

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 8 ✧ 2006

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.
Гапонов С. В.
Каляев И. А.
Климов Д. М.
Ковальчук М. В.
Лифшиц В. Г.
Мокеров В. Г.
Никитов С. А.
Сигов А. С.
Чаплыгин Ю. А.
Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И.
Антонов Б. И.
Астахов М. В.
Быков В. А.
Волчихин В. И.
Гоев А. 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.
Петросянец К. О.
Петрунин В. Ф.
Путилов А. В.
Пятьшев Е. Н.
Сауров А. Н.
Сухопаров А. И.
Телец В. А.
Тодуа П. А.

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

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

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Дедков Г. В. Физические аспекты взаимодействий зонд—поверхность в сканирующей зондовой микроскопии. Часть I 2

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Бутыльская М. В., Петронюк Ю. С. Ультразвуковая микроскопия как возможный инструмент контроля качества соединения пластин в процессе изготовления структур "кремний на изоляторе". 12
Самойлович М. И., Белянин А. Ф. Формирование наноструктурированных пленок алмазоподобных материалов. Часть 2 15

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Брюхова Ю. В., Зайцев Н. А. Разработка моделей полупроводниковых приборов с использованием программ физико-технологического моделирования 25
Сафронов А. Я., Горнев Е. С., Зайцев Н. А., Матюшкин И. В. Разработка конструкции и технологии изготовления микросистем на основе кремния и тонких пленок пьезокерамики 30
Абрамов И. И. Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники. Часть I. Основные положения 34

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Каштанкин И. А., Гурин Н. Т. N-транзисторные оптроны. 37

СПРАВОЧНЫЕ СТРАНИЦЫ

Яшин К. Д., Лацапнёв Е. В. Англо-русский терминологический справочник по микро- и наносистемной технике 40

СТРАНИЧКА РФФИ 47

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ 49

ИНФОРМАЦИЯ 55

Contents 56

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

Аннотации статей журнала на русском и английском языках и требования к оформлению статей доступны на сайте журнала: <http://www.microsystems.ru>. E-mail: nmst@zknet.ru

ПОДПИСКА:

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

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 620.187:539.25

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

ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ЗОНД—ПОВЕРХНОСТЬ В СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ.

Часть I

На элементарном уровне обсуждаются физические явления и эффекты, происходящие в контактных и бесконтактных режимах сканирования зондовых микроскопов. Дается теоретическое описание и проводятся численные оценки энергетических, силовых и других физических характеристик наноконтактов. Обсуждаются перспективы развития и применения нанозондовых методов в физике и нанотехнологии.

Введение

В настоящее время сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) и связанные с ней физические и прикладные исследования продолжают переживать период бурного расцвета. Число экспериментальных и теоретических работ в этой области растет настолько стремительно, что происходит неизбежная дифференциация и ответвление более узких направлений, уследить за развитием которых становится трудно даже специалистам, постоянно работающим в данной области. Это обусловлено исключительным разнообразием явлений, происходящих в зоне вакуумного или атомного контакта зонда микроскопа с поверхностью, характеризующихся широким диапазоном пространственно-временных масштабов, свойственных данной системе: $10^0 \dots 10^{-8}$ см и $10^0 \dots 10^{-16}$ с. Важнейшим практическим стимулом прогресса СЗМ являются быстро растущие потребности нанотехнологии.

Методы СЗМ расширяют и органично дополняют арсенал экспериментальных средств, применяемых в быстро прогрессирующей науке о свойствах наночастиц и наноструктур. В связи с этим получили мощный импульс в развитии и вышли на передний край новые физические направления, такие как наномеханика, наноэлектродинамика,

нанооптика, нанотрибология, и более широко — нанофизика в целом.

Специфика наноскопических тел и наносистем заключается не просто в уменьшении пространственных масштабов при сохранении вполне определенных границ, существующих между различными областями науки и физическими свойствами объектов исследования, а "стирание" этих границ, при котором механика неразрывно переплетается с электродинамикой, оптикой и атомной физикой. Другое, не менее важное, отличие связано с характером процесса измерений, который в данном случае является промежуточным между измерениями для макроскопических и микроскопических (квантовых) объектов, в результате чего эти измерения могут оказывать значительное влияние на состояние системы. Кроме того, вследствие малого числа частиц в наносистемах резко возрастает влияние флуктуационных процессов квантовой и термической природы.

Для изучения и глубокого понимания явлений, происходящих в контактах зонда СЗМ с поверхностью, приходится привлекать мультидисциплинарный спектр экспериментальных и теоретических методов современной физики, поэтому охватить все многообразие достижений в данной области чрезвычайно трудно. Вместе с тем, имеется острая необходимость в построении элементарной физической картины взаимодействий зонда (иглы) сканирующего микроскопа с поверхностью, доступной для понимания специалистов разного профиля и являющейся введением в данный предмет. Такая цель позволяет сузить круг обсуждаемых тем и избежать детального цитирования приоритетных работ многих сотен исследователей. Более высокий уровень изложения ряда вопросов, затрагиваемых в статье (например, детальное описание режимов сканирования СЗМ), и ссылки на конкретные работы многочисленных групп авторов можно найти в списке литературы, включающем только обзорные статьи, монографии и учебные издания [1—43]. Соответствующая нумерация сохраняется и во второй части статьи.

Таким образом, данная работа адресована к широкому кругу читателей, студентов и исследователей, интересующихся достижениями сканирующей зондовой микроскопии и желающих получить элементарное, но не чрезмерно упрощенное представление об основных принципах СЗМ, физических условиях в наноконтактах и происходящих в них явлениях, а также о практических приложени-

ях этих исследований. Изложение материала проводится с применением минимального числа формул, записываемых, если специально не оговаривается, в единицах системы СГС.

Принципы сканирующей зондовой микроскопии

В основе методов СЗМ лежит идея локального зондирования структуры и свойств конденсированного вещества с помощью малого пробного тела (зонда, иглы), размер которого в части, обращенной к исследуемому образцу, составляет единицы или десятки нанометров. Концепцию атомарного разрешения СЗМ хорошо иллюстрирует рисунок, взятый из статьи первооткрывателей данного метода, Нобелевских лауреатов Г. Биннига и Х. Рорера [2] (рис. 1). Из рисунка видно, что "пощупать" поверхность можно только с помощью маленького зондирующего элемента — "нанопальца", размер которого близок к размеру исследуемых объектов — атомов или более крупных поверхностных структурных деталей. Если размер "нанопальца" увеличивается, то прикоснуться можно только к участку поверхности, включающему много атомов, поэтому, соответственно, разрешение прибора уменьшается и утрачивает локальность.

Принципиально важным отличием методов СЗМ от других, более традиционных (например, радиационно-лучевых), является многообразие возможностей, таящихся в прикосновении зонда, которые отнюдь не исчерпываются простым ощупыванием рельефа поверхности или измерением одного выделенного свойства: зонд может реагировать на различные характеристики исследуемого объекта, а также изменять их в нужную сторону, причем соответствующие изменения и их контроль осуществляются одним и тем же прибором непосредственно в ходе эксперимента.

На рис. 2 показана общая схема контакта зонда (иглы) с образцом. Существенно, что игла является частью более протяженной системы — кантилевера (в английской терминологии — *"cantilever"*). Поэтому при общем анализе свойств системы кантилевер—зонд—поверхность необходимо учитывать

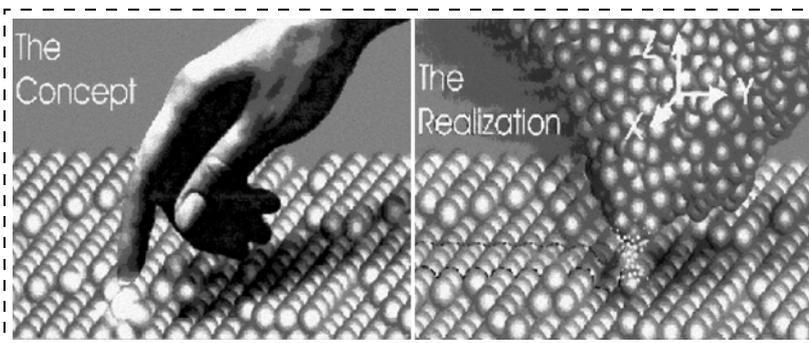


Рис. 1. Концепция локального метода зондирования поверхности [2]

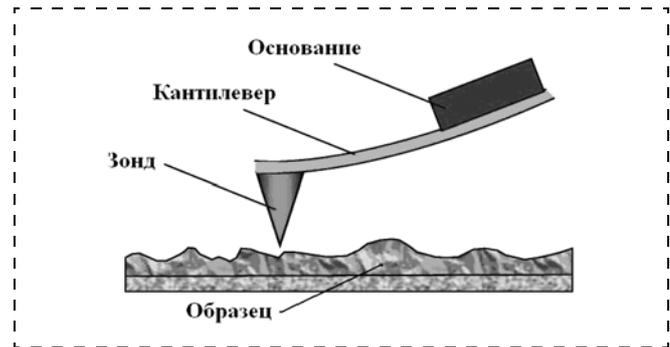


Рис. 2. Схема контакта зонд—образец в СЗМ [38]. Высота зонда (иглы) преувеличена. Характерные масштабы: радиус закругления зонда вблизи точки касания с поверхностью 1...20 нм; высота зонда 1...10 мкм; длина балки кантилевера 100 мкм, толщина и ширина 5 и 20 мкм соответственно. Высота аперкса зонда над поверхностью 1...1000 нм, горизонтальные размеры области сканирования 1...500 нм

несколько уровней ее сложности и масштабной организации: балку кантилевера следует отнести к макро- или мезоскопическому уровню; основную (протяженную) часть зонда — к микроскопическому, а его крайнюю оконечность, обращенную к исследуемому объекту на поверхности, — к наноскопическому, причем для атомов контактной зоны (пятна контакта) значительную роль играет электронная структура. Очевидно, что зонд, микро- и нановыступы поверхности могут характеризоваться различными временами термодинамической релаксации, поэтому в процессе зондирования данная система является нестационарной и неравновесной.

Конкретный режим сканирования и управления положением зонда у поверхности осуществляется с помощью прецизионных пьезоманипуляторов (подробнее см. [14, 15, 17, 26, 37, 38]), управляемых подачей соответствующих напряжений. Входные и выходные сигналы микроскопа задаются в электрической форме, поэтому измерения и их обработка являются характерными для механо-электрических систем. На рис. 3 показана общая функциональная схема зондового микроскопа, включающая кантилевер с иглой, а также его основные системы: сканирования, обратной связи, компьютерной обработки данных и управления.

При статическом положении зонда система кантилевер—зонд—поверхность стремится стать равновесной, а нормальные и латеральные силы, приложенные к зонду и кантилеверу, взаимно уравниваются. Нормальное или латеральное смещение зонда из положения равновесия, вызванное сканированием, порождает множество релаксационных явлений: происходит перестройка электрон-

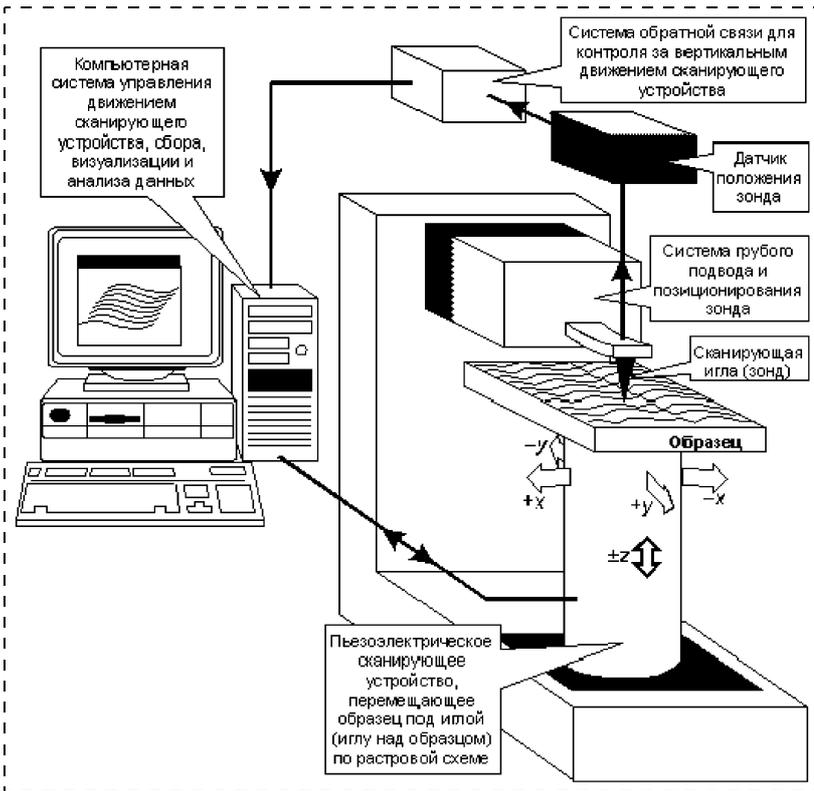


Рис. 3. Обобщенная функциональная схема сканирующего зондового микроскопа (по работе [18])

ной и атомной структуры, возникают колебания атомов (фононы) и другие элементарные возбуждения (электронно-дырочные пары, плазмоны, поляритоны и экситоны и т. д.), условия генерации которых определяются законами сохранения энергии и импульса, а спектры могут зависеть от времени вследствие изменений геометрии контактной зоны, инициированных взаимодействиями. В частности, механическая модель атомной структуры на рис. 4 иллюстрирует механизм генерации фоно-

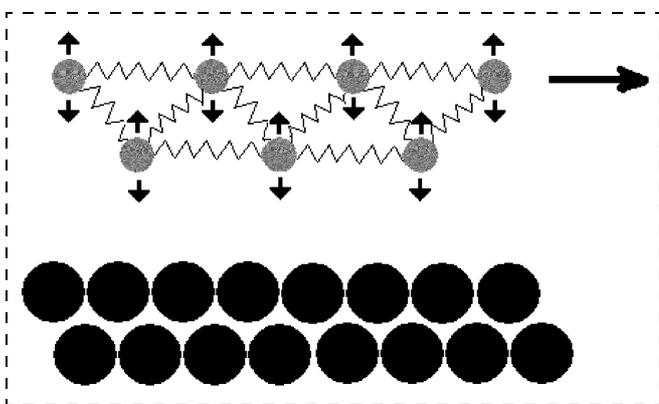


Рис. 4. Механизм генерации фононов в модели атомов — "пружин". Для простоты возможные локальные смещения атомов в горизонтальном направлении и по связям между различными слоями не показаны

нов, вызванной поступательным движением атомов решетки.

В свою очередь, от геометрии и структуры контакта зависят не только силы взаимодействия, но также (в силу граничных условий) статические и флуктуационные электромагнитные поля, действующие в области контактного пятна. В режиме электростатического взаимодействия, когда к контакту приложено постоянное смещение, электрические заряды распределяются по поверхности (проводящих) зонда и кантилевера с некоторой поверхностной плотностью, а в целом система кантилевер—зонд—поверхность образует электрический конденсатор, емкость которого определяется формой и размерами зонда и балки кантилевера. Статические электрические поля могут создаваться также локализованными на зонде и поверхности зарядами и пятнами заряда. В отличие от этого, флуктуационные электромагнитные поля на зонде и образце имеются всегда. Они обусловлены квантовыми и тепловыми флуктуациями поляризации и намагниченности, зависящими от температуры, диэлектрических и магнитных свойств

материалов, которые в области контактной зоны могут значительно отличаться от свойств макроскопических тел. В частности, абсорбционная способность контакта в различных участках электромагнитного спектра существенно зависит от наличия адсорбированных частиц, структурных и химических изменений, кинетики пятен заряда и т. д.

