Микроорганизм *Geobacter* неслучайно выбрали на роль живой батарейки. Это один из немногих типов бактерий, которые могут разлагать продукты жизнедеятельности человека, перерабатывая токсичные металлы и нефть, вырабатывая электричество. Однако для того, чтобы передавать электроэнергию, бактерии необходимы электроды, связывающие биохимию клетки с внешним потребителем электроэнергии. Для этого, как установили ранее Лавли и его коллеги, бактерия производит с одной стороны мембраны тонкие нанопроводники, названные пилиями. Это открытие было подтверждено другой группой ученых во главе с микробиологом Гемма Ругера и физиком Марком Туомином: они произвели контактные исследования пилий с помощью атомно-силового микроскопа и установили, что они проводят электроэнергию. Более того, генетически измененные микроорганизмы *Geobacter*, которые не могут производить пилии, не смогли, соответственно, проводить электроэнергию и очищать сточные воды.

"Результаты этих исследований показали, что производство электроэнергии и переработка отходов бактериями тесно связаны между собой," — говорит доктор Лавли.

Проводящие пилии и есть те "нанопроводники", которые ученые планируют использовать в нанoeлектронике. Для того чтобы бактерии смогли выпускать длинную нанопроволоку, Лавли предлагает использовать генную инженерию.

Другой интересный факт, открытый учеными, — передача электроэнергии от бактерии к бактерии через сеть, сформированную пилиями.

О своих открытиях доктор Лавли и его коллеги сообщили в журнале *Nature* в статье "*Extracellular Electron Transfer Via Microbial Nanowires*".

Источник: Nanotech-Now: Researchers discover microbes produce miniature electrical wires

Ученые построили первый наножидкостный транзистор для химических компьютеров

Исследователи из университета Калифорнии в Беркли создали первый в мире наножидкостный транзистор как на основе наноканалов, так и на основе нанотрубок.

Термин "наножидкостный" означает, что устройство контролирует перемещение жидкости и определенных ионов через каналы субмикрометрового диаметра (рис. 5). Ранее удавалось создавать наножидкостные каналы диаметром до 30 нм. Наножидкостные системы уже используются в лабо-

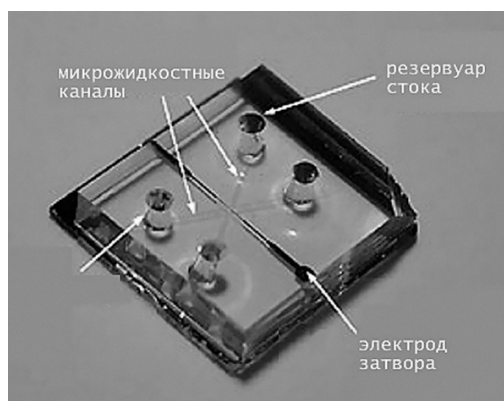


Рис. 5. Структура наножидкостного транзистора

расториях-на-чипе и гибридных наноэлектронных устройствах, позволяющих получить электроэнергию от протекающих биохимических процессов в живых клетках, находящихся *in vitro* внутри чипа.

Авторы новинки — химики и инженеры — предсказывают, что подобно тому, как электронные полупроводниковые транзисторы послужили кирпичиками для микросхем, наножидкостный транзистор послужит основой для миниатюрных химических заводов "на чипе", работающих без единой подвижной детали.

"Транзистор походит на клапан: вы используете электричество, чтобы открыть или закрыть его, — объяснил Арун Маджумдар, один из авторов проекта. — Здесь же мы используем напряжение, чтобы открыть или закрыть ионный канал. Теперь, когда мы построили этот стандартный блок, мы можем приспособить его к электронному чипу, чтобы управлять хмрастворами".

Устройства на основе нового транзистора могут диагностировать заболевания, в частности рак на ранней стадии. Теоретически чип может обработать всего 10 раковых клеток, выделив из них белковые маркеры, характерные именно для этого типа заболевания. А с помощью таких индивидуальных меток врач сможет провести более эффективную диагностику и последующее лечение заболевания.

"Химические компьютеры — идеальный инструмент для изучения белков и ферментов. Также они откроют новый этап развития технологии идентификации различных химических соединений: от белков до живых клеток, — говорит Арун. — Идентификация белков-маркеров раковых клеток на начальных стадиях заболевания позволит ученым эффективнее бороться с раком и другими болезнями".

Коллега Аруна, Пейдонг Янг, построил аналог наножидкостного транзистора с использованием нанотрубок в роли проводящих каналов (рис. 6).

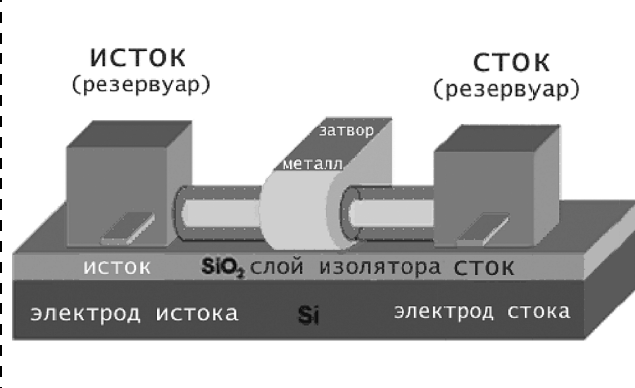


Рис. 6. Нанотранзистор с каналом из нанотрубки на кремниевой плате

После проведения ряда тестов над экспериментальным чипом наножидкостного транзистора Янг был удивлен схожестью характеристик обычных MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) — метал-оксид полупроводниковых полевых транзисторов и наножидкостного.

"Больше всего меня удивило то, что мы сможем сконструировать химические компьютеры, способные манипулировать молекулами так же, как полупроводниковые — электронами, — говорит Янг. — Тогда единицы информации будут представлять различные молекулы. Этот подход открывает совершенно новую область в теории информации".

Одно из преимуществ наножидкостного транзистора, по словам Аруна, — то, что технология массового производства лабораторий-на-чипе на его основе не отличается от технологий производства интегральных компьютерных чипов. Наножидкостные каналы можно легко интегрировать в полупроводниковые приборы. Так, например, электроникой можно управлять путем открытия или закрытия микрожидкостного канала. При этом электронные компоненты, позволяющие делать это, размещаются на плате обычными методами производства микроэлектроники. А микроканалы и резервуары наносятся на плату отдельно.

Основная деталь нанотранзистора, способного управлять потоком жидкости, — микроканал диаметром 35 нм, расположенный между двумя слоями диоксида кремния. Он наполнен водой с добавлением растворенных солей, образующих водные ионы. При подаче напряжения на затвор, аналогичный затвору полевого MOSFET-транзистора, протекание жидкости прекращается. Как видно, принцип работы наножидкостного транзистора полностью аналогичен принципу действия электронных транзисторов.

Подобное управление ионами в тонком канале (35 нм) невозможно другими способами, так как в

жидкости ионы быстро перемещаются и могут потерять заряд, соприкоснувшись со стенками канала. Поэтому для каналов диаметром до 100 нм применяют электрическое экранирование. А напряжение, приложенное к разным концам канала, вызывает перемещение ионов от истока к стоку. Правда, значение напряжения для закрытия транзистора довольно велико: оно составляет 75 В.

Такой нанотранзистор можно использовать для детектирования химических соединений. Представим себе, что фрагменты ДНК, белки, ионы или энзимы перемещаются внутри канала, покрытого флуоресцентными метками. Таким образом, управляя потоком жидкости, можно добиться детекции даже одной молекулы. Исследователи в одном из экспериментов продемонстрировали, как с помощью нанотранзистора обрабатывались помеченные флуоресцентными красками сегменты ДНК.

Янг, специалист по изготовлению из нанотрубок и полупроводников наноэлектронных устройств, создал аналог наножидкостного транзистора с каналом из углеродной нанотрубки диаметром 20 нм. При этом нанотранзистор показал характеристики, схожие с первым химическим транзистором.

"Нанотрубки позволяют пропустить через наножидкостный транзистор молекулы меньшего размера. С помощью современных методов производства мы не можем сделать каналов меньшего диаметра, — говорит Янг. — Поэтому я думаю, что в будущем химические транзисторы будут работать на основе нанотрубок".

"Мы делаем все возможное, чтобы наша команда первой создала что-то вроде химического процессора, способного сортировать и сравнивать молекулы между собой, как это делают с битами современные процессоры," — говорит Маджудар.

В перспективе группа наножидкостных транзисторов может образовывать целые вычислительные устройства, сходные с нынешними кремниевыми процессорами, что в сочетании с легким управлением ионами (а это могут быть, скажем, белки или фрагменты ДНК) сулит новые возможности для биологических исследований и медицины.

Источник: Berkley: Researchers create first nanofluidic transistor, the basis of future chemical processors

Ученые из Брукхэвена создали уникальную наноструктуру

Ученые из Национальной лаборатории Брукхэвен разработали метод производства новых наноструктур. Это ультратонкие "наноленты", нанесенные на поверхность нанотрубок. Эта команда исследователей уже несколько раз становилась первооткрывателем различных наноструктур с необычными свойствами. О своем достижении ученые сообщили

ли в онлайн-выпуске *Nano Letters* от 4 июня 2005 года. Как оказалось, наноструктуры в виде нанопоясов характеризуются уникальными механическими и электрическими свойствами. "Мы можем синтезировать нанопояса толщиной от 2 до 5 нм. Это довольно важно, так как изменение толщины слоя достигается новым методом производства наноструктур, — говорит один из исследователей Вей-Кванг Хан. — Также мы очень гордимся тем, что создали новый тип наноструктур".

Чтобы вырастить нанопояса, состоящие из германия, на поверхности нанотрубки, ученые использовали новую методику (рис. 7). Углеродные нанотрубки (после успешного наращивания нанопояса на углеродных нанотрубках ученые экспериментировали с нанотрубками из нитрида бора) были помещены на медную поверхность. Далее верхние части нанотрубок были покрыты аморфным (неупорядоченным) слоем атомов германия. Толщину слоя ученые измеряли специальным устройством, которое позволило контролировать процесс нанесения слоя с точностью до нанометра.

Наконец, нанотрубки нагрели до 750 °С внутри микроскопа специального исполнения. По мере того как нанотрубки нагревались, аморфный слой атомов германия кристаллизовался, покрывая нанотрубку однородной наноструктурой, напоминающей пояс. Нанопояс оказался химически соединен с поверхностью нанотрубки, образовав новую гибридную наноструктуру "германиевая оболочка — углеродная нанотрубка".

"Этот метод позволяет наносить покрытие толщиной от 2 до 5 нм, в то время как ранее удавалось синтезировать только 10-нанометровый слой, — говорит Хан. — Наноструктуры, синтезированные с такой точностью, характеризуются новыми физическими свойствами, например, они лучше проводят электричество, чем простые нанотрубки. Это может пригодиться в будущих наноэлектронных устройствах. Также возможно создание гибридной наноэлектроники (подобно полупроводниковым гетероструктурам). Мы уверены, что наше открытие повлияет на методы производства наноструктур в нанотехнологии, синтез наноструктур, производство наночипов".

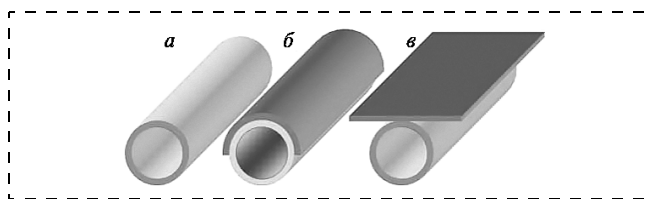


Рис. 7. Процесс создания нанопояса. Нанотрубка (а) покрыта атомами германия (б), которые кристаллизуются под воздействием температуры, образуя нанопояс из германия, связанный с нанотрубкой (в)

В следующих исследованиях В.-К. Хан и его команда планирует детально исследовать транспорт электронов в гибридном наноустройстве. По словам ученых, это поможет узнать, как использовать эти наноструктуры в производстве электронных чипов.