Условия термодинамического равновесия в зоне контакта выполняются лишь приближенно, а так как, согласно второму началу термодинамики, генерация теплоты является фундаментальным свойством всех необратимых физических процессов, то конечным продуктом релаксационных (диссипативных) эффектов является тепловой нагрев системы зонд—поверхность и окружающей среды. Некоторая, очень малая при нерелятивистском движении зонда, часть энергии излучается в окружающее пространство в виде электромагнитных волн.

В атомно-плотных контактах зонда с поверхностью процессы взаимодействий могут сопровождаться явлениями внезапной (катастрофической) перестройки электронной и атомной структуры и силового гистерезиса. К числу катастроф такого рода относятся эффекты "прилипания" ("отлипания") зонда от поверхности и "прилипания—скольжения" (в английской терминологии *"jump to contact"*, *"pull-off"* и *"stick-slip"*), наблюдающиеся при

нормальном и латеральном движении зонда вблизи поверхности. В таких ситуациях возникающие эффекты являются существенно нестационарными и неравновесными и характеризуются временными масштабами порядка 10^{-12} и 10^{-16} с для перестроек атомной и электронной структур соответственно.

В катастрофах адгезионного и фрикционного типа, помимо элементарных эффектов, упомянутых выше, локальный нагрев области контакта способен вызвать образование дефектов, зон пластической деформации, вмятин и царапин, трещин, частиц износа, фазовых и химических превращений и т. д. В диэлектрических материалах при образовании поверхностных трещин могут возникать сильные электростатические поля, приводящие к значительному ускорению электронов и ионов, оказавшихся в зоне действия поля. В свою очередь, это создает условия для эмиссии электромагнитного излучения и вылета электронов и атомов из контактной зоны.

Несмотря на то, что многообразие ("палитра") возможностей, которые открывает эффект касания зонда с поверхностью, является неотъемлемым свойством локального метода зондирования, принципиально необходима дифференциация и контроль этих возможностей, поскольку каждая из них имеет свою цель и последствия, обусловленные конкретным типом взаимодействия. Воздействие зонда на образец зависит от значения приложенной силы, электрического или теплового тока, интенсивности и частоты внешнего излучения, а также от характера промежуточной среды между зондом и поверхностью (вакуум, газ, жидкость).

При оптимально выбранном режиме сканирования необходимо контролировать (с помощью системы обратной связи микроскопа) положение зонда в соответствии с рельефом поверхности, значением силы, туннельного тока, интенсивностью света и т. д. и какую-нибудь другую (или несколько) характеристику взаимодействия с целью изучения или изменения требуемого физического свойства или функции. Тем не менее, если даже контроль над положением зонда обеспечен, возможна множественная реакция системы на различные воздействия. Например, в режимах атомно-силовой микроскопии реакция (деформация) упругой балки кантилевера определяется суммарным действием всех возможных сил, возникающих между зондом и образцом, характер которых, в свою очередь, может обуславливаться дополнительными физическими факторами. В режимах туннельной микроскопии туннельный ток между зондом и поверхностью зависит от энергии и плотности начальных и конечных состояний электронов, их импульса, типа симметрии волновых функций, высо-

ты и ширины туннельных барьеров, температуры и т. д. Кроме того, возможно влияние силовых взаимодействий на значение туннельного тока, и обратно — через изменения электронной структуры, геометрии контактной зоны и температуры. Аналогично, нагрев зонда в сканирующем термическом микроскопе (СТеМ) и сканирующем ближнепольном оптическом микроскопе (СБОМ) влияет на атомную и электронную структуру контакта, силовые взаимодействия и т. д. Чем меньше размеры зонда и деталей поверхностного рельефа, или чем выше значение требуемого разрешения, тем более "деликатным" должен быть процесс измерений и тем строже требования, предъявляемые к контролю над параметрами системы.

Несколько замечаний о терминологии

Поскольку характер взаимодействий, возникающих между зондом и образцом, является сложным и зависит от режима сканирования, то используемая терминология оказывается сильно разветвленной и, кроме того, постоянно видоизменяется и дополняется. Вместе с тем, для всех типов СЗМ контакт зонд—поверхность имеет общие черты, которые, в частности, касаются характеристик силовых взаимодействий и которыми в значительной степени определяются выбор рабочего режима СЗМ и условия сканирования.

Во-первых, как и во всякой физической системе, необходимо различать консервативные и неконсервативные (диссипативные) взаимодействия. Можно также классифицировать их как упругие и неупругие. Соответственно, для первых механическая энергия системы с течением времени остается постоянной, а для вторых — нет, т. е. происходит ее трансформация в другие формы (например, в тепло). К консервативным относятся фундаментальные взаимодействия, существующие в природе, и в частности, электромагнитные. Поэтому, когда говорят об электростатических, магнитостатических, электродинамических (Ван-дер-Ваальсовых) или межатомных силах, являющихся электромагнитными в своей основе, применительно к зондовой микроскопии, то возникает ошибочное впечатление, что все они априорно являются консервативными. В действительности, как уже было сказано ранее, система кантилевер—зонд—поверхность имеет многоуровневый характер сложности. Вследствие этого при любом движении нанозонда вблизи исследуемой поверхности наряду с консервативным всегда имеет место и диссипативное взаимодействие (даже без учета диссипативных потерь в кантилевере, обусловленных внутренним трением). Это происходит вследствие того, что некоторая часть механической энергии кантилевера с зондом (или отдельной его части) передается большому

числу атомов и электронов контактной зоны. Вероятность того, что "потерянная" энергия вернется к кантилеверу в форме его механической энергии как целого, ничтожно мала. Это в итоге является причиной диссипации и необратимости. Аналогично, диссипативные потери энергии и диссипативные силы взаимодействия с конденсированными средами возникают и при движении отдельных заряженных и нейтральных атомных частиц.

В квантовой трактовке консервативные силы элементарной природы обусловлены обменом виртуальными частицами — переносчиками взаимодействия, а диссипативные сопровождаются рождением реальных частиц и квазичастиц. Так, например, взаимодействие с металлической поверхностью электрического заряда, покоящегося вблизи нее (в вакууме) на расстояниях порядка нескольких нанометров, осуществляется через поле виртуальных поверхностных плазмонов, а диссипативное взаимодействие (при движении заряда) сопровождается генерацией реальных частиц и квазичастиц: плазмонов и пар электрон—дырка на поверхности металла, и фотонов в окружающем пространстве. Последующее релаксационное затухание этих возбуждений приводит к нагреву поверхности и окружающей среды.

Во-вторых, следует различать контактные и бесконтактные, поверхностные и адгезионные взаимодействия. К бесконтактным относят силы, не связанные с короткодействующими межатомными (притягивающими и отталкивающими), которые обычно называются химическими. При бесконтактных взаимодействиях даже наиболее близко расположенные друг к другу атомы зонда и образца находятся на расстояниях, превышающих характерные длины химических связей в конденсированных телах (0,2—0,3 нм), поэтому между отдельными атомами зонда и образца и между электрически нейтральными немагнитными зондом и образцом реализуется режим дальнедействующего притяжения с преобладанием флуктуационных (Ван-дер-Ваальсовых) сил (подробнее см. в следующем разделе).

При наличии на зонде и образце локализованных пятен заряда, магнитных моментов или разности потенциалов между ними дальнедействующие (бесконтактные) силы вызваны электростатическими и магнитными взаимодействиями (как правило, притягивающими). Наоборот, в жестких контактах часть атомов зонда "углубляется" в поверхность, и тогда их взаимодействие с атомами образца становится существенно контактным и отталкивающим. В этом случае происходит сильное перекрытие электронных

оболочек атомов, приводящее к увеличению их энергии из-за того, что атомные электроны, оказываясь в одинаковых квантовых состояниях, вынуждены занимать вакантные энергетические уровни с большей энергией (принцип запрета Паули). Кроме того, силы отталкивания вызываются кулоновскими взаимодействиями положительно заряженных атомных остовов. В отличие от них электрические взаимодействия электронов между собой и с атомными остовами суммарно не так велики, поскольку электронные оболочки в пространстве "размазаны". Несмотря на все это, для многих атомов зонда и образца взаимодействие всегда остается бесконтактным и притягивающим. Обрисованная картина несколько упрощает ситуацию, поскольку силовое взаимодействие зонда и образца не сводится к простой сумме отдельных межатомных взаимодействий: необходимо учитывать роль электронной подсистемы как целого и дальнедействующих корреляций в движении электронов и атомов.

Под термином "поверхностные" подразумеваются все возможные типы сил, действующих в зоне контакта (притягивающие и отталкивающие), включая и капиллярные силы, появляющиеся при наличии на поверхностях жидких прослоек. Наконец, адгезионными называются силы, возникающие при отрыве одного тела от другого (в нашем случае зонда от поверхности) и удерживающие тела в контакте. Таким образом, адгезионные силы тоже можно считать поверхностными. Их специфической чертой является наличие гистерезисных явлений: отрыв зонда от поверхности, как правило, сопровождается образованием контактной перемычки, ее вытягиванием, разупорядочением и последующим разрывом (характерный пример — вытягивание ложки из стакана с медом). Эти эффекты иллюстрирует рис. 5, а, на котором показан вид системы зонд—поверхность, полученный при компьютерном моделировании стадии разрыва металлического контакта. Можно отметить аналогию с процессом разрыва жидкой капиллярной перемычки, соединяющей зонд с влажной поверхностью (рис. 5, б).

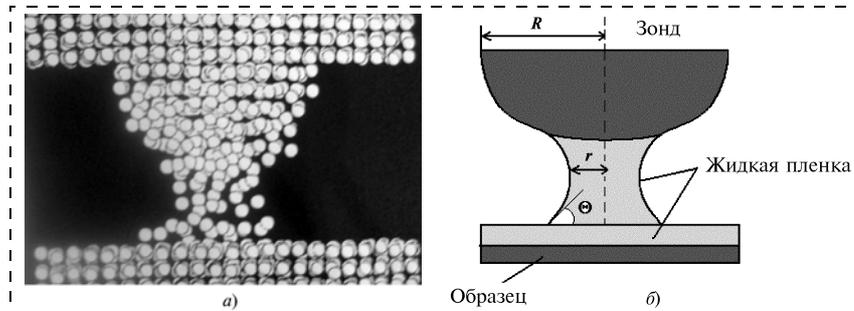


Рис. 5. Молекулярно-динамическое моделирование контакта зонда (Pb) с поверхностью свинца (по работе [8]) (а). В области контактной перемычки заметно разупорядочение атомных слоев. Капиллярное вытягивание жидкой пленки зондом при касании влажной поверхности (б)

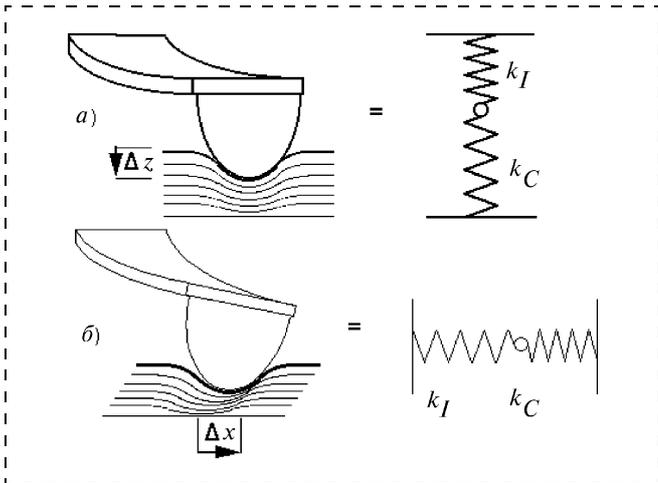


Рис. 6. Схема деформаций зонда и поверхности и эквивалентные жесткости при нормальном (а) и латеральном (б) нагружении контакта; k_I — жесткость кантилевера, k_C — жесткость контакта зонд—образец (по работе [14])

В-третьих, силы взаимодействия между зондом и образцом принято разделять на нормальные (силы притяжения и отталкивания), действующие по нормали к поверхности образца, и тангенциальные (латеральные), направленные вдоль поверхности. Нормальные силы преимущественно консервативны или же имеют смешанный характер. Тангенциальные же силы, напротив, чаще являются неконсервативными и тормозящими, но могут быть и ускоряющими. Характер деформаций кантилевера при нормальном и латеральном нагружении контакта демонстрирует рис. 6. На нем также показаны возникающие контактные жесткости эквивалентных линейных ("гуковских") пружин.

Силы внешнего трения с точки зрения приведенной терминологии относятся к числу неконсервативных (диссипативных) поверхностных или адгезионных сил, а по направлению они могут быть как нормальными — при нормальном к поверхности движении зонда, так и тангенциальными — при параллельном движении.

В-четвертых, силы взаимодействия (даже консервативные!) могут зависеть от скорости движения зонда. Например, взаимодействие Ван-дер-Ваальса движущихся атомов отличается от статического появлением дополнительных скоростных вкладов. При типичных скоростях движения зондов в СЗМ, не превышающих 1 м/с, динамические поправки к статическим силам обычно малы, но в моменты образования или разрыва контактов они могут стать более заметными. "Вязкие" силы трения, пропорциональные скорости, по определению являются неконсервативными, а в общем случае их зависимость от скорости может быть существенно нелинейной.

Физические эффекты в наноконтактах зонда сканирующего микроскопа с поверхностью

Бесконтактные силовые взаимодействия. В основе сил, возникающих между зондом и поверхностью образца, лежат электромагнитные взаимодействия. В некоторых практически важных случаях правильный вид соответствующих зависимостей от расстояния и основных физических факторов для взаимодействий частиц (зондов), движущихся с нерелятивистской скоростью, и плоской поверхностью образцов, обладающих диэлектрической и (или) магнитной проницаемостью, можно найти из анализа физических размерностей. Рис. 7 поясняет физическую ситуацию в случае параллельного к поверхности движения частиц. Необходимые величины: высота частицы над плоской поверхностью z (см); заряд Ze ($\Gamma^{0,5}\text{см}^{1,5}\text{с}^{-1}$); дипольный электрический d или магнитный M момент; M ($\Gamma^{0,5}\text{см}^{2,5}\text{с}^{-1}$); характерная частота поглощения электромагнитного излучения ω_0 (с^{-1}); скорость частицы V (см/с); радиус сферической наночасти-

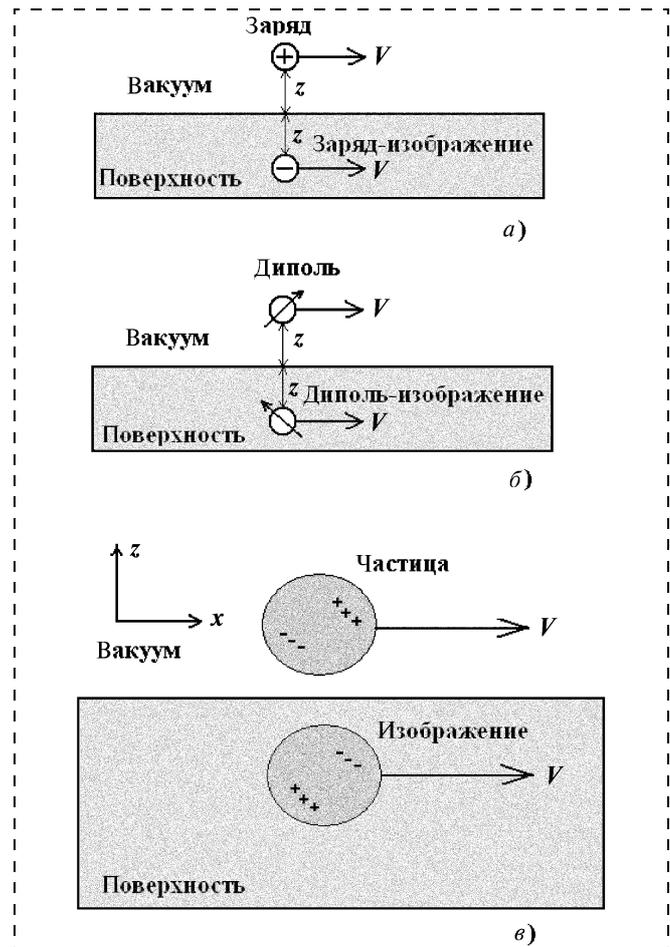


Рис. 7. Схема движения и бесконтактного взаимодействия движущихся частиц с поляризующейся поверхностью: а — заряженная частица; б — постоянный диполь; в — нейтральная наночастица (флуктуирующий диполь)

цы R (см); температура T (К), консервативные и диссипативные силы F_z, F_x ($\text{г} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^{-2}$).