Работа исследователей была проведена в рамках программы департамента энергетики США.

Источник: Brookhaven Center for Functional Nanomaterials: Brookhaven Scientists Create a New Nanostructure

Математическая модель квантовых точек открывает их новые свойства

О квантовых точках сегодня знает большинство молодых ученых и просто интересующихся высокими технологиями. Эти нанокристаллы, состоящие из нескольких сот атомов, могут применяться в квантовых компьютерах и системах медицинской диагностики в качестве маркеров. Оптические и электрические свойства этих наноструктур сильно отличаются от такого же материала в макроскопическом масштабе. Но, как было недавно установлено учеными из национальной лаборатории в Беркли, США, главнейшие электрические свойства квантовых точек понимались превратно в течении целого десятилетия.

Ученые-теоретики из отдела энергетики из национальной лаборатории в Беркли установили, что диэлектрическая функция квантовых точек, которая показывает, как изменяется заряд наносистемы в зависимости от наличия внешнего электрического поля, не зависит от ширины запрещенного энергетического слоя квантовой точки, как это предполагали ранее. Наоборот, диэлектрическая функция квантовых точек, находящихся в нано- и микроразмерном диапазоне, практически аналогична функции макроскопических материалов, даже вблизи поверхности квантовой точки (рис. 8, см. четвертую сторону обложки).

"Одно из интересных свойств квантовых точек — то, что значение ширины их запрещенного энергетического слоя намного больше, чем то же в макроскопическом материале. И при этом ее суммарная диэлектрическая постоянная намного меньше. Поэтому логично было предположить, что диэлектрические постоянные зависят от ширины запрещенного энергетического слоя", — объясняет Лин-Вонг Вонг из отделения вычислительных исследований лаборатории в Беркли.

Однако недавно французские ученые из института электроники Норда, возглавляемые Кристофом Делеруа, поставили под сомнение это утверждение, бытующее уже несколько лет в области квантовых точек. Они начали проверку взаимосвязи между диэлектрической постоянной и шириной

запрещенного энергетического уровня *ab initio* (т. е. заново, начиная с основ). Для расчетов ученые использовали специальную программу расчета механических электронных систем *PEtot*, написанную Вонгом. Затем ученые провели вычисления на суперкомпьютере *Seaborg*, расположенном в отделе вычислений энергетики лаборатории Беркли.

Ширина запрещенного энергетического слоя полупроводника — это энергия, необходимая для того, чтобы переместить электрон, находящийся на одном из разрешенных уровней, на пустой разрешенный уровень с другой энергией. Ширина пространства между этими двумя разрешенными уровнями определяется для каждого атома отдельно по законам квантовой механики, и нельзя поместить электрон где-то между разрешенными уровнями. Поэтому пространство между уровнями называется запрещенным энергетическим слоем. Например фотон, поглощенный атомом, может вытолкнуть электрон на другой разрешенный уровень только в том случае, если у него достаточно энергии для преодоления энергетического потенциала этого уровня. При этом на энергетическом уровне, где был электрон раньше, образуется "дырка" противоположного заряда. И наоборот: если атом испускает фотон, то электрон перемещается на уровень вниз, а фотон имеет энергию, равную энергетическому потенциалу, на который "опустился" электрон. Этот принцип используется в полупроводниковых светодиодах (рис. 9, см. четвертую сторону обложки).

Каждый полупроводник имеет свои характеристики энергетических уровней, Однако они различаются для материала в макромасштабе и для квантовых точек, сделанных из того же полупроводника. Чем меньше квантовая точка, тем "шире" расстояние между энергетическими уровнями. Для арсенида галлия, например, ширина запрещенного слоя — 1,52 эВ, а у квантовой точки на основе арсенида галлия, состоящей из 933 атомов, — 2,8 эВ, у такой же квантовой точки, состоящей из 465 атомов, — 3,2 эВ. Изменяя размер квантовой точки, можно изменить их цвет, при этом квантовые точки состоят только из того же арсенида галлия.

Используя суперкомпьютер *Seaborg*, ученые установили распределение электронной плотности квантовой точки в зависимости от ее размера и внешних воздействий (наличия, например, слабого электромагнитного поля от единичного электрона). Для расчетов использовалась аппроксимация локальной плотности. Результаты показали, что данные моделирования хорошо согласовываются с результатами экспериментов, повторно проведенных учеными.

Ученые рассчитали таким образом квантовые точки из 465-атомного арсенида галлия (рис. 10, см. четвертую сторону обложки) и 465-атомного кремния. Дальнейшие исследования показали, что прямой взаимосвязи между диэлектрической постоянной квантовой точки и шириной запрещенного слоя нет. На это также указывает упрощенная математическая модель квантовой точки, составленная учеными. "Для того чтобы установить это,

нам понадобились многие часы работы суперкомпьютера, — говорит Вонг. — Мы также составили простую модель расчета диэлектрических характеристик квантовой точки. Мы уверены, что эта модель будет полезна всем исследователям, изучающим квантовые точки и проектирующим наносистемы на их основе".

Источник: BERKELEY: A New Model of Quantum Dots: Rethinking the Electronics



СТРАНИЧКА РФФИ

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

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

Исследование и локальная модификация низкоразмерных структур методами зондовой микроскопии и спектроскопии

Номер проекта: 99-02-16139

Год представления отчета: 2002

В ходе выполнения работ по данному проекту в ИФМ РАН создан комбинированный зондовый микроскоп, объединяющий в себе СТМ, АСМ и БОМ методики. Микроскоп совмещен с оптическим монохроматором для спектральных исследований фотоэлектрических свойств полупроводниковых низкоразмерных структур. В качестве основного метода контроля расстояния "зонд—образец" в данном микроскопе реализован "shear force control" режим с использованием резонансного пьезоэлектрического датчика силы. Отработаны методики регистрации амплитудно-частотных характеристик системы "кварцевый резонатор—зонд—поверхность" в зависимости от расстояния между зондом и образцом, а также методики измерения тока растекания и регистрации его распределения вдоль поверхности образца при изменении напряжения между зондом и поверхностью, а также в условиях фотовозбуждения рабочего промежутка. Экспериментально исследованы особенности силового взаимодействия между зондом и поверхностью различных образцов в "shear-force" атомно-силовом микроскопе. Показано, что нели-

нейность зависимости амплитуды колебаний пьезодатчика от расстояния до поверхности образца определяется трансформацией резонансных свойств системы "кварцевый резонатор—зонд—поверхность". Обнаружены трибоэлектрические эффекты при исследовании в "shear-force" режиме образцов сложного состава. Установлено, что локальная трибоЭДС, возникающая в "shear-force" микроскопе между поверхностью и зондом при его латеральных колебаниях, существенно зависит от проводящих свойств исследуемого материала. Результаты проведенных экспериментов послужили основой для разработки СЗМ методики одновременного исследования рельефа, механических, электрических а также трибо- и фотоэлектрических свойств поверхности твердого тела в рамках одного эксперимента. Разработан оригинальный метод регистрации спектральных зависимостей локального фототока в полупроводниковых структурах с помощью сканирующего туннельного микроскопа, обладающего высоким пространственным разрешением. Для структур InAs/GaAs с квантовыми точками, выращенными вблизи поверхности образца, получены спектральные зависимости локального СТМ фототока, содержащие ряд пиков, соответствующих переходам носителей между состояниями энергетического спектра квантовой точки и смачивающего слоя. Проведены исследования влияния электрического поля на спектры фототока в гетероструктурах InAs/GaAs с квантовыми точками. Динамика

изменения спектров при увеличении напряжения на туннельном промежутке СТМ показала, что спектры содержат два компонента фототока, обусловленные поглощением света на объемных примесных состояниях в эпитаксиальном слое GaAs и на локализованных состояниях в квантовых точках InAs. Установлено, что в сильном электрическом поле происходит уменьшение интенсивности спектральных пиков, соответствующих переходам носителей между локализованными состояниями квантовых точек, что может быть связано с пространственным разделением максимумов волновых функций электронных и дырочных состояний во внешнем электрическом поле и с делокализацией состояний вследствие туннельного перехода носителей в состояния непрерывного спектра. Методами сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии исследованы особенности морфологии и электрических свойств тонких пленок высокотемпературного сверхпроводника YBaCuO, обусловленные наличием формирующихся в процессе роста частиц CuO. Установлено, что области пленки вокруг частиц CuO с размерами порядка 500 нм отличаются по толщине и электрическим свойствам от основного слоя и оказывают существенное влияние на сверхпроводящие характеристики тонкопленочных образцов YBaCuO. Проведены исследования возможности формирования металлических наноструктур при распаде неравновесных твердых растворов металл—углерод ($\text{Me}_x\text{C}_{1-x}$) под воздействием импульсов тока в сканирующем туннельном микроскопе. В качестве металлов использовались Ni, Cr, Fe. Композиционные тонкопленочные структуры $\text{Me}_x\text{C}_{1-x}$ имели толщину в диапазоне 10–100 нм и изготавливались методом импульсного лазерного напыления. Состав твердых растворов менялся в пределах $x = 0,02 \div 0,5$. Эксперименты показали, что под воздействием импульсов тока в указанных структурах формировались наномасштабные металлические островки. Наиболее низкий порог СТМ модификации имели пленки Ni-C, при модификации которых удалось воспроизводимо формировать регулярные массивы металлических островков с характерными размерами порядка 50 нм.

Институт физики микроструктур РАН

Взаимодействие электромагнитного поля с детонационной волной в конденсированном взрывчатом веществе

Номер проекта: 99-02-16807

Год представления отчета: 2002

Измерения электропроводности продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ с высоким временным разрешением (тротил, тротил/гексоген, смеси взрывчатых веществ с металлами) обнаружили сложную структуру детонационной проводимости. Зоне химической реакции в исследованных взрывчатых веществах соответствует высокое значение электропроводности. На основании полученных данных можно предположить, что зона повышенной электропроводности характерна для многих взрывчатых веществ.

Найдена структура электромагнитного поля при сжатии в ударной волне проводника с током и проводящего магнетика в магнитном поле. Найдены управляющие параметры и характерные времена класса электродинамических задач с ударными и детонационными волнами.

Экспериментально и численно исследован предложенный нами метод компрессии магнитного поля системой сходящихся детонационных волн. Построена простая модель магнитного сжатия. Модель качественно согласуется с экспериментальными данными. Найден эффективный показатель степени роста магнитного поля. Возможности роста магнитных полей ограничены перестройкой области сжатия, толщиной зоны химической реакции, электропроводностью в этой зоне, а также невысокой сжимаемостью вещества в детонационной волне.

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН

Сверхчувствительность и самоорганизация в нелинейных стохастических системах

Номер проекта: 99-02-17545

Год представления отчета: 2002

Кратко основные результаты работы коллектива за время выполнения проекта можно сформулировать следующим образом.

- Показано, что открытое авторами проекта в 1998 г. явление сверхчувствительности в системах с on-off перемежаемостью обладает свойством универсальности и возникает в системе для различных видов потенциала и внешнего шума. При учете в такой системе "физического порога", связанного с конечностью числа частиц, мы показали, что при добавлении к подпороговому периодическому сигналу аддитивного шума система способна усиливать сигнал на много порядков, демонстрируя явление гигантского стохастического резонанса. В системе с периодическим потенциалом обнаружена также сверхчувствительность индуцированного шумом транспорта к слабому постоянному смещению.
- Впервые в динамической двухуровневой системе с двойной стохастичностью обнаружено яв-

ление подавления шума шумом. Оказывается, что внешний цветной шум с оптимально подобранными временем корреляции и амплитудой способен "перекачивать" мощность стохастической части выходного сигнала системы в высокочастотную область, уменьшая тем самым шумовой фон при передаче низкочастотных сигналов.