При параллельном к поверхности движению частиц нормальные силы, действующие на них, являются консервативными, а тангенциальные — диссипативными (тормозящими); при перпендикулярном движении и консервативная, и диссипативная силы перпендикулярны к поверхности. Конечно, скорость распространения света c приводит к эффекту запаздывания электромагнитных взаимодействий, влияние которого определяется значением безразмерного параметра $k = z\omega_0/c$. В СЗМ, однако, типичные расстояния зондов от поверхности составляют 1...100 нм, поэтому $k < 1$ вплоть до частот рентгеновского диапазона, вследствие чего роль эффекта запаздывания обычно невелика и его можно не учитывать. В пренебрежении запаздыванием формулы для консервативной и диссипативной сил, действующих на движущиеся частицы, имеют вид (с точностью до численных коэффициентов порядка единицы), приведенный ниже.

1. *Взаимодействие заряда с поверхностью:*

$$F_c(z) \propto -\frac{(Ze)^2}{z^2}, \quad F_d(z) \propto -\frac{(Ze)^2}{z^2} \frac{V}{z\omega_0}. \quad (1)$$

2. *Взаимодействие дипольной частицы с поверхностью:*

$$F_c(z) \propto -\frac{d^2}{z^4}, \quad F_d(z) \propto -\frac{d^2}{z^4} \frac{V}{z\omega_0}. \quad (2)$$

Отрицательный знак F_c соответствует притяжению к поверхности, а отрицательный F_d — тормозящей силе, причем для магнитного диполя в формуле (2) следует писать M^2 вместо d^2 . Характерная частота поглощения ω_0 для взаимодействий с поверхностью электрического и магнитного диполей, вообще говоря, различна: в первом случае она определяется диэлектрическими свойствами образца, а во втором — магнитными. Дополнительные замечания о магнитных силах будут сделаны в конце данного раздела. Формулы, аналогичные (2), имеют место и для взаимодействия частиц, обладающих мультипольными моментами более высокого порядка. Например, для квадрупольной молекулы с отличной от нуля компонентой тензора электрического квадрупольного момента Q_{zz} в формуле (2) достаточно сделать замену $d \rightarrow Q_{zz}/z$.

3. *Флуктуационно-электромагнитное (Ван-дер-Ваальсово) взаимодействие*

Флуктуационно-электромагнитные силы обусловлены взаимодействием спонтанных и индуцированных электрических и магнитных моментов,

возникающих на нейтральной частице и в среде, вследствие квантового и теплового движения электронов и атомов. Наиболее важную роль играют флуктуации электрического дипольного момента. В случае наночастиц соответствующие силы, обусловленные тепловыми флуктуациями (дипольного момента), записываются в виде (подробнее см. [33]):

$$F_c(z) \propto -\frac{(k_B T) R^3}{z^4}; \quad F_d(z) \propto -\frac{(k_B T) R^3}{z^4} \frac{V}{z\omega_0}, \quad (3)$$

где k_B — постоянная Больцмана; T — температура (для простоты считаем, что температуры частицы и поверхности одинаковы). Заметим, что формулы (3) вытекают из формул (2), если в последних выполнить замену $d^2 \rightarrow (k_B T) R^3$. Квантовые флуктуации дипольного момента являются причиной возникновения консервативной силы F_c (силы Ван-дер-Ваальса), для которой в формуле (3) достаточно заменить $k_B T$ на $\hbar\omega_0$, но "сопряженную" ей диссипативную компоненту F_d нельзя получить столь же простым образом. Сила этого типа чрезвычайно мала (см. [33] и соответствующие ссылки).

Физический смысл формул для консервативных компонент сил (1)—(3) очевиден: притяжение частиц к поверхности обусловлено взаимодействием заряда, постоянного и флуктуирующего диполя со своими зеркальными "изображениями" (рис. 7). Что касается механизма действия диссипативных сил, то он связан с характером процесса поглощения электромагнитных возбуждений: это могут быть омические потери для проводящих образца и зонда, релаксационные и резонансные для диэлектрических, магнестрикционных для магнитных и т. д. Из более детального анализа следует [33], что флуктуационно-электромагнитная сила F_d зависит также от дополнительного безразмерного численного фактора $\alpha = k_B T / \hbar\omega_0$, имеющего смысл отношения частоты Вина равновесного электромагнитного излучения (излучения "черного тела") к характерной частоте поглощения данной системы. В итоге формула (3) для F_d остается в силе при $\alpha \geq 1$, а при $\alpha < 1$ содержит добавочный множитель α . Отсюда вытекает, что вклад высокочастотных возбуждений поверхности, например, плазмонов — в случае металлического контакта и экситонов — в случае диэлектрических, в силу демпфирования движущейся нейтральной частицы является незначительным в широком интервале температур, поскольку характерные частоты этих возбуждений велики по сравнению с частотой Вина.

В формулах (1)—(3), как нетрудно видеть, присутствует также безразмерное отношение $\beta = \frac{V}{z\omega_0}$.

Оно играет роль малого параметра в разложении

консервативной и диссипативной сил в ряд по степеням скорости частицы. Следующие члены этих разложений для сил F_c и F_d пропорциональны β^2 , β^3 и при типичных скоростях сканирования в СЗМ малы. Однако при $\beta \geq 1$ зависимость диссипативных сил от скорости является существенно нелинейной, и простые формулы (1)—(3) становятся некорректными [33]. Параметр β имеет также другой смысл. Так, поскольку $z/V = \tau_c$ есть характерное время столкновения частицы с поверхностью, а $\omega_0^{-1} \sim \tau_d$ — время, характеризующее процесс диссипации энергии, то формулы (1)—(3) приводятся к универсальному виду

$$F_d = \mu F_c. \quad (4)$$

Если далее рассматривать отношение $\mu = \tau_d/\tau_c$ как обобщенный коэффициент трения, то (4) совпадает по форме с классическим законом "сухого" трения Амонтона—Кулона. При этом под F_c подразумевается сила нормального давления зонда в жестком контакте. Факт этого совпадения, с одной стороны, можно рассматривать как некоторое микроскопическое обоснование закона трения, а с другой стороны, — как расширение области его действия и указание на универсальную связь, существующую между модулями обобщенной консервативной и диссипативной сил (произвольной природы), действующих на малые частицы.

На практике форма иглы СЗМ часто моделируется параболоидом вращения с радиусом кривизны R вблизи апекса и высотой H , причем $H/R \gg 1$. В этом случае формулы (3) рассматриваются как локальные соотношения для малого объема вещества зонда ($\Delta\Omega = 4\pi R^3/3$), а при вычислении суммарных сил, действующих на него, применяется приближение аддитивности, обеспечивающее правильные конечные зависимости сил от расстояния. Возникающая ошибка в вычислении констант взаимодействия может составлять несколько десятков процентов, но для современного уровня количественных измерений в СЗМ такой точности вполне достаточно. В приближении аддитивности, интегрируя формулы (3) по объему зонда, получим (снова игнорируем численные факторы)

$$F_c(z) \propto -\frac{(k_B T)R}{z^2}; \quad F_d(z) \propto -\frac{(k_B T)R}{z^2} \frac{V}{z\omega_0}, \quad (5)$$

где R — радиус кривизны, а z — расстояние точки апекса параболоида от поверхности. Таким образом, переход от формул (3) для малой сферической частицы к формулам (5) для параболического зонда осуществляется формальной заменой $R^3/z^3 \rightarrow R/z$.

Точное выражение для Ван-дер-Ваальсовой силы $F_c(z)$ в случае контакта параболического (сферического) зонда с плоской поверхностью имеет вид [40]

$$F_c(z) = -HR/6z^2, \quad (6)$$

где H — постоянная Гамакера. В терминах характерной частоты поглощения ω_0 (см. текст после формулы (3)), очевидно, $H = 6\hbar\omega_0$. Порядок константы H для большинства материалов близок к 10^{-19} Дж, а знак может быть различным в зависимости от типа промежуточной среды между зондом и образцом. В случае вакуумной или воздушной среды всегда $H > 0$, но если ее диэлектрическая проницаемость имеет промежуточное значение между таковыми для материалов зонда и поверхности, то $H < 0$.

Для расчета сил в СЗМ употребляется также так называемое "приближение Дерягина" [21, 27], согласно которому сила взаимодействия между выпуклым зондом с радиусом кривизны R и плоской поверхностью образца выражается через отнесенную к единице площади удельную энергию взаимодействия двух полубесконечных сред, разделенных плоской щелью, $-w(z)$. В этом приближении

$$F_c(z) = 2\pi R w(z). \quad (7)$$

Формула (7) согласуется с макроскопической теорией Ван-дер-Ваальсовых сил, согласно которой в соответствии с известной формулой Лифшица [41] удельная энергия взаимодействия двух полубесконечных сред, разделенных плоской щелью, равна $w(z) = -H/12\pi z^2$. Выражая H/z^2 через $w(z)$ и подставляя в (6), получим (7).

4. *Электростатическое взаимодействие.* Особая ценность формулы (7) состоит в том, что она может успешно применяться и в расчетах других типов сил. Например, в случае электростатического взаимодействия удельная энергия взаимодействия двух "толстых" пластин, разделенных плоским вакуум-

ным промежутком, равна $w(z) = -\frac{CU^2}{2A} = -U^2/4\pi z$,

где U — электрическое напряжение, приложенное между пластинами; C — емкость эквивалентного плоского конденсатора; A — площадь пластин. Исключая $w(z)$ из (7) с помощью этого соотношения, для силы электростатического притяжения выпуклого зонда к плоской поверхности (оба материала проводящие) получим

$$F_c(z) = -RU^2/2z. \quad (8)$$

Формула (8) справедлива при $z \ll R$. При $z \gg R$ зонд можно считать точечным зарядом и $F_c(z) \sim z^{-2}$. В промежуточной области расстояний сила взаимодействия зависит также от высоты параболоида,

моделирующего форму зонда, и от площади балки кантилевера.

В практике СЗМ применяется также более сложный электростатический режим, когда, наряду с постоянным напряжением U_0 , между зондом и образцом дополнительно подается переменное напряжение $U_1 \sin \omega t$ [37, 38]. В этом случае в соответствии с (8) сила взаимодействия, кроме постоянной составляющей, содержит гармоники на частотах ω и 2ω . Если образец (на проводящей подложке) имеет неоднородное распределение диэлектрических свойств, то его поверхностные слои образуют дополнительную емкость, включенную последовательно с емкостью контакта между кантилевером (с зондом) и поверхностью. Методики, использующие детектирование электросилового взаимодействия на частотах ω и 2ω , позволяют находить распределение поверхностного потенциала (мода Кельвина) и распределение поверхностной емкости (емкостная мода). Для исключения влияния рельефа в этих методиках применяется двухпроходной режим, в котором сначала запоминается рельеф поверхности, а затем зонд движется по траектории, огибающей его, на фиксированной высоте.

Диссипативные силы, "сопряженные" консервативным силам $F_c(z) = -HR/6z^2$ и $F_c(z) = -RU^2/2z$, находят по формуле (4), но значение коэффициента трения μ в каждом конкретном случае является индивидуальным. Механизмы диссипации энергии в этих ситуациях мало изучены и предположительно связаны с генерацией и затуханием фононов, возникающих в результате релаксации упругих напряжений кристаллической решетки. Для взаимодействий, описываемых формулами (1)–(3), как было сказано ранее, первичная природа диссипации носит электромагнитный характер, но фононный механизм тоже не исключается, поскольку в диэлектриках имеются связанные фонов-фотонные моды (поляритоны), а в металлах — электрон-фононные взаимодействия, благодаря которым происходит перекачка энергии от электронов к колебаниям решетки (фононам).

5. Магнитостатическое взаимодействие. Вернемся теперь к обсуждению магнитостатических сил, важных для магнитно-силовой микроскопии (МСМ). Если считать, что сферическая частица ферромагнитного материала на конце зонда имеет однородную намагниченность m и радиус R , то ее магнитный момент, энергия взаимодействия с магнитным полем H образца в точке локализации зонда и сила, действующая на него, равны, соответственно, $M = \frac{4\pi}{3} R^3 m$, $U = -MH$ и $F = -\nabla U = \nabla(MH)$. Отсюда следует, что при однородном распределении магнитного поля над образцом магнитная сила на зонде равна нулю. Если же на поверхности образца

имеется неоднородное распределение намагниченности $m_s(x, y, z)$, то $F \neq 0$. В этом случае значение магнитного поля находится суммированием (интегрированием) полей элементарных магнитных моментов, связанных с намагниченностью $m_s(x, y, z)$, после чего вычисляется потенциальная энергия и сила взаимодействия зонда с образцом. Пусть под зондом на расстоянии z от него на поверхности находится локализованный магнитный момент M_s , а векторы M и M_s перпендикулярны к поверхности и направлены одинаковым образом. Тогда магнитное поле, создаваемое магнитным моментом M_s на зонде, равно $H = -\frac{2M_s}{z^3}$, а сила взаимодействия зонда с поверхностью

$$F_c(z) = -\frac{6MM_s}{z^4} \sim -\frac{MM_s}{z^4} \quad (9)$$

(отрицательный знак отвечает притяжению). Формула (9) полностью аналогична формуле (2) для взаимодействия магнитного диполя с поверхностью образца, обладающего магнитными свойствами, если в (2) заменить d^2 на MM_s . В отличие от формулы (2), однако, взаимодействие (9) может быть и отталкивающим, если векторы M_s и M имеют разное направление. Отталкивание магнитного зонда будет наблюдаться, в частности, при его взаимодействии с поверхностью сверхпроводника. Модификация (9) для зонда параболической формы делается точно так же, как и при получении (5).