- Ранее авторами проекта впервые была обнаружена возможность возникновения явления самоорганизованной критичности (СОК) в физической системе — гранулированных сверхпроводниках. В ходе выполнения проекта было подробно изучено критическое состояние гранулированных сверхпроводников с использованием непосредственно системы дифференциальных уравнений для разности фаз и упрощенных моделей, которые имеют аналоги среди ранее предложенных моделей с СОК. Было показано, что критическое состояние в рассмотренных системах (многоконтактных СКВИДах) действительно является самоорганизованным, а его свойства полностью эквивалентны ранее обнаруженным свойствам СОК в стандартных математических моделях.

Кроме того, нами было обнаружено, что благодаря физическим свойствам гранулированных сверхпроводников СОК в этих системах обладает рядом новых свойств по сравнению с известными ранее в классических математических моделях. Было установлено, что в двумерном многоконтактном СКВИДе, помещенном в переменное магнитное поле, СОК может реализовываться даже при закрытых граничных условиях благодаря процессу аннигиляции существующих в системе токов противоположных знаков. Показано также, что в изученном СКВИДе сосуществуют такие явления, как $1/f$ шум и самоорганизация. При изучении критического состояния одномерного многоконтактного СКВИДа со случайно расположенными контактами, помещенного в медленно меняющееся магнитное поле, показано, что даже незначительного разброса межконтактных расстояний достаточно, чтобы критическое состояние системы стало самоорганизованным в тех условиях, при которых ранее самоорганизации не наблюдалось.

Построенная авторами упрощенная модель рассмотренной системы представляет собой не имеющую аналогов математическую модель для изучения самоорганизации, в которой внутренняя пространственная стохастичность заменяет собой временную случайность, необходимую для возникновения самоорганизации.

Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова РАН

Исследование генерации микроскопических доменов и их самоорганизация в электро- и магнитоупорядоченных веществах под действием акустического поля

Номер проекта: 99-02-17593

Год представления отчета: 2001

Экспериментально исследовано взаимодействие остросфокусированных лазерных пучков с примесными ионами и кластерами в оксидных сегнетоэлектриках. Рассмотрены процессы и механизмы образования микродоменов под действием лазерных пучков. Установлена возможность применения и перераспределения микродоменов в поле акустической волны в условиях приложения статического электрического поля. Обнаружена генерация когерентных акустических колебаний при воздействии лазерных импульсов на периодическую доменную структуру, сформированную в ниобате лития. При распространении поверхностной акустической волны через сформированную периодическую доменную структуру обнаружена генерация второй и третьей гармоник поверхностных акустических волн, установлено обращение волнового фронта в акустической волне, отраженной от периодической структуры. Предложенный механизм акустической генерации основан на процессе фотогенерации свободных носителей, компенсирующих поле поляризации внутри доменов, и возникновении переменных упругих напряжений вследствие пьезоэффекта. Изучено распространение акустических волн в монокристаллах манганитов вблизи структурных и магнитных фазовых переходов.

Казанский государственный энергетический университет

Физическая природа диэлектрической нелинейности в тонких пленках сегнетоэлектриков

Номер проекта: 99-02-18022

Год представления отчета: 2002

Установлено, что пленки STO в эпитаксиальных гетероструктурах с электродами SrRuO_3 наиболее структурно совершенны из-за химической стабильности SrRuO_3 . Температурная зависимость $K(T)$ ($T = 80 \div 300$ K) диэлектрической проницаемости K и вольт-фарадная зависимость таких пленок STO совпадают с зависимостями для объемного STO. Установлено, что в пленках STO нижняя граница температурной области, в которой K не зависит от поля смещения, сдвинута по отношению к границе для объемного STO в сторону больших T , так как в части объема пленки структурный фа-

зовый переход происходит при более высоких температурах, чем в объемном STO. Разработана методика исследования нелинейности сегнетоэлектриков при высоких скоростях изменения напряжения смещения. В пленках PZT расстояние между максимумами вольт-фарадной зависимости, связанное с переключением поляризации, уменьшается при уменьшении скорости изменения напряжения смещения из-за скопления кислородных вакансий в приэлектродных областях под действием $E_{см}$. В итоге оценены подвижность и концентрация кислородных вакансий в пленках PZT. Установлено, что малоугловые границы снижают диэлектрическую нелинейность и K и смещают максимум $T_{max} K(T)$ в сторону низких температур. Дано объяснение этих эффектов. Вычислено встроенное поле, вызванное зарядом дислокаций несоответствия в пленке BSTO, согласующееся с наблюдаемым сдвигом максимумов вольт-фарадных зависимостей пленок. Исследована медленная релаксация емкости гетероструктур после включения и выключения напряжения смещения U_0 . Релаксация объяснена подавлением K полем $p-n$ -перехода, возникающего при миграции кислородных вакансий под действием поля смещения. Рассчитано изменение емкости при диффузии вакансий после выключения U_0 . Распространение p -области $p-n$ -перехода на всю толщину пленки изменяет зависимость емкости от концентрации вакансий. Разработана методика исследования влияния одноосной деформации образца на диэлектрическую нелинейность. Измерения не выявили такого влияния для кристаллов STO при 300 К и при относительной деформации 0,001.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

Экспериментальные и теоретические исследования особенностей фононной подсистемы в структурах, включая низкоразмерные, на основе широкозонных нитридов GaN и AlN с различным составом примесей и точечных дефектов

Номер проекта: 99-02-18318
Год представления отчета: 2002

Методами электрических и оптических измерений проведено изучение точечных дефектов, образующихся в процессах облучения и отжига n -GaN и InN. В облученном быстрыми электронами n -GaN обнаружены два типа ловушек с энергией активации 0,15 и 0,95 эВ, однако доминирующим является процесс компенсации электронной проводимости более глубокими акцепторами. Напротив, в облученном n -InN проводимость растет за счет