Учитывая, что $M = \frac{4\pi}{3} R^3 m$, и проводя в (9) замену $R^3/z^3 \rightarrow R/z$, находим

$$F_c(z) \approx -\frac{mM_s R}{z^2} \quad (10)$$

Контактные взаимодействия. В отличие от электромагнитных, флуктуационно-электромагнитных и Ван-дер-Ваальсовых сил, являющихся дальнедействующими, удивительной особенностью упругих контактных взаимодействий в режиме отталкивания зонда является возможность их описания в рамках классической механики сплошной среды. Соответствующая теория была разработана еще в 1882 г. Г. Герцем. Согласно этой теории упругая энергия, запасаемая в контакте выпуклого тела с поверхностью (подробнее см. [42]), в электрон-вольтах равна

$$U = 0,021 \frac{F^{5/3}}{E^{2/3} R^{1/3}}, \quad (11)$$

где F — внешняя нагрузочная сила (нН), прилагаемая к зонду; R и E — приведенные радиус кривизны (нм) и модуль Юнга (ТПа) контакта, связанные с радиусами кривизны зонда и локального участка поверхности (R_1 и R_2) и модулями упругого сжатия соответствующих материалов (E_1 и E_2) соотношениями $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$ и $1/E = (1 - \eta_1^2)/E_1 + (1 - \eta_2^2)/E_2$ (η_1 и η_2 — коэффициенты Пуассона). Эквивалентным образом энергия U может быть выражена как функция деформации h , учитывающей суммарное смятие зонда и продавливание поверхности образца:

$$U = \frac{1}{3} 10^4 ER^{1/2} h^{5/2} \text{ [эВ]}, \quad (12)$$

где h и R тоже выражены в нанометрах, а E — в терапаскалях. Как вытекает из (12), упругий контакт выпуклых тел отличается от идеальной пружины Гука ($U = k_c h^2/2$) тем, что контактная жесткость k_c нелинейно зависит от деформации $k_c \propto h^{1/2}$. Это обстоятельство надо принимать во внимание в эквивалентных механических моделях системы кантилевер—зонд—поверхность, использующих понятие контактной жесткости (см. рис. 6). Нормальная (консервативная) сила, действующая на зонд в случае упругого контакта, связана с упругой энергией U обычным дифференциальным соотношением:

$$F = dU/dh = \frac{4}{3} 10^3 ER^{1/2} h^{3/2} \text{ [нН]}. \quad (13)$$

Для контактного режима притяжения при удалении зонда от образца или приближении к нему при вхождении в контакт нормальная сила определяется адгезионными или поверхностными силами. Силу отрыва зонда также можно найти по формуле (6), если принять, что $w(z)$ определяется удельной работой адгезии плоских поверхностей. При образовании или разрыве жидкой контактной перемычки $w(z)$ заменяется поверхностным натяжением γ жидкости, а численный коэффициент в (6) зависит от значения контактных углов и радиусов смачивания (см. рис. 5, б). Разрыв контактных перемычек сопровождается адгезионным гистерезисом и диссипацией энергии. В этом случае сила, вычисляемая по формуле (6), не является целиком консервативной.

К контактному относятся также силы химического взаимодействия, возникающие между отдельными выступающими атомами зонда и поверхности, которые нельзя рассчитать с помощью приближений классической механики. Эти силы ответственны за образование ионно-ковалентных связей между атомами, а при отрыве зонда, наряду

с другими силами, вносят значительный вклад в суммарную силу адгезии зонда к поверхности. Достаточно точные оценки химических сил дает аппроксимация Морза

$$V_M(r) = -E_b(2 \exp(-a(r - r_0)) - \exp(-2a(r - r_0))), \quad (14)$$

где E_b — энергия связи; r_0 — равновесное расстояние между атомами (длина связи), а параметр a характеризует радиус действия сил. Типичные значения E_b , r_0 и a в случае ковалентных связей составляют 2–3 эВ, 0,2 нм и 5 нм^{-1} [36]. В случае ионных связей притягивающая часть потенциала (14), имеющая отрицательный знак, заменяется выражением для электростатической энергии точечных зарядов $q_1 q_2/r$, где q_1 , q_2 — заряды ионов.

Список литературы

1. Binnig G., Rohrer H. Scanning tunneling microscopy: from birth to adolescence // Rev. Mod. Phys. 1987. V. P. 615; УФН. 1988. Т. 154. С. 261.
2. Binnig G., Rohrer H. In touch with atoms // Rev. Mod. Phys. 1999. V. 71. N 2. S. 324.
3. Эдельман В. С. Сканирующая туннельная микроскопия // Приборы и техника эксперимента. 1989. № 5. С. 24.
4. Sarid D. Scanning force microscopy with applications to electric, magnetic and atomic forces. N. Y.: Oxford U. Press. 1991.
5. Wiesendanger R., Guntherodt H. J. (eds.). Scanning tunneling microscopy. Berlin. N. Y.: Springer. 1992. 1993. V. 1–3.
6. Chen J. C. Introduction to scanning tunneling microscopy. Oxford: Oxford Univ. Press. 1993.
7. Stoneham A. M., Marta M., Ramos D., Sutton A. P. How do they stick together? A feature article // Phil. Mag. 1993. V. A67. N 4. P. 797.
8. Courjon D., Bainier C. Near field microscopy and near field optics // Rep. Prog. Phys. 1994. V. 57. P. 989.
9. Marti O., Muller R. (eds.). Photons and local probes // NATO ASI Series E: Applied sciences. V. 300. Dordrecht: Kluwer. 1995.
10. Bhushan B., Israelachvili J. N., Landman U. Nanotribology: friction, wear and lubrication at the atomic scale // Nature (London). 1995. V. 374. P. 607.
11. Singer I. L., Pollock H. M. (eds.). Fundamentals of friction: Macroscopic and microscopic processes. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ. 1996.
12. Неволин В. К. Основы туннельно-зондовой нанотехнологии: учебное пособие. М.: МГИЭТ (ТУ), 1996. 91 с.
13. Persson B. N. J., Tosatti. Physics of sliding friction. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ. 1996.
14. Carpick R. E., Salmeron M. Scratching the surface: fundamental investigations of tribology with atomic force microscopy // Chem. Rev. 1997. V. 97. P. 1163.
15. Hurtmann U. An introduction to AFM and related methods. TopoMetrix. 1997. P. 26.
16. Бухараев А. А., Овчинников Д. В., Бухараева А. А. Диагностика поверхности с помощью сканирующей силовой микроскопии // Заводская лаборатория. 1997. № 5. С. 10.
17. Суслов А. А., Чижик С. А. Сканирующая зондовая микроскопия // Материалы, технологии, инструменты. 1997. № 3. С. 78.
18. Володин А. П. Новое в сканирующей микроскопии // Приборы и техника эксперимента. 1998. № 6. С. 3.
19. Жданов Г. С., Либенсон М. Н., Марциновский Г. А. Оптика внутри дифракционного предела: принципы, результаты, проблемы // УФН. 1998. Т. 168. № 7. С. 801.
20. Persson B. N. J. Sliding friction: physical principles and applications. Berlin: Springer. 1998.
21. Bhushan B. (ed). Handbook of Micro/Nanotribology. Boca Raton, FL: CRC Press. 1999.
22. Majumdar A. Scanning thermal microscopy // Annu. Rev. Mater. Sci. 1999. V. 29. P. 505.

23. Cappella B., Dietler G. Force — distance curves by atomic microscopy // Surface Sci. Rep. 1999. V. 34. P. 1.
 24. Яминский И. В., Тишин А. Н. Сканирующая магнитно-силовая микроскопия // Успехи химии. 1999. V. 68. N 3. P. 165.
 25. Арутюнов П. А., Толстихина А. Л. Атомно-силовая микроскопия в задачах проектирования приборов микро- и наноэлектроники // Часть 1. Микроэлектроника. 1999. Т. 28. № 6. С. 405; Часть 2. 2000. Т. 29. № 1. С. 13.
 26. Быков В. А. Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 21.
 27. Dedkov G. V. Experimental and theoretical aspects of the modern nanotribology // Phys. stat. solidi. 2000. V. (a) 179. N 1. P. 3.
 28. Дедков Г. В. Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели // УФН. 2000. Т. 170. № 6. С. 585.
 29. Bonnell D. A. Probe microscopy and spectroscopy: theory, techniques and applications. Wiley: N. Y. 2000.
 30. Рыков С. А. Сканирующая зондовая микроскопия полупроводниковых материалов и наноструктур. СПб.: Наука, 2001. 53 с.
 31. Drakowa D. Theoretical modeling of scanning tunneling microscopy, scanning tunneling spectroscopy and atomic force microscopy // Rep. Prog. Phys. 2002. V. 64. P. 205.
 32. Morita S. R., Wiesendanger, and Meyer (eds.). Noncontact atomic force microscopy. Berlin: Springer. 2002.
 33. Дедков Г. В., Ясов А. А. Электромагнитное и флуктуационно-электромагнитное взаимодействие движущихся частиц

и нанозондов с поверхностями. Нерелятивистское рассмотрение (Обзор) // Физика твердого тела / 2002. Т. 44. № 10. С. 1729.
 34. Krim J. Resource Letter: FMMLS-1: Friction at macroscopic and microscopic length scales // Am. J. Phys. 2002. V. 70. N 9. P. 890.
 35. Hofer W. A., Foster A. S., Schluger A. L. Theories of scanning probe microscopes at the atomic scale // Rev. Mod. Phys. 2003. V. 75. P. 1287.
 36. Giessibl F. J. Advances in atomic force microscopy // Rev. Mod. Phys. 2003. V. 75. P. 949.
 37. Бахтизин Р. З., Галлямов Р. Р. Физические основы сканирующей зондовой микроскопии. Уфа: РИО Баш. ГУ. 2003. 82 с.
 38. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004. 143 с.
 39. Неволин В. К. Зондовые нанотехнологии в электронике. М.: Техносфера, 2005. 152 с.
 40. Israelachvili J. N. Intermolecular and surface forces. London. Acad. Press. 1992.
 41. Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Статистическая физика. Часть 2. М.: Физматлит, 2002. 493 с.
 42. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. М.: Физматлит, 2001. 257 с.
 43. Яминский И. В., Еленский В. Г. Сканирующая зондовая микроскопия: Библиография (1982—1997). М.: Научный мир. Серия Сканирующая зондовая микроскопия. Вып. 2. 1997.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

УДК 621.382.002

М. В. Бутыгская,
ОАО "НИИМЭ и Микрон",
Ю. С. Петролюк, канд. техн. наук,
Институт биохимической физики РАН

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ МИКРОСКОПИЯ КАК ВОЗМОЖНЫЙ ИНСТРУМЕНТ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЯ ПЛАСТИН В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТРУКТУР "КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ"

Описана ультразвуковая (УЗ) система визуализации высокого разрешения, привлекающая благодаря возможности наблюдать микроструктуру в объеме непрозрачных объектов и измерять упругие, вязкие и релаксационные свойства малых областей и включений. Представлены результаты контроля соединенных подложек, которые в дальнейшем будут формировать структуру "кремний-на-изоляторе" (КНИ).

Широкое применение в современных технологиях нано- и микроструктурированных материалов, прежде всего композитов, привело к существ-

венному повышению требований на пространственное разрешение диагностической и измерительной аппаратуры. Для контроля и исследования подобных материалов обычные методы ультразвукового (УЗ) неразрушающего контроля выгодно заменять техникой УЗ визуализации высокого разрешения. Улучшения разрешения в этом случае добиваются за счет применения фокусированного ультразвука. Ультразвуковые системы визуализации высокого разрешения привлекательны благодаря возможности наблюдать микроструктуру в объеме непрозрачных объектов и измерять упругие, вязкие и релаксационные свойства малых областей и включений.

Принципы визуализации высокого разрешения

Фокусированный пучок создается в иммерсионной жидкости ультразвуковой фокусирующей системой — акустической линзой или фокусирующим излучателем (рис. 1).

Акустическая линза представляет собой звукопровод, сделанный из материала с достаточно высокой скоростью распространения продольного звука (кварц). На одном из торцов звукопровода имеется сферическое углубление. Вогнутая сферическая поверхность является преломляющей — она собирает в иммерсионной жидкости падающее излучение. Ультразвук возбуждается пьезопреобразователем, нанесенным на другой конец звукопро-

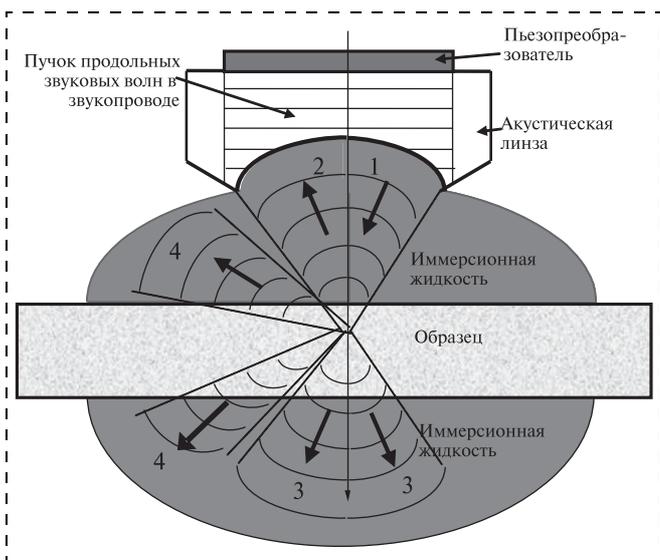


Рис. 1. Схема взаимодействия фокусированного ультразвукового пучка с объектом:

1 — фокусированный пучок; 2 — отраженный пучок; 3 — прошедшее излучение; 4 — рассеянное или дифрагированное излучение

вода. Падающее излучение преломляется на сферической поверхности.

Пространственная структура зондирующего пучка задается угловой апертурой θ_m . Особое значение имеет фокальная область сходящегося пучка, которая характеризуется радиусом a фокальной перетяжки (радиусом ультразвукового пятна) и длиной фокальной перетяжки b (рис. 2).

Радиус фокальной перетяжки a определяет латеральное разрешение; длина b дает глубину резкости при фиксированном положении акустической линзы над объектом. С величиной b связана и предельная глубина (толщина), на которую воз-

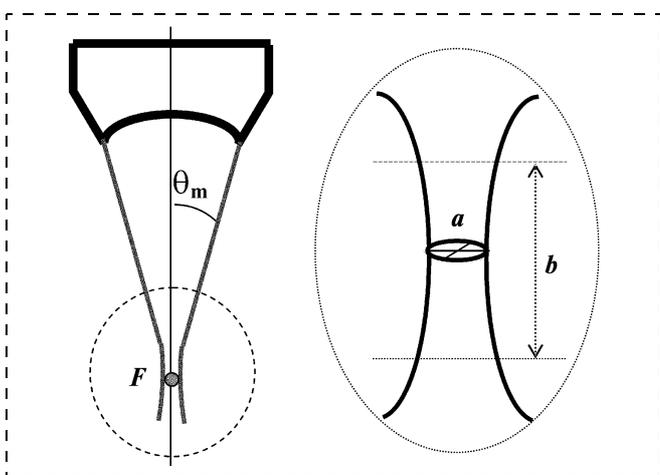


Рис. 2. Пространственная структура фокальной области фокусированного ультразвукового пучка с угловой апертурой $2\theta_m$:

a — диаметр фокального пятна; b — длина фокальной перетяжки

можно визуализация объекта. С увеличением угловой апертуры θ_m увеличивается латеральное разрешение — уменьшается радиус ультразвукового пятна a ; одновременно уменьшается длина b фокальной перетяжки — падает глубина проникновения зондирующего излучения в объект и уменьшается глубина резкости. Уменьшение a и b с ростом угловой апертуры θ_m происходит по разным законам:

$$a = 0,61\lambda/\sin\theta_m \approx 0,6\lambda/\theta_m;$$

$$b = 2\lambda/(1 - \cos\theta_m) \approx 4\lambda/\theta_m^2.$$

Для визуализации микроструктуры в объеме исследуемого объекта используются фокусированные пучки с небольшой угловой апертурой $\theta_m = 8^\circ \div 20^\circ$, обладающие достаточно хорошим латеральным разрешением

$$a \sim (2 \div 3)\lambda$$

и значительной длиной фокуса

$$b \sim (35 \div 150)\lambda.$$

Здесь λ обозначает длину волны зондирующего звука в иммерсионной жидкости. Такие пучки с успехом используются на частотах 25—50 МГц для получения акустических изображений на глубину до 1,5—2 см, а также для измерения локальных значений звуковых скоростей и упругих модулей исследуемого материала.