образования вакансий азота, обладающих мелкими донорными состояниями. Прослежены модификации дефектов в процессах изохронного отжига. Получена принципиально новая информация о фундаментальных свойствах фононного спектра гексагонального InN. Впервые рассчитаны дисперсионные кривые для акустических и оптических фононов, плотность однофононных состояний и решеточная теплоемкость InN. Получены новые данные о ширине запрещенной зоны гексагонального InN, свидетельствующие о том, что истинная ширина запрещенной зоны гексагонального InN находится в районе 0,8–0,9 эВ, что намного ниже значения 1,8–2,0 эВ, цитируемого в справочной литературе. Впервые установлена полная картина поведения всех оптических фононов ($k = 0$) в $Al_xGa_{1-x}N$ во всем диапазоне составов и предложена теоретическая модель, описывающая изменения в колебательном спектре этих твердых растворов. Разработан метод количественной оценки состава твердого раствора $Al_xGa_{1-x}N$. Методом Раман-спектроскопии выполнено первое исследование гексагональных сверхрешеток GaN/ $Al_xGa_{1-x}N$. Обнаруженные особенности в поведении оптических и акустических фононов использованы для характеристики этих низкоразмерных структур. Впервые, в рамках теории локальной группы, были сформулированы в общем виде правила отбора для всех возможных типов оптических переходов с участием фононов для систем, содержащих примеси и дефекты. Впервые исследована регулярная трехмерная система нанокластеров GaN, InN и InGaN, сформированная на основе подрешетки полостей искусственного опала.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

Делокализация фонон-плазмонных и экситонных состояний в туннельных системах квантовых проволок и точек, самоорганизующихся на высокоиндексных поверхностях GaAs

Номер проекта: 99-02-16668
Год представления отчета: 2001

В рамках проекта проведено исследование свойств коллективных частиц (фононов, плазмонов, экситонов) в туннельно-связанных системах квантоворазмерных объектов. Упорядоченные системы нанобъектов были получены при гетероэпитаксиальном росте методом молекулярно-лучевой эпитаксии в условиях структурной перестройки поверхностей GaAs (100), (311). Методом спектроскопии комбинационного рассеяния света была определена атомарная структура наноструктур GaAs,

реализующаяся при субмонослойном гетероэпитаксиальном росте ультратонких СР GaAs/AlAs, соответствующая атомарной конфигурации поверхности GaAs (100), перестроенной по типу (2×4) , в согласии с данными СТМ. На поперечном срезе сверхрешеток, полученных на подложках с ориентацией (311)А, методом ВРЭМ обнаружено наличие корругированных СР, распадающихся на массив упорядоченных квантовых проволок. Показано, что интенсивность фотолюминесценции в СР на поверхности (311)А на несколько порядков выше, а положение линий выше по энергии по сравнению с аналогичными структурами, полученными на поверхности с ориентацией (311)В и (100), где спектры ФЛ практически совпадают. Обнаружена поляризационная анизотропия фотолюминесценции для гофрированных СР на поверхности (311)А. Обнаружено фонон-плазмонное взаимодействие в туннельно-связанной системе квантовых проволок и квантовых ям на основе сверхрешеток GaAs/AlAs, полученных на подложках с ориентацией (100), (311), что является следствием "трехмеризации" спектра плазменных колебаний при усилении туннельной связи между одномерными или двумерными состояниями электронного газа. Показано, что латеральная локализация оптических фононов приводит к взаимодействию плазмонов с ТО-подобными фононными модами, что обусловлено неравенством нулю проекции вектора поляризации, наведенного фононами, на направление волнового вектора, тогда как в объемном случае данное взаимодействие запрещено по симметрии. Рассмотрены вопросы динамической экранировки фононов электронным газом в туннельных сверхрешетках.

Предложен и реализован алгоритм микроскопического расчета частот смешанных фонон-плазмонных мод на основе решения характеристического уравнения для динамической матрицы кристалла, в которой макроскопическая часть полевого вклада экранируется электронным газом. Восприимчивость электронного газа описывалась при этом выражением Линдхарда—Мермина для структур различной размерности. Результаты расчета в микроскопическом подходе позволили описать эксперимент, тогда как макроскопическое описание на основе флуктуационно-диссипативной теоремы дало согласие с экспериментом только в случае СР с толщиной слоев GaAs в 1—2 монослоя. Разработаны алгоритмы и созданы пакеты программного обеспечения для анализа латеральной локализации фононов в квантовых островках, гофрированных слоях, для расчета частот фононов, атомарных смещений, наведенного вектора поляризации, спектров КРС, поляризационных правил отбора КРС, фонон-плазмонного взаимо-

действия в системах с пониженной размерностью. Таким образом, комплексный экспериментальный и теоретический анализ позволил получить достоверные свидетельства модификации свойств квазичастиц в туннельных системах пониженной размерности, формирующихся при гетероэпитаксиальном росте в условиях структурной перестройки поверхности, обладающие научной новизной и соответствующие мировому уровню работ в области исследования туннельных явлений. По результатам работы опубликовано 13 работ, из них 7 статей и 1 препринт.

НИИУ Института физики полупроводников СО РАН

Исследование скоростей звука в ударно-сжатом фуллерене C60

Номер проекта: 99-02-17262

Год представления отчета: 2002

Выполнена серия экспериментов по ступенчатому ударно-волновому сжатию сублимированного фуллерена C60 с исходной плотностью $1,56 \text{ г/см}^3$ в сборках сохранения плоской геометрии. Максимальное ударное давление варьировалось в диапазоне 14—45 ГПа, длительность импульса давления составляла ~1 мкс. Структура сохраненных образцов исследовалась методами рентгенофазового анализа. При дискретном повышении максимального давления ударно-волнового сжатия наблюдалась такая последовательность структурных состояний сохраненного материала: C60 (ГЦК) — C60 (ГЦК) + C60 (полимеризованный) — поликристаллический графит. Установлено, что ударно-волновой синтез полимеризованных фаз фуллерена C60 при определенных условиях эксперимента все-таки возможен и реализуется при давлениях ~20 ГПа. В то же время признаков формирования при ударно-волновом нагружении сверхтвердых 3D-полимеризованных модификаций фуллерена C60 в исследованном диапазоне давлений не отмечено.