В сканирующем акустическом микроскопе изображение возникает как отображение совокупности сигналов, принимаемых после взаимодействия фокусированного ультразвукового пучка с исследуемым объектом в различных точках поверхности или объема объекта. Вариации параметров сигнала (амплитуды, фазы, времени прибытия сигнала), связанные с локальными значениями акустических параметров образца (плотностью, упругостью, вязкостью) и его геометрией, определяют структуру и контраст акустического изображения. Параметры принятого сигнала (амплитуда, фаза, время прибытия и т. д.) измеряются и запоминаются в памяти процессора вместе с координатой точки, в которой измерение проводилось. Взаимное положение линзовой системы и образца меняется за счет механического сканирования, и процесс повторяется в следующей точке. Собранный массив данных отображается на экране дисплея в виде акустического изображения.

Основным типом акустических микроскопов, используемых на практике, в настоящее время являются акустические микроскопы на отражение.

Положение и толщина плоскости изображения контролируются электронным образом с помощью системы управляющих электронных ключей (так называемых электронных ворот), с помощью кото-

рых и осуществляется прием эхоимпульсов с заданной глубины в объеме образца. Идеальное разрешение по глубине получается при использовании зондирующего моноимпульса длительностью в один или два полупериода.

В отражательной акустической микроскопии для исследования структуры и свойств материалов используются различные режимы работы микроскопа — осциллограммы отраженного сигнала (А-сканы), а также акустические изображения в виде В- и С-сканов.

А-сканирование

При акустической визуализации эхограммы (А-сканы, рис. 3) используются для управления процессом формирования акустических изображений — с помощью электронных ворот выделяются эхоимпульсы, отраженные на определенной глубине внутри объекта.

На рис. 3 приведена типичная осциллограмма отраженного сигнала, содержащая полный набор эхоимпульсов 1-го порядка отражения и даже импульс 2L отражения 2-го порядка. В качестве объекта используется стеклянная пластинка толщиной 2,6 мм. На осциллограмме показаны все измеряемые временные интервалы.

Схема отражения сходящегося пучка от плоскопараллельного объекта с учетом конверсии мод на границах объекта показана на рис. 4.

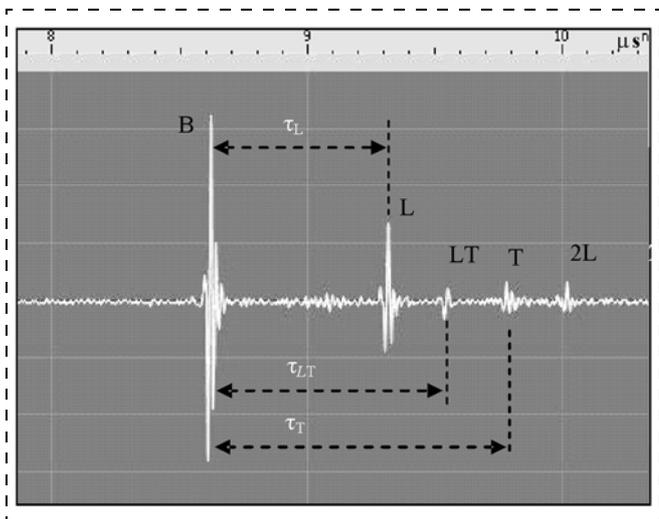


Рис. 3. Типичная эхограмма (А-скан для стеклянной пластинки толщиной $d = 2,6$ мм):

В — эхосигнал от передней грани пластинки; L — эхосигнал от задней поверхности, образованный продольной волной в пластинке; LT — эхосигнал от задней поверхности за счет смешанного распространения продольной и поперечной волны в пластинке; Т — эхосигнал от задней поверхности, образованный поперечной волной; 2L — эхосигнал от задней поверхности пластики за счет двойного пробега продольной волной через пластинку

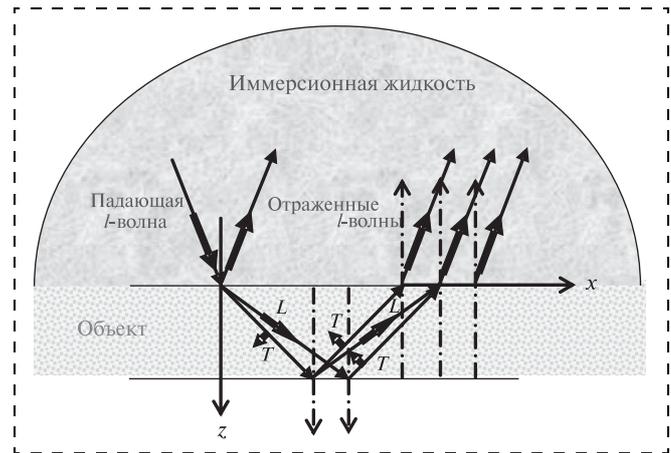


Рис. 4. Схема отражения сходящегося пучка от плоскопараллельного объекта с учетом конверсии мод на границах объекта;

В, L, LT, Т — продольные волны в жидкости (l-волны), возникающие в результате отражения зондирующего пучка от передней и задней стенок образца (только отражения 1-го порядка)

С-сканирование

Двухмерное механическое сканирование линзовой системы позволяет получать акустические изображения (полутонные или в условных цветах) структур на разных глубинах внутри объекта (режим С-сканирования). Характерный С-скан приводится на рис. 5. В данном случае акустическая микроскопия использовалась для неразрушающего контроля соединенных пластин кремния на этапе формирования КНИ-структуры — определялась

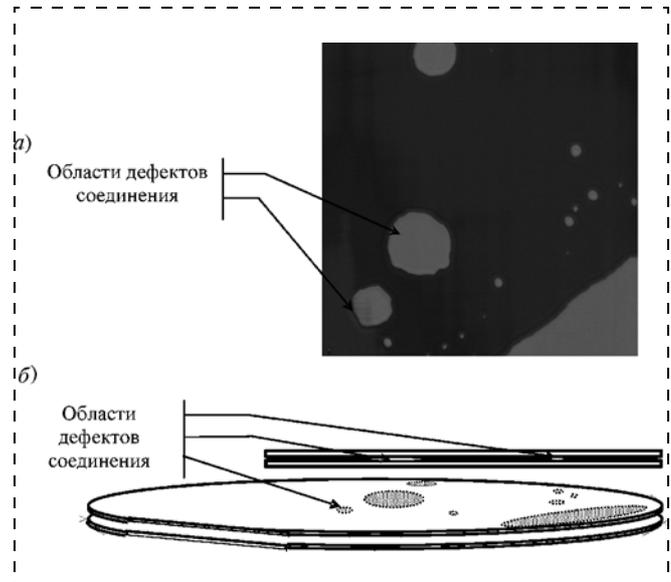


Рис. 5. Акустическое изображение (С-скан):

области соединения двух кремневых пластин: а — акустическое изображение области соединения (темные области на изображении соответствуют зонам контакта, белые пятна внутри темной области соответствуют дефектам в зоне соединения); б — схематическое изображение объекта контроля

степень дефектности в области диффузионного контакта двух кремниевых пластин.

В-сканирование

При одномерном сканировании линзовой системы сигналы, принятые с различной глубины, образуют акустическое изображение поперечного сечения объекта плоскостью, перпендикулярной к его передней поверхности (режим В-сканирования). По оси абсцисс на В-сканах откладывается пространственная координата вдоль направления сканирования, по оси ординат — время пробега пробного импульса до препятствия и обратно. В-сканы представляют собой пространственную развертку эхограмм вдоль направления одномерного сканирования акустического объектива и не являются в полном смысле слова акустическими изображениями поперечных сечений образца. Они состоят из пространственных траекторий эхосигналов и могут включать траектории не только при

отражении пробного сигнала от задней стенки объекта, но и при отражении от элементов внутренней структуры, в том числе и от дефектов. Кроме того, возможно наблюдение на В-сканах резких изломов и прыжков или, наоборот, постепенных искривлений траекторий эхосигналов даже для плоскопараллельных образцов, обусловленных резкими или, соответственно, плавными градиентными изменениями упругих свойств исследуемого материала. Дефекты отображаются на акустическом изображении в виде светлых траекторий сигналов, отраженных от этих дефектов.

Анализ снимков, полученных на соединенных кремниевых подложках, которые в дальнейшем будут формировать структуру "кремний-на-изоляторе" в режиме С-сканирования, дает возможность сделать вывод, что с помощью УЗМ можно проводить контроль, позволяющий выявить соединенные и несоединенные области на границе раздела двух кремниевых пластин.

УДК 678.747:621.317

М. И. Самойлович, д-р физ.-мат. наук,

А. Ф. Беянин, д-р техн. наук,

Центральный научно-исследовательский технологический институт "Техномаш"

E-mail: samoylovich@technomash.ru

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК АЛМАЗОПОДОБНЫХ МАТЕРИАЛОВ.

Часть 2*

Формирование пленок алмазоподобных материалов, получаемых плазменными методами, происходит в условиях потери морфологической устойчивости гранных форм роста. Нарушение когерентности для таких твердотельных систем может осуществляться различными релаксационными механизмами, что обусловлено возможностью снижать суммарную энергию за счет выбора внутренней подструктуры, взаимного расположения когерентных фаз и оптимизации их морфологических форм. Методы распыления, особенно магнетронного, незаменимы при необходимости формирования наноструктурированных пленок на больших площадях подложек из аморфных и поликристаллических материалов.

Строение пленок алмазоподобного углерода, полученных магнетронным методом и распылением графитовой мишени ионным пучком

Пленки алмазоподобного углерода, формируемые магнетронным

распылением, рентгеноаморфны и обладают малой твердостью, но пленки, наиболее близкие по физико-механическим свойствам к алмазу, были получены в газовой смеси Ag + H₂ при концентрации Ag 5...20 об. %. При концентрации Ag в газовой смеси >10 об. % в осаждаемых магнетронным

распылением пленках образовывалась графитовая фаза. Удельное электрическое сопротивление алмазоподобных углеродных пленок, полученных в широком диапазоне параметров процесса, составляло $\rho > 10^9$ Ом·см, а теплопроводность $\lambda_T \approx 300$ Вт/(м·К).

Было изучено строение пленок алмазоподобного углерода, полученных распылением графитовой мишени ионным пучком [11]. Пленки, сформированные распылением графитовой мишени ионным пучком, содержат до 10 об. % алмазной фазы (рис. 1, а), а их поверхность имеет глобулярное строение (атомно-силовой микроскоп Nanoscope 3) (рис. 1, б). При толщине пленки 50 нм поверхностный размер глобул составляет ~50 нм, а высота ~5 нм.

Содержание неалмазной фазы углерода в пленках определяли спектроскопией КР, при этом использовалась линия 488 нм Ar-лазера (спектрометр Т6400ТА). На спектрах КР пленок, полученных в широком диапазоне параметров одностадийного (осажде-

* Часть 1 статьи опубликована в № 7, 2006 г.

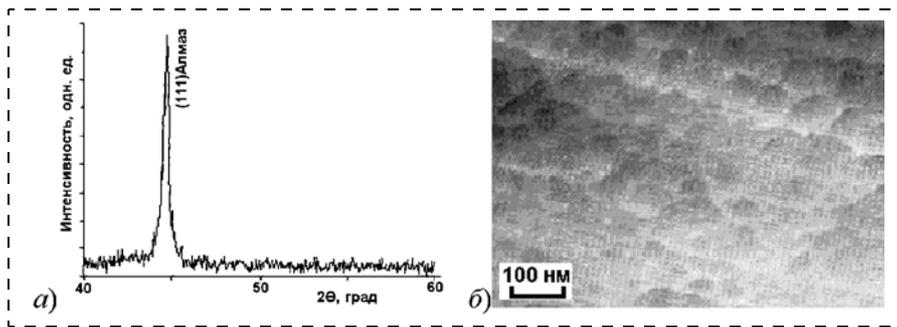


Рис. 1. Строение углеродных пленок, сформированных распылением графитовой мишени ионным пучком:
 а — рентгеновская дифрактограмма (CuK_α -излучение); б — атомно-силовая микроскопия поверхности

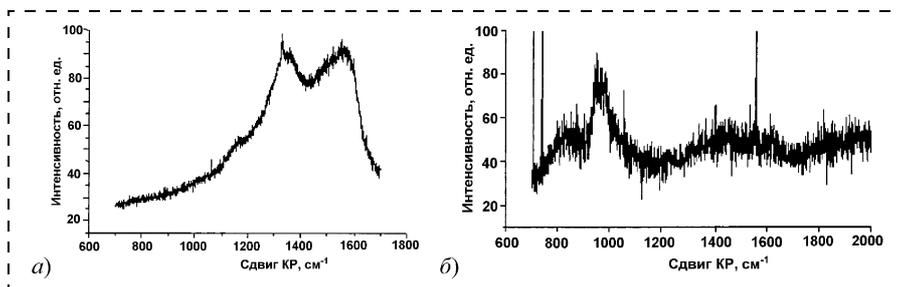


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния углеродных пленок, сформированных методами:
 а — распылением графитовой мишени ионным пучком (толщина пленки $h = 6$ мкм); б — распылением графитовой мишени ионным пучком и обработкой пленки пучком электронов ($h = 50$ нм)

ние пленки распылением графитовой мишени ионным пучком) и двухстадийного (осаждение пленки распылением графитовой мишени ионным пучком с последующей бомбардировкой пленки пучком электронов) процессов, имеются два пика — узкий в области 1330 см^{-1} , соответствующий алмазу, и широкий в области 1580 см^{-1} , соответствующий некристаллической углеродной фазе (рис. 2, а). При определенных условиях воздействия электронного пучка в углеродных пленках происходит кристаллизация карбина, а также формируются углеродные пленки, не содержащие алмазной фазы (полосы в областях 1140 и 1470 см^{-1}) (рис. 2, б).

Строение поликластерных пленок алмаза, полученных дуговым разрядом

Поток пленкообразующих кластеров может быть сформирован и без распыления мише-

ни, например, при формировании пленок на основе углерода методом дугового разряда [12, 13]. Осаждение пленок проводилось из активированной дуговым разрядом газовой смеси, состоящей из (1,5...4) об. % CH_4 и (96...98,5) об. % H_2 при давлении $>10^3$ Па. Температура подложек (температура кристаллизации) составляла 873...1473 К. Поликластерные пленки алмаза и алмазоподобного углерода осаждали на подложках из $\text{Si}\{111\}$, $\{100\}$; W, Mo, Ti, Cu. Методом дугового разряда со скоростью осаждения до 40 мкм/ч получены пленки алмаза толщиной до 200 мкм, для чего использовались промышленные и лабораторные (АЛМАЗ, УВА-1РМ и др.) установки дугового разряда.

Изменяя параметры процесса осаждения, можно в широких пределах менять концентрацию алмазной фазы в формируемых пленках (от 0 для пленок алмазо-

подобного углерода до ~99 об. %). Углеродная пленка — система на основе углерода, представленная различными кластерами (включая неалмазоподобные) на основе sp^3 и sp^2 -гибридизации. Полученные рентгеноаморфные пленки не являются только алмазоподобным углеродом, а представляют смесь алмазоподобного углерода и нанокристаллической фазы алмаза с размером кристаллитов или областей когерентного рассеяния рентгеновского излучения (ОКР) < 1 нм. Поликристаллическая алмазная пленка — поликристаллическая система, представленная кристаллитами алмаза. Алмазоподобная углеродная пленка — система на основе углерода, представленная алмазоподобными кластерами в отсутствии дальнего порядка. Микротвердость полученных слоев достигает 9500 кг/мм^2 , теплопроводность при 303 К составляет 400...600 Вт/(м·К), удельное электрическое сопротивление $10^{13} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Образование поликластерной пленки алмаза происходит в присутствии атомарного водорода, необходимого для взаимодействия с формирующимися на подложке неалмазными формами углерода и удаления их с поверхности растущей пленки. Концентрация атомарного водорода зависит от эффективности активатора газовой фазы, под воздействием которого происходит диссоциация молекулярного водорода, играющего роль растворителя неалмазной фазы. Скорость формирования алмазной фазы зависит от давления газовой смеси, концентрации метана, температур кристаллизации и активатора газовой фазы, а также наличия и концентрации затравочных микрочастиц алмаза.

Методом растровой электронной микроскопии изучена температурная зависимость морфологии ростовой поверхности и строение поперечных сколов поликластер-

ных пленок алмаза. Установлена последовательность стадий образования слоев: I — глобулярная; II — образования граней {100} на глобулах; III — геометрического отбора, первичной аксиальной текстуры <100>; IV— вторичных конических текстур <110> и <111>. Последовательность стадий одинакова для разных температур и методов активации газовой фазы, но в зависимости от температуры формирования стадии получают неодинаковое развитие. Например, в низкотемпературной области (до 1100 К) процесс ограничивается глобулярной стадией, а в высокотемпературной области (>1300 К) глобулярная стадия и первичная аксиальная текстура <100> быстро завершаются. Образование поликластерной пленки алмаза на стадии глобулярного формирования (рис. 3, температурный интервал до ~1130 К) отличается наименьшей скоростью (<2 мкм/ч) и возможно во всем интервале температур получения поликластерной пленки алмаза (873...1473 К). Толщина слоя фазы глобулярного строения может изменяться от десятков нанометров до десятков микрометров в зависимости от условий получения. У поликластерной пленки алмаза глобулярного строения наблюдается высокая концентрация рентгеноаморфной фазы (до 100 об. %). Наличие рентгеноаморфной фазы характерно для всех полученных поликластерных пленок алмаза, при этом ее содержание

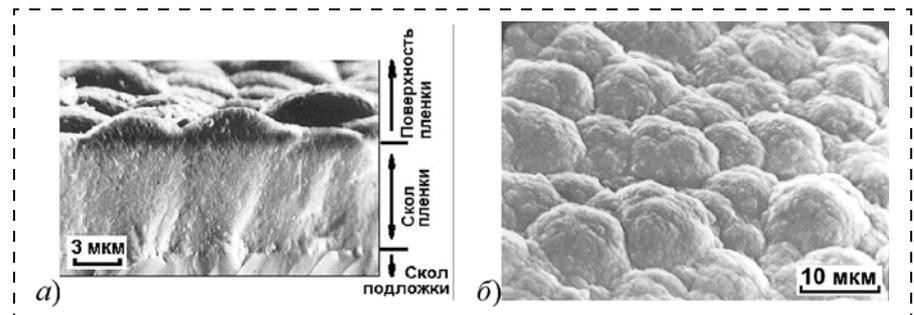


Рис. 3. Стрoение (РЭМ) скола (а) и поверхности (б) поликластерной пленки алмаза на стадии глобулярного формирования

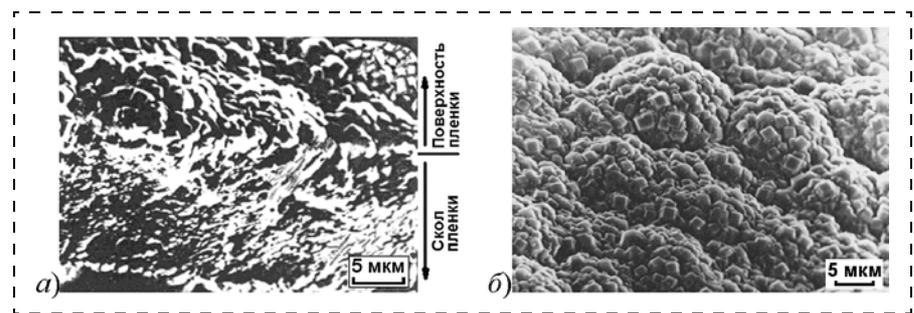


Рис. 4. Стрoение (РЭМ) скола (а) и поверхности (б) поликластерной пленки алмаза на стадии образования элементов огранки {100} на глобулах

уменьшается с ростом температуры подложки.

На глобулярной поверхности с увеличением толщины слоя образуется разветвленная система входящих углов по границам полусфер, способствующая повышению скорости формирования при тех же условиях, что проявляется в огрублении строения глобул, покрытии их многочисленными гранями {100} (рис. 4, температурный интервал 1130...1180 К). Образование многочисленных мелких граней {100} на сферических поверхностях неизбежно приводит к проявлению извест-

ного для кристаллов принципа Гросс—Меллера — естественному отбору и последующему укрупнению кристаллитов, грани {100} которых почти параллельны поверхности пленки (рис. 5, температурный интервал 1200...1300 К), что объясняет и наблюдаемое текстурирование кристаллитов на последующих этапах образования.

При определенной толщине слоя, зависящей от условий процесса осаждения, заканчивается формирование аксиальной текстуры <100>. В указанном случае для поддержания высокой скоро-

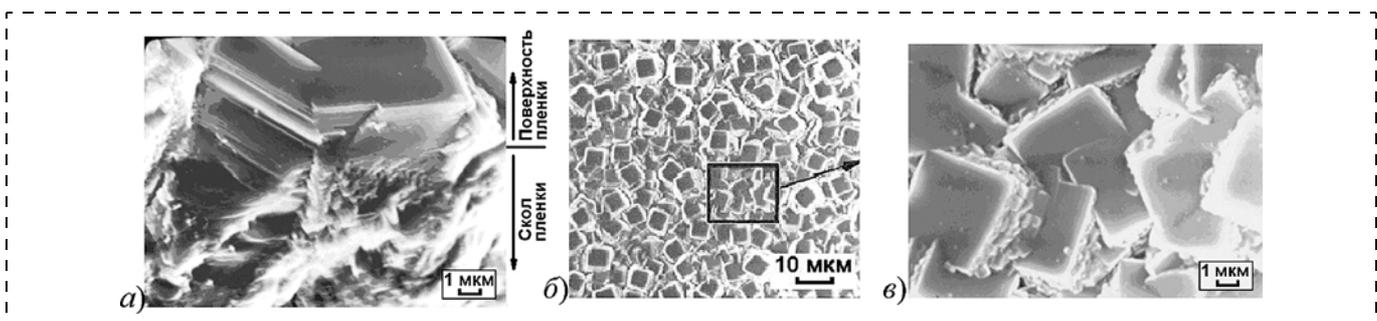


Рис. 5. Стрoение (РЭМ) скола (а) и поверхности (б, в) поликластерной пленки алмаза на стадии геометрического отбора и первичной аксиальной текстуры <100>

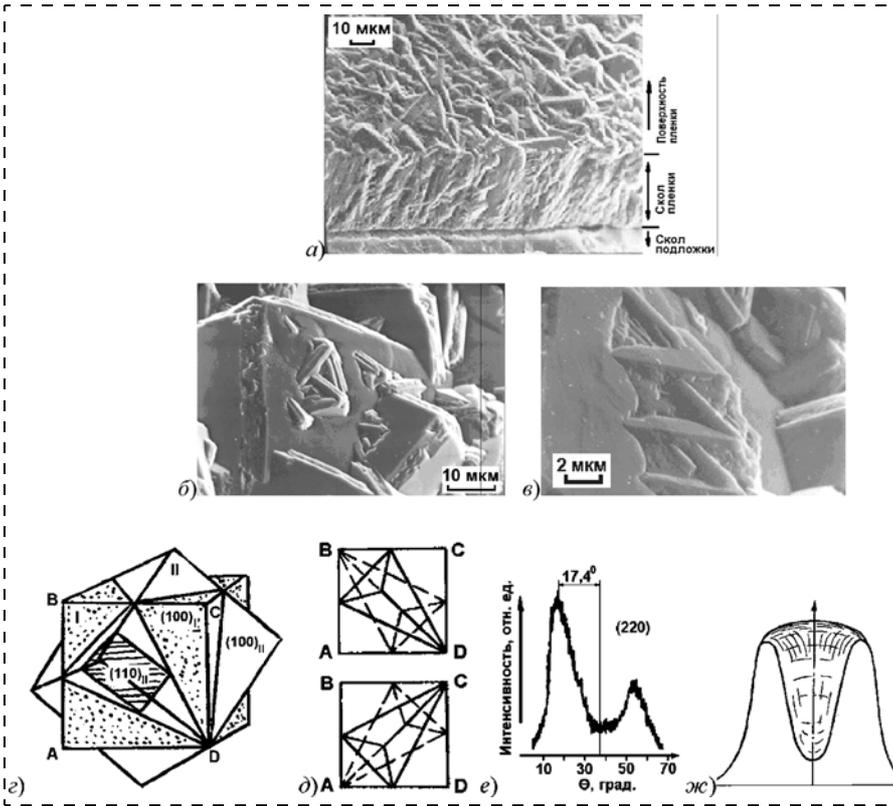


Рис. 6. Строение (РЭМ) скола (а) и поверхности (б, в) поликластерной пленки алмаза на стадии образования конических текстур $\langle 110 \rangle_{II}$ и $\langle 111 \rangle_{II}$ и двойникование по шпинелевому закону (г, д), рентгеновская дифрактограмма качания отражения (220) поликластерной пленки алмаза толщиной 198 мкм (е), схематическое изображение поверхности, образованной выходами осей текстуры кристаллитов поликластерной пленки алмаза (ж)

сти формирования пленки образуются многочисленные входящие углы за счет двойникования на поверхности пластин $\{100\}$ (рис. 6, а–в, температурный интервал 1300...1470 К). Наблюдаемое на гранях $\{100\}$ двойникование по шпинелевому закону (рис. 6, г) позволяет объяснить образование вторичной конической тек-

стуры $\langle 110 \rangle$ на аксиальной текстуре $\langle 100 \rangle$ многократным (четырёхкратным) двойникованием на каждой грани $\{100\}$ (рис. 6, д). Изучение рентгеновских дифрактограмм качания рефлекса (220) показало образование конической текстуры $\langle 110 \rangle$ (угол полураствора $17,4^\circ$) (рис. 6, е). Плоскость $\{110\}_{II}$, притупляющая реб-

ро $\langle 100 \rangle_{II}$ сдвойниковогоанного куба II, образует с исходной гранью куба I угол $19,5^\circ$ (рис. 6, з), близкий к углу полураствора конической текстуры $\langle 110 \rangle$. С увеличением толщины поликластерных пленок алмаза, сформированных на стадии массового двойникования, происходит укрупнение зерен (рис. 7). Анализ полированной поверхности (рис. 8, а) показал отсутствие пористости в объеме пленок и, после снятия слоя, большего, чем значение неоднородности рельефа, получается гладкая поверхность (перепад высот рельефа слоя $R_z \approx 0,025$ мкм).

Повторное многократное двойникование приводит к развитию рельефа, образованию конической текстуры $\langle 111 \rangle$ и коробчатых форм роста (рис. 8, б, в, температурный интервал >1470 К — стадия V). Интенсивность рефлексов фазы алмаза на рентгенограммах (рис. 9, а) не дает полной информации о концентрации кристаллической фазы, так как формируются конические текстуры, выявляемые по рентгенограммам качания (рис. 9, б, в). Электронограммы и рентгенограммы, снятые с поликластерной пленки алмаза, показывают наличие текстуры, при этом тип формирующейся текстуры не зависит от материала и кристаллографической ориентации подложки.

Была установлена связь между увеличением толщины и после-

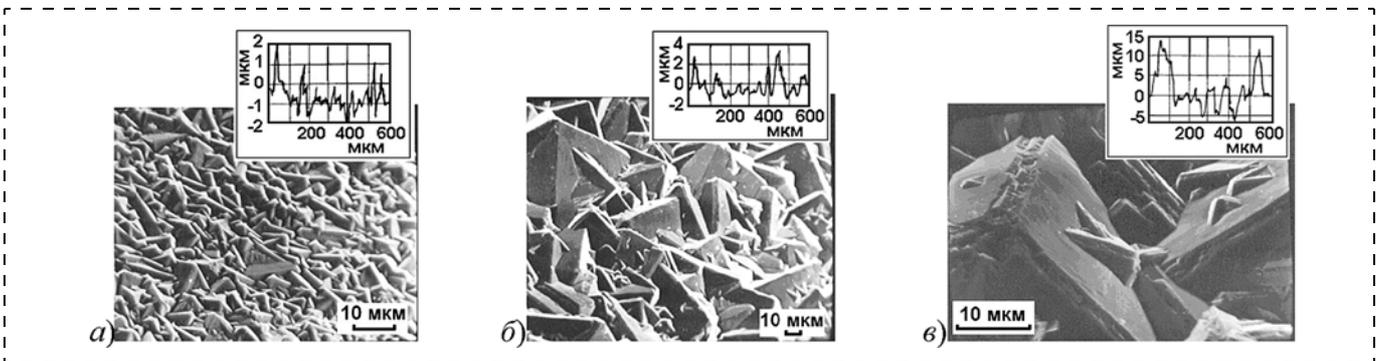


Рис. 7. Морфология поверхности поликластерных пленок алмаза, полученных методом дугового разряда (РЭМ) при толщине пленок: а — 25 мкм; б — 50 мкм; в — 198 мкм. На врезках представлены профилограммы поверхности таких пленок

довательностью развития конических текстур $\langle 110 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ для поликластерной пленки алмаза, полученной при температуре подложки 1320 К. Зависимость отношения интенсивностей отражений (220) и (111) ($I_{(220)}$ и $I_{(111)}$) от толщины слоя, построенная по данным дифрактограмм качания (рис. 9, б, в), показывает, что при толщинах слоев 60...200 мкм, отношение $I_{(220)}/I_{(111)}$ остается неизменным (рис. 9, з). Таким образом, при толщине поликластерной пленки алмаза >60 мкм одновременно наблюдаются два типа конических текстур: $\langle 111 \rangle$ (угол полураствора конуса $8,3^\circ$) и $\langle 110 \rangle$ ($17,4^\circ$). Исходя из полученных данных, можно заключить, что после достижения стадии массового двойникования имело место ориентирование зерен по направлениям, близким к $\langle 553 \rangle$ и $\langle 221 \rangle$, перпендикулярным плоскости подложки.