Разработана технология получения полноплотных поликристаллических образцов фуллерена C60 с отношением толщины к диаметру менее 0,2. Технология позволяет получать образцы диаметром до 80 мм путем обработки гидростатическим давлением 1 ГПа. Изготовлена опытная партия полноплотных образцов фуллерена C60. Полученные образцы не имели расслоенных трещин и имели достаточную прочность для проведения дальнейших технологических операций. Плотность образцов составляла $1,58 \text{ г/см}^3$, продольная скорость звука 1,78 км/с, поперечная скорость звука 1,21 км/с.

Отработана методика измерений и выполнены сигнальные эксперименты по определению удар-

ной адиабаты, изоэнтроп разгрузки и скоростей звука в ударно-сжатом фуллерене C₆₀ с использованием лазерного доплеровского интерферометра "VISAR" и емкостных датчиков. При измерениях были получены следующие результаты (приведены в координатах массовая скорость — давление): точки на ударной адиабате C₆₀ — (2,77 км/с; 27,2 ГПа) и (2,44 км/с; 23,8 ГПа); точки на одной из изоэнтроп разгрузки C₆₀ — (2,77 км/с; 27,2 ГПа)

и (3,1 км/с; 23,8 ГПа). Эйлерова скорость звука в ударно-сжатом фуллерене C₆₀ при давлении 27,2 ГПа составила 5,32 км/с. Насколько нам известно, подобные измерения для фуллерена выполнены впервые в мировой практике.

*Институт теплофизики экстремальных состояний
Объединенного института высоких температур
РАН*

ИНФОРМАЦИЯ

К ИТОГАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО ПЕРЕДОВЫМ МАТЕРИАЛАМ И ТЕХНОЛОГИЯМ

(Сингапур, 3—8 июля 2005 г.)

С 3 по 8 июля 2005 г. в Сингапуре проходила объединенная Международная конференция по передовым материалам и технологиям, организованная Материаловедческим обществом Сингапура (*Materials Research Society of Singapore (MRS)*), возглавляемая Президентом MRS проф. B. V. R. Chowdary.

Конференция объединила 3-ю Международную конференцию по материалам для передовых технологий (*3rd International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT 2005)*) и 9-ю Международную конференцию по передовым материалам (*9th International Conference on Advanced Materials (ICAM 2005)*). В работе конференции участвовали более 2000 человек из 52 стран. В рамках конференции проходила Международная выставка современного научно-исследовательского оборудования, где были представлены 43 фирмы.

С приглашенными и публичными лекциями на конференции выступили три Нобелевских лауреата: **Steven Chu** (Нобелевский лауреат по физике 1997 г., США) с лекциями *"Molecular Biology and Nanotechnology"* и *"Miniaturization in Biology"*, **Carl E. Wieman** (Нобелевский лауреат по физике 2001 г., США) с лекциями *"Bose-Einstein Condensation, Quantum Weirdness at the Lowest Temperature in the Universe"* и *"Dilute Gas BEC; A Very Novel Quantum Material"* и **Ronald Hofmann** (Нобелевский лауреат по химии 1981 г., США) с лекциями *"Chemistry's Essential Tension: The Same and Not The Same"* и *"Waiting to be Made"*.

Формат конференции включал пленарные лекции по наиболее общим и актуальным направлениям развития передовых материалов и технологий и 29 параллельных симпозиумов по следующим основным разделам: "Передовые биоматериалы", "Химическая и молекулярная модификация границ раздела", "Биомедицинские приборы и инструменты", "Магнитные наноматериалы и приборы", "Механическое поведение нано- и микросистем", "Нанооптика и микросистемы", "Наноприборы и их изготовление", "Кремниевая микроэлектроника. Процессы упаковки", "III—IV полупроводники для микроэлектронных и оптических приложений", "Материалы на основе SiC", "Физика материалов у границ раздела", "Фотонные материалы и приборы", "Материалы на основе ZnO", "Функциональные керамические материалы и пленки" (две секции), "Материалы для перезаряжаемых батарей. Хранение водорода и топливные ячейки" (две секции), "Достижения в области экоматериалов", "Электромагнитные материалы", "Наука и технология гибридных материалов", "Новые пористые материалы для новых применений", "Полимерные наноструктурированные материалы", "Передовые материалы и полимеры для оборонных и аэрокосмических применений", "Оптическая спектроскопическая техника", "Образование в области материаловедения, инженерии и технологии", а также "13-й ежегодный мировой форум по передовым материалам — POLYCHAR-13" и "3-я конференция стран Азии и Австралии по вакууму и поверхности — VASSCAA-3".

На основании этого перечня можно сделать вывод о том, какое огромное значение уделяется разработке новых наноматериалов и технологий для развития современной мировой "электронной цивилизации". Следует заметить, что в Сингапуре высшее образование, научная деятельность явля-

ются приоритетами национальной политики. Национальный университет Сингапура (NUS), при содействии которого проходила конференция, представляет собой целый студенческий город со своими научными лабораториями, Интернет-библиотеками, театрами, стадионами, теннисными кортами, комфортабельными общежитиями, бесплатным транспортом, "начиненный" самыми современными научным оборудованием и техникой. В настоящее время NUS занимает 18-е место в рейтинге мировых университетов, и руководством NUS поставлена задача в ближайшие годы войти в первую десятку университетов мира. Для этого университет привлекает лучших ученых из разных стран, организует ассоциации с крупнейшими мировыми научными центрами и университетами, мощно поддерживает проведение престижных научных конференций внутри страны с участием большого числа научной молодежи, активно посылает молодых специалистов на стажировки и конференции по всему миру. Учитывая, что население Сингапура не превышает трех миллионов (этнические китайцы — 77 %, малайцы — 15 %, выходцы из Индии — около 7 %), следует заключить, что руководство страны и ее элита направляют волю на обеспечение благосостояния народа и достижение научно-технологического доминирования. Можно предположить, что эта политика находится в русле глобальной научно-технической и культурно-экономической политики Китая.