Наблюдаемые на сколах поликластерной пленки алмаза зерна

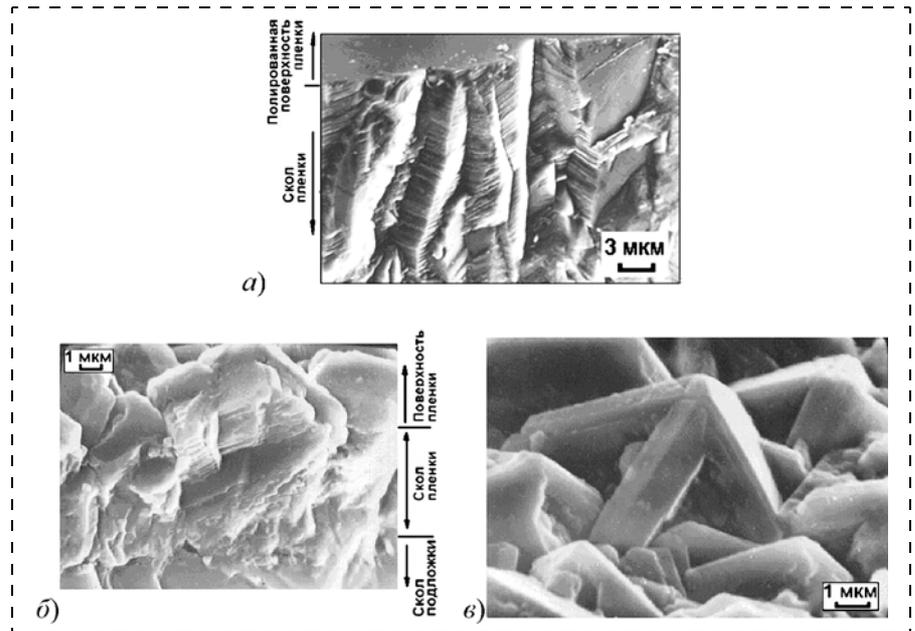


Рис. 8. Стрoение (РЭМ) скола и механически полированной поликластерной пленки алмаза, полученной на Si подложке и имеющей столбчато-слоистое строение (а) и строение (РЭМ) скола (б) и поверхности (в) поликластерной пленки алмаза на стадии многократного двойникования

имеют пластинчатое строение независимо от стадий их формирования (стадии образования граней на глобулах и массового двой-

никования) (рис. 10). Размер ОКР поликластерной пленки алмаза соответствовал толщине пластин, образующих зерна и наблюдае-

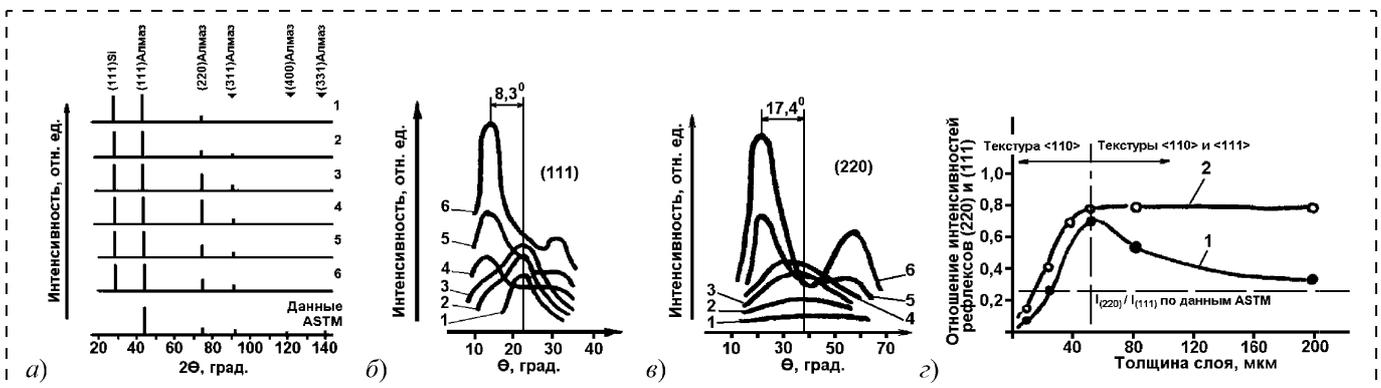


Рис. 9. Штрих-рентгенограммы поликластерных пленок алмаза разной толщины (а), дифрактограммы качания (б, в) отражений (220) и (111) пленок (номера кривых соответствуют следующим толщинам пленок: 1 – 9 мкм; 2 – 25 мкм; 3 – 42 мкм; 4 – 50 мкм; 5 – 82 мкм; 6 – 198 мкм). Отношение интенсивностей (з) рефлексов (220) и (111), измеренные по дифрактограммам (кривая 1) и дифрактограммам качания (кривая 2)

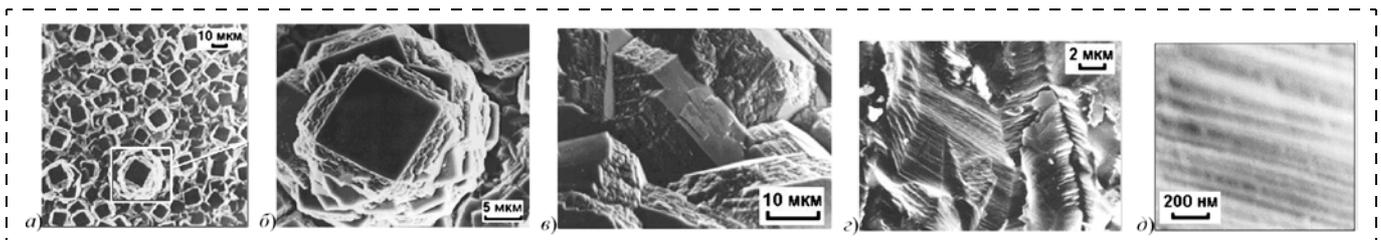


Рис. 10. Стрoение (РЭМ) поверхности и сколов поликластерных пленок алмаза, полученных на подложках из Si{111}: а–в – поверхность поликластерных пленок алмаза на стадиях формирования первичной аксиальной текстуры $\langle 100 \rangle$ и двойникования; г, д – поверхности скола поликластерной пленки алмаза на стадии двойникования

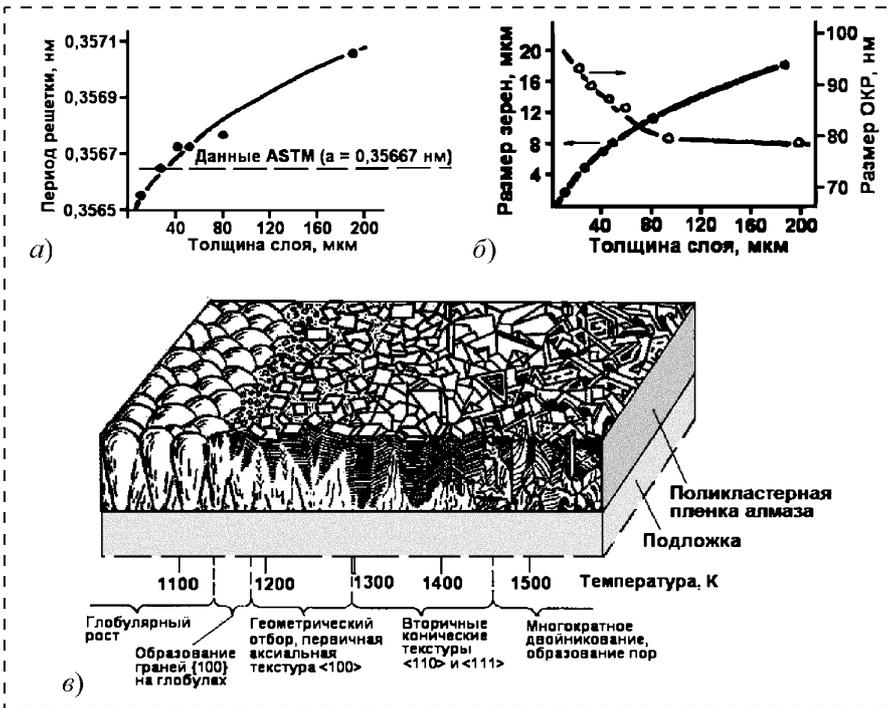


Рис. 11. Зависимости от толщины поликластерной пленки алмаза периода решетки кристаллической фазы (а), размеров зерен и областей когерентного рассеяния рентгеновского излучения (б) и температурные зависимости морфологии поверхности и скола поликластерной пленки алмаза (в)

мых с помощью электронного микроскопа.

Измеренный по отражению (220) период решетки поликластерной пленки алмаза, сформированной на подложке из поликристаллического W, зависел от толщины слоя и условий его получения и изменялся в пределах 0,3565...0,3571 нм (рис. 11, а). Отсутствие расщепления дублетов рефлексов алмаза указывает на механическую напряженность слоев, которая увеличивается с ростом толщины слоя, о чем свидетельствует наблюдаемое увеличение периода решетки. Видимый на поверхности пленки размер зерен, измеренный с использованием РЭМ, увеличивается с ростом толщины слоя (рис. 11, б). Размер ОКР уменьшается с увеличением толщины слоя до некоторого предела, после чего становится постоянным. Для поликластерных пленок алмаза, сформированных при температуре 1320 К, размер ОКР становится неизменным при толщине слоя больше

80 мкм (рис. 11, б). Представленные на рис. 11, а–в зависимости имеют важное значение для подбора условий синтеза поликластерных пленок алмаза с целью использования их в конкретных устройствах электронной техники. Охлаждение подложки в процессе осаждения пленки до температуры ≈ 1000 К после образования слоя при температуре подложки ≈ 1300 К (стадия формирования вторичных конических текстур <110> и <111>) приводит к возобновлению глобулярного формирования (рис. 12).

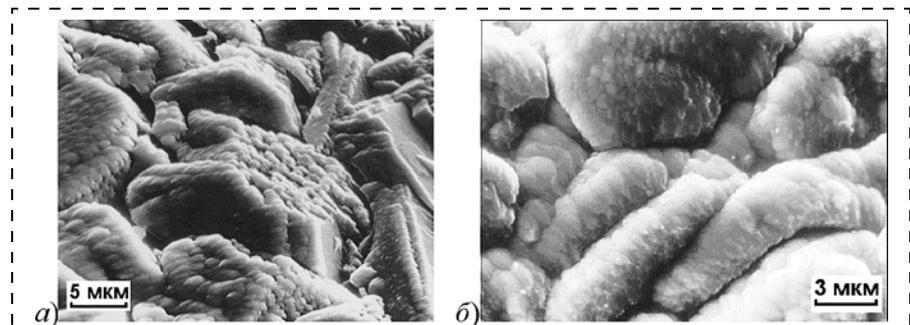


Рис. 12. Формирование на гранях кристаллитов алмаза участков глобулярного строения после изменения условий получения пленки (РЭМ)

Строение поликластерных пленок алмаза, сформированных методами тлеющего разряда и нагретой нити

Осаждение углеродных пленок проводилось из активированной тлеющим разрядом газовой смеси, состоящей из (1,5...4) об. % CH_4 и (96...98,5) об. % H_2 при давлении $> 10^3$ Па на подложках из Si при температуре 800...1300 К. Пленки, полученные методом тлеющего разряда, были рентгеноаморфными (размер ОКР < 1 нм). Рассмотренные в настоящей работе пленки получены методом тлеющего разряда при условиях, ограничивающих процесс стадий глобулярного роста. Методом электронной микроскопии показано, что пленки имеют гладкую поверхность ($R_z \leq 0,05$ мкм).

Осаждение поликластерных алмазных пленок методом нагретой нити проводилось в газовой смеси, содержащей 1,5 об. % CH_4 и 98,5 об. % H_2 , при давлении 3 кПа, расходе газа 5 л/ч, температурах активатора газовой фазы 2270 К и подложки 800...1300 К, при этом использовался активатор из W-проволоки диаметром 0,4 мм и длиной 400 мм. Для обеспечения однородности алмазной пленки по толщине и составу на рабочую поверхность подложек из Si и W наносили затравочные частицы из природного алмаза (порошок фракции 0/1 мкм). Получали поликластерные пленки алмаза толщиной до 55 мкм, которые формировались в течение 8...29 ч со скоростью 0,2...

2,0 мкм/ч, которая при 1020...1070 К имеет максимум и чье значение зависит от параметров процесса синтеза.

По отношению интенсивностей пиков спектров КР в области длин волн 1332 и 1530 см⁻¹ установлено, что степень кристалличности углеродных пленок, полученных методом нагретой нити, составляет >99 об. % (рис. 13, а, спектрометр U-1000, на врезке представлена форма пиков, полученная при работе с высоким разрешением). Установлено, что при температурах 800...1300 К с увеличением температуры концентрация рентгеноаморфных фаз углерода снижается. Поликластерные пленки алмаза, полученные методом нагретой нити, имели зернистое строение (видимый размер зерен ~10 мкм) с характерной огранкой зерен по {100} и {111} (рис. 13, б, РЭМ JSM-2). При использованных в работе условиях фазообразования морфология поверхности пленок была неизменной при всех толщинах. На рентгеновских дифрактограммах таких пленок наблюдались отражения (111), (220) и (311) алмаза, но все поликластерные пленки алмаза были аксиально текстурированы по направлениям <111> и <110>.

Известно, что водород активно влияет на электрические свойства легированного легкими элементами (например, бором или фосфором) алмаза, поэтому методом ИК спектроскопии было определено содержание связанного с углеродом водорода в полученных пленках. Для оценки концентрации атомов углерода, связанного с водородом, была разработана методика, использующая в качестве стандартов различные материалы (например — полипропилен) с известным числом метиленовых СН₂-групп. После снятия спектров стандартных материалов и алмазных пленок в одинаковых условиях (предполагая, что коэффициент экстинк-

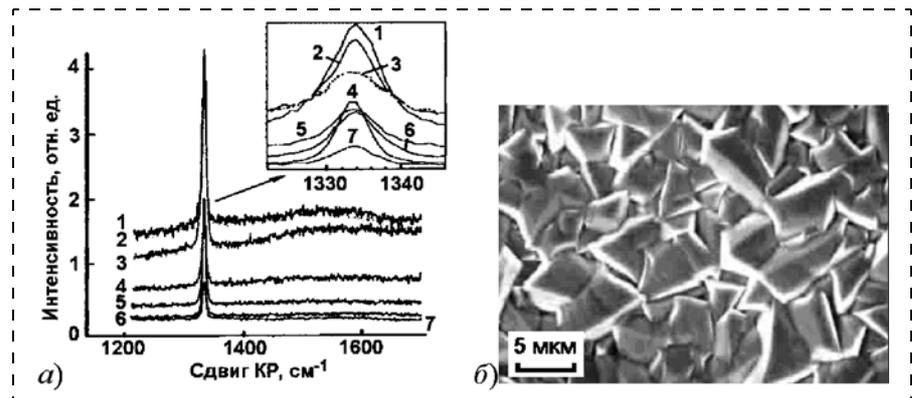


Рис. 13. Спектры комбинационного рассеяния углеродных пленок (а), полученных методом нагретой нити при различной температуре (1 — температура подложки $T_{\text{п}} = 1073$ К, толщина пленки $h = 10,9$ мкм; 2 — $T_{\text{п}} = 1198$ К, $h = 15,1$ мкм; 3 — $T_{\text{п}} = 1183$ К, $h = 33,7$ мкм; 4 — $T_{\text{п}} = 1123$ К, $h = 8,9$ мкм; 5 — $T_{\text{п}} = 1108$ К, $h = 6,4$ мкм; 6 — $T_{\text{п}} = 1173$ К, $h = 14,9$ мкм; 7 — $T_{\text{п}} = 1273$ К, $h = 5,5$ мкм) и строение (РЭМ) поверхности поликластерной пленки алмаза (б), полученной методом нагретой нити на Si-подложке при $T_{\text{п}} = 1170$ К, $h = 14,9$ мкм (скорость осаждения 0,62 мкм/ч)

ции для СН₂-групп одинаков) вычисляли концентрацию атомов углерода, связанных с водородом в метиленовые группы. Концентрация связанного водорода для различных пленок изменяется в пределах $(0,3...1,7) \cdot 10^{20}$ ат/см³.