Больше половины участников конференции составляла молодежь Сингапура, Китая, Индии, Кореи, Японии, обучающихся и стажирующихся в университетах и научно-исследовательских организациях своих стран или ведущих центрах Европы, Америки и Австралии. Конференцию отличал высокий технический уровень организации, было представлено много нового современного оборудования и методов, которые быстро внедряются для разработки новых технологий и материалов, характеристики нанообъектов различной природы, создания технопарков, информатизации общества и др.

На конференции было представлено примерно 1780 устных и 1290 стендовых докладов. В состав Международного Консультативного комитета (78 человек) входили два россиянина: член-корр. РАН Н. З. Ляхов — президент Материаловедческого научного общества России (Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск) и член-корр. РАН А. Н. Лагерьков (Институт теоретической и прикладной электродинамики

Объединенного института высоких температур РАН, г. Москва). В программу конференции со стороны российских участников был включен 21 устный доклад (~1,18 % из всех устных докладов), среди которых только один был приглашенным, и 14 стендовых (~1,09 % из всех стендовых докладов). Русские фамилии можно было видеть среди ряда приглашенных докладчиков из США, Германии, Франции, Бельгии, Финляндии, Мексики, Сингапура и др.

Большинство устных докладов российских ученых (9) было представлено на симпозиуме "Электромагнитные материалы", возглавляемом проф. А. Н. Лагерьковым. На конференции присутствовало лишь небольшое число российских участников (20 человек) из Москвы (МГУ им. М. В. Ломоносова, Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Институт кристаллографии РАН, Институт радиотехники и электроники РАН, Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л. Я. Карпова, НИИ пластмасс им. Г. С. Петрова, Институт петрохимического синтеза РАН, Центр ортопедии и материалы для медицины), г. Санкт-Петербурга (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Институт ядерной физики), г. Черноголовки (Институт проблем технологии микроэлектроники РАН), г. Нижнего Новгорода (Институт физики микроструктур РАН, Физико-технический исследовательский институт), г. Воронежа (Государственный университет), г. Новосибирска (Институт физики полупроводников СО РАН, Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН), г. Владивостока (Морской государственный университет им. Г. И. Невельского), г. Нальчика (Кабардино-Балкарский государственный университет). Среди российских участников практически отсутствовали молодые специалисты, что особенно контрастировало с преимущественно молодежным составом конференции.

Новые материалы и технологии — будущее цивилизации — требуют целенаправленной государственной поддержки и подготовки квалифицированных кадров. Государства, которые не учитывают этого, не имеют будущего. Нужны активные усилия, чтобы Россия избежала такой участи.

*Участники конференции ISMAT-2005:
сотрудники ИПТМ РАН,
проф., д-р физ.-мат. наук А. В. Андреева,
канд. физ.-мат. наук А. Л. Деспотули*

CONTENTS

Urlichich Yu. M., Danilin N. S. *Possible ways of miniaturization of satellite* 2

Possible ways of future products miniaturization of satellite have been presented.

Yevdokimov Yu. M. *Nanotechnologies Based on dsDNA Molecules* 4

A new approaches to create the nanostructures based on dsDNA molecules are briefly considered. The possible areas for practical application of nanostructures based on the dsDNA liquid-crystalline dispersion particles are outlined.

Zaporotskova I. V. *Nanotubulene Materials: Structure, Properties and Perspectives* 7

Current research of structure, methods for synthesizing and basic physical and chemical properties of nanotubulene materials (nanotubes) is reviewed. The basic fields of application of carbon nanotubes are described. The greatest attention is given to consideration of opportunity tubulene application in electronics. The binding of nanotube structure and its conductivity is analyzed. Theoretical calculations of mechanisms of several tubulene growth models, electron-energied properties of semy-endless nanotubulene materials and energy characteristics of filling processes of carbon nanotubes by atomic hydrogen are resulted. The opportunity proton conductivity of nanotube is considered.

Zav'ailov A. V., Kolomenskaya N. G., Molchanova E. D. *Systems on Chip and Intellectual Property: the Main Issues in Development of Normative Documents* 19

This article contains review of normative documents in field of System on Chip (SoC) and Intellectual Property (IP). These documents had been included in Federal special purpose program "Na-

tional technological base" and concerns some arguable points and problems of standardization of this field.

Abramov I. I., Dvornikov O. V. *The Trends and Problems of Precision Analog Interface Design* 23

The necessity of the analog precision interface development for the modern radio-electronic equipment based on the analog and analog-digital LSI/VLSI is shown. The analysis of analog LSI/VLSI design problems such as time and cost expenses reduction, choice of technology, circuit and layout synthesis and optimization, simulation is done. In order to provide effective design of the microelectronic analog interface it is expedient to employ the system approach and specialized arrays as a powerful design tool.

Kashtankin I. A., Gurin N. T. *The dynamical characteristics of bipolar silicon N-shaped photosensitive devices with guided I-V characteristics* 35

The models and experimental data of the dynamical characteristics of photosensitive bipolar silicon N-shaped devices, based on two silicon transistors with the same substrate, are discussed in this paper. The action of infrared radiation to the times of switching is investigated. The switching time of N-device with shunting of the base-emitter junction equals to 10–20 ns. The switching time of N-device with the base current modulation equals to 15–35 ns.

Polomoshnov S. A., Chaplygin Yu. A., Amelichev V. V., Godovitsyn I. V., Ivanova O. M., Krutovertsev S. A. *Transducer of Explosive Gas Sensor Based on Dielectric Diaphragm* 39

MST-based explosive gas sensor is developed and fabricated. Gas sensitive layer on the base of SnO_2 was formed on thin (1 μm) dielectric diaphragm by thick film technology. Sensor characterisations for H_2 , CH_4 , C_4H_{10} is earned out, high sensitivity of the sensor is demonstrated.

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

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

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

Сдано в набор 01.08.2005. Подписано в печать 08.09.2005. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,97. Заказ 1512. Цена договорная

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