Строение пленок алмазоподобного углерода, сформированных в диодном ВЧ разряде и методом плазменного ВЧ разряда, близкого к электронно-циклотронному резонансу

Алмазоподобные углеродные пленки различной толщины наносились на подложки из Si{111} диаметром 76 мм и стекла с размерами до 450 × 450 мм из газовой фазы (смеси циклогексана (C₆H₁₂) с H₂, O₂ и Ar) в диодном ВЧ разряде при давлении 0,1...1 Па и температуре 250...295 К. Энергии пленкообразующих частиц лежали в интервале 0...250 эВ. Со скоростью осаждения 0,8...1,0 мкм/ч получены пленки алмазоподобного углерода толщиной 0,2...6,0 мкм.

Полученные пленки были рентгеноаморфные, при этом относительная концентрация межатомных связей алмазного типа (sp^3) в этих пленках, по данным спектроскопии КР, составляла 90 %, а значения показателя преломления не выходили за преде-

лы 1,8...2,4. Рентгенофазовый анализ слоев алмазоподобного углерода, полученных из газовой смеси, содержащей кислород, показал наличие в пленках карбина в концентрации 13...55 об. %. При использовании Ar, а также при подаче электрического смещения на катод, в пленках всегда присутствовал SiC. При энергиях пленкообразующих кластеров ≥200 эВ пленки алмазоподобного углерода толщиной >2 мкм становятся непрозрачными. Для снижения механических напряжений и улучшения адгезии на межслойной границе создавались переходные (буферные) углеродные слои толщиной несколько нанометров, компенсирующие несоответствие структурных и физико-механических характеристик пленки и подложки. Создание промежуточных углеродных слоев осуществлялось за счет изменения концентрации компонентов газовой смеси.

При использовании метода осаждения в плазме ВЧ (13,56 МГц) разряда, близкого к электронно-циклотронному резонансу (ЭЦР), условия осаждения пленок алмазоподобного углерода следующие: рабочий газ — CH₄, мощность ВЧ разряда — 80 Вт; давление в камере — 50 Па; напряжение электрического смещения на

ВЧ электроде — 400 В; скорость осаждения составляла ~6 мкм/ч. Метод обеспечивает однородность пленки по толщине и по физико-химическим свойствам в пределах $\leq 2\%$ по поверхности подложки из Si диаметром 76 мм.

Пленки алмазоподобного углерода, полученные методом плазменного ВЧ разряда, близкого к ЭЦР, были сформированы на подложках из Si{100}. Поверхность пленок алмазоподобного углерода, исследованная на электронном микроскопе, состоит из бугорков размером 40...70 нм, при этом элементов огранки на поверхности и сколах пленок не обнаружено. Среднее арифметическое отклонение профиля ростовой поверхности (R_a) пленок алмазоподобного углерода толщиной 0,8 мкм, измеренное по профилограммам (рис. 14, а; профилограф-профилометр ALPHA-STEP 200), не превышает 5 нм на участке измерений 400 мкм подложки из Si диаметром 76 мм.

Фазовый состав и строение фаз, составляющих пленки, определялись по рентгеновским дифрактограммам ($\text{Cu } k_\alpha$ -излучение), полученным с пленок толщиной ~1 мкм, на которых наблюдались только дифракционные максимумы в области брэгговских углов $2\theta = 21,85...22,18^\circ$, $33,0...33,61^\circ$ и $44,83...45,27^\circ$ (рис. 14, б), соответствующие межплоскостным расстояниям d/n , равным 0,4066...0,4008 нм,

0,2714...0,2666 нм и 0,2022...0,2003 нм, отвечающим отражениям $(10\bar{1}3)$ чаюита, $(10\bar{1}1)$ SiC и $(20\bar{2}2)$ β -карбина (наложение рефлексов), а также (111) алмаза. Карбин является линейной модификацией углерода на основе *sp*-гибридизации углеродных атомов и обладает полупроводниковыми свойствами (ширина запрещенной зоны ~1 эВ). Наблюдался слой SiC, который образуется на границе раздела подложки и осаждаемой пленки.

Спектр КР (спектрометр S-3000), полученный от указанных пленок, характерен для АУП, а именно, имеет максимум вблизи 1580 см^{-1} и широкую полосу в области 1350 см^{-1} (рис. 14, в). По спектрам КР было установлено, что размер ОКР пленок составляет <4 нм. Таким образом, пленки алмазоподобного углерода, полученные методом плазменного ВЧ разряда, близкого к ЭЦР, представляют смесь различных фаз: рентгеноаморфной фазы алмазоподобного углерода и кристаллических фаз алмаза, чаюита и β -карбина. Степень кристалличности J достигает 10 об. %.

Обсуждение полученных экспериментальных результатов

Анизотропия скоростей формирования по различным направлениям особенно велика при образовании тонких пленок, поскольку искривления поверхности формирования ведут к возраста-

нию кинетических коэффициентов и, следовательно, к дальнейшему увеличению неоднородностей условий формирования для различных участков пленок. В совокупности такие процессы обуславливают лавинообразную потерю морфологической устойчивости плоских поверхностей (граней) для образующейся твердотельной системы. Если для кристаллов потеря устойчивости связана, как правило, с особенностями пересыщений в системе роста, при формировании пленок потеря морфологической устойчивости чаще всего имеет место на начальной стадии роста. Действительно, экспериментально установлено, что осаждение кластеров, образующихся вблизи поверхности осаждения при использовании плазменно-ионных методов или вакуумного распыления, неизбежно приводит к существенной неоднородности поверхности. Как правило, на начальной стадии такого морфологического вырожденного образования углы разориентировки волокон невелики, так что пленка не теряет сплошности. Дальнейшее ухудшение условий формирования, следовательно, продвижение на пути потери морфологической устойчивости, приводит к возрастанию разориентации волокон и в последующем к их пространственному (частичному или полному) разделению. Можно также предположить, что пла-

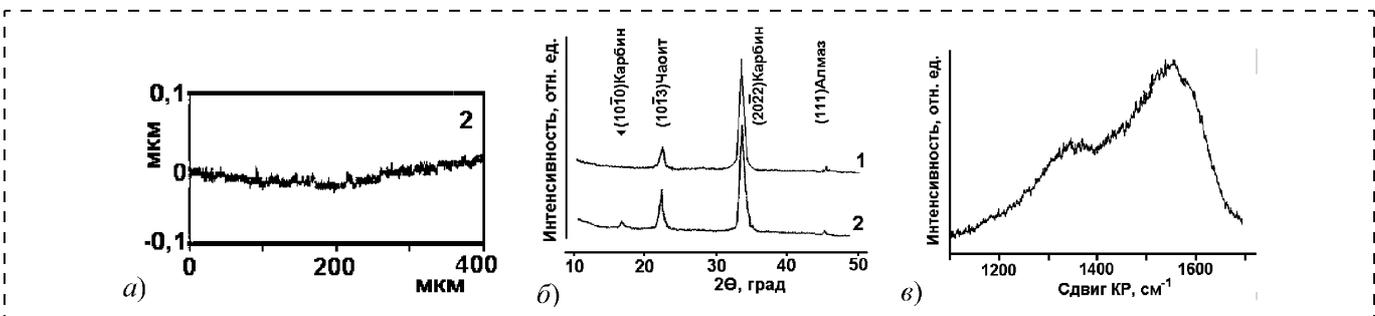


Рис. 14. Строение пленок алмазоподобного углерода, полученных на подложках из Si методом плазменного ВЧ-разряда, близкого к ЭЦР: а — профилограммы ростовой поверхности пленки толщиной 0,8 мкм; б — рентгеновские дифрактограммы ($\text{Cu } k_\alpha$ -излучение) пленок толщиной 1 мкм (1 — нелегированная пленка; 2 — пленка алмазоподобного углерода легирована цинком); в — спектр комбинационного рассеяния света

стинчатая структура материала пленки, характерная для определенных условий формирования, обусловлена не только особенностями упругих и неупругих полей, но и наличием своеобразной текстуры для волокон, когда их разориентации существенно анизотропные (монокстура), так что не возникает препятствий к группированию волокон в какой-то плоскости. При формировании пленок (поликластерных) алмаза, алмазоподобного углерода и других алмазоподобных материалов в условиях ионно-плазменных процессов (или при вакуумном испарении) именно такая картина и наблюдается. Последнее не удивительно, если принять во внимание, что образование таких пленок происходит, как правило, в области термодинамической или кинетической неустойчивости указанных фаз.

Нарушение когерентности твердотельной системы может осуществляться различными релаксационными механизмами, позволяющими снижать упругую и неупругую составляющие энергии за счет выбора внутренней структуры, взаимного расположения когерентных фаз и оптимизации их формы. Само по себе изменение механизмов сохранения когерентности приводит к "перекачке" объемной энергии в поверхностную (межфазную). Образование пластинчатых форм, имеющих полидоменное строение, будет предпочтительным, если снижение энергии макроскопических полей внутри такой системы преобладает над увеличением энергии за счет других слагаемых [3]. Хотя пластинчатая форма обеспечивает максимальную локализацию упругих полей, за исключением участков у краев пластины, минимизация интегральной энергии системы осуществляется за счет оптимальной ориентировки пластины (текстура) и за счет уменьшения относительной толщины пластины. По-

верхностная энергия "не позволяет" всей системе раскатываться в прослойку, но с уменьшением объема роль поверхностной энергии увеличивается [3], а следовательно, форма приближается к равновесной. Образование пластины, имеющих волокнисто-полидоменное строение, будет предпочтительно, если снижение энергии макроскопических полей внутри такой системы преобладает над увеличением энергии за счет других слагаемых. При распаде многокомпонентной (многофазной) системы на изоморфные компоненты (фазы) пластинчатость не обязательна и форма областей, определяемая минимумом поверхностной энергии, может приближаться к цилиндрической или равноосной (сфероподобной).

Процессы наноструктурирования представляют значительно более широкие возможности для сохранения когерентности межфазных границ, поэтому объяснение фазовых состояний в наноструктурах невозможно без рассмотрения стержневых (столбчатых) подструктур, имеющих в общем случае и некристаллографическую симметрию [14–16]. Появление экспериментальных данных о таких фазовых состояниях и структурах (главным образом, по результатам применения методик высокоразрешающей электронной микроскопии [15–17]) также свидетельствует о недостаточности кристаллографических групп для адекватного отображения симметрии таких систем.

Ранее было показано [18], что локальные упаковки одинаковых сфер в геликоидальные (стержневые) подструктуры (например, атомарных кластеров, чьи вершины многогранников расположены на сфере) возможны с плотностью плотнейших упаковок. Поэтому для описания некоторых кристаллических веществ (главным образом, сплавов и металлов или, например, материа-

лов со структурой типа граната), характеризующихся значительными искажениями (приводящими к большим значениям R -фактора, используется разбиение на стержневые подструктуры (например, для β -Mn [16]). Такой подход, приобрел дополнительную мотивацию после идентификации в небиологических структурах (для которых они хорошо известны) геликоидальных или стержневых подструктур, характеризующихся нецелочисленными осями [15,16]). Кроме того, появились основания считать такие оси своего рода аппроксимантами стандартных кристаллографических (винтовых, как правило) осей симметрии, имеющих место в кристаллических материалах. Например, стержневые подструктуры, характеризующиеся нецелочисленными осями $10/3$, $20/7$, могут рассматриваться как аппроксиманты оси порядка 3 , $15/4$ — порядка 4 , $25/4$ — порядка 6 (в числителе такой оси стоит число элементов, например молекул или полиэдров, а в знаменателе — полное число оборотов, подробнее в работах [15, 16]). Оказалось, что при формировании упорядоченных материалов (при определенных условиях) типа тонких пленок на начальных стадиях могут образовываться геликоидальные подструктуры (волокнистоподобные нанокластеры, характеризующиеся, возможно, нецелочисленными осями), которые на последующих стадиях формирования данного материала как кристалла преобразуются (из совокупности указанных стержней) в системы (кристаллиты), описываемые стандартными винтовыми осями симметрии, в соответствии с кристаллической структурой материала.

Таким образом, можно также предположить, что, по крайней мере, на начальных стадиях процесс формирования рассматриваемых пленок (а возможно, и эпитаксиальных) происходит

при участии промежуточных фаз в виде кластеров — стержневых подструктур, характеризующихся нецелочисленными осями, соотносящимися с винтовыми осями симметрии соответствующих алмазоподобных материалов. Косвенным подтверждением такого предположения является независимость ориентации стержневых и пластинчатых образований в таких материалах от структуры подложки, параллельность направлений осей волокон и винтовых осей, а также некоторые данные по изучению пленок методом высокоразрешающей электронной микроскопии (рентгеновские методы непригодны вследствие малости областей когерентного рассеивания для подобных образований).

Как нами ранее было показано [16], в общем случае необходимость перехода от федоровских групп к алгебраическим группам и алгебрам возникает при изучении симметрии упорядоченных некристаллических структур. Решение такой задачи возможно в рамках локального подхода, позволяющего, соответственно, закономерно описать разбиение твердотельной системы на подсистемы наноразмерного масштаба, в которых возникают и различные виды упорядочения. Симметрию таких систем отображают локальные группы, которые могут рассматриваться как некристаллографические группы преобразований. В конечном итоге применение алгебраических конструкций позволяет заменить требование трансляционной инвариантности необходимыми топологическими ограничениями, характерными для наносистем. Важнейшим из них является требование локальной минимальности поверхности, поскольку именно таким поверхностям отвечают решения физических уравнений для рассматриваемых (твердотельных) систем. Небезинтересным является реа-

лизация в неорганических и наноструктурированных твердотельных системах элементов симметрии, характерных для биологических объектов.

Соответствие геликоидальных (линейных) структур базовым алгебраическим конструкциям [16], концепция сборки кристаллов из стержней [18], существование многочисленных геликоидальных структур с некристаллографической симметрией [14—17] позволяют рассматривать образование упорядоченных структур в трехмерном евклидовом пространстве E^3 как возникновение стержневых подструктур и (если это возможно) их сборку в трехмерную структуру в форме волокнистых образований. Сами по себе данные по применению только методов рентгеновской дифракции, без использования высокоразрешающей электронной микроскопии не позволяют получить необходимую информацию об особенностях строения тонкопленочных структур в наноразмерном масштабе. Как следствие, имеет место некритическое использование таких терминов, как аморфная пленка (вместо рентгеноаморфная), кристалличность или монокристалльность (вместо поликристалличности или поликластерности) и, в общем случае, применение кристаллографических групп для описания наносистем, не подпадающих под определение кристаллических вследствие отсутствия в них трансляционной инвариантности, хотя бы из-за малых размеров (когда число атомов на поверхности становится сопоставимо с числом атомов в объеме). Начиная с размеров в несколько десятков, а тем более единиц, нанометров (а это стандартный размер ОКР в тонких пленках), как показывают данные по высокоразрешающей электронной микроскопии, строение таких областей в наносистемах не может быть охарактеризовано термином "ма-

ленький" кристалл. Можно предполагать, что наличие когерентных границ между фазами с различными точечными группами [16—18] по закономерностям, невозможным в кристаллических структурах, появление стержневых подструктур и других особенностей характерно для различных наноструктурированных твердотельных систем.

Заключение

Методы распыления, особенно магнетронные, незаменимы при необходимости формирования наноструктурированных пленок на больших площадях подложек из аморфных и поликристаллических, в частности, алмазоподобных материалов. Нарушение когерентности для твердотельных структур может осуществляться различными релаксационными механизмами, что обусловлено возможностью для таких систем снижать суммарную энергию за счет "выбора" внутренней подструктуры, взаимного расположения когерентных фаз и оптимизации их морфологических форм. При этом процессы наноструктурирования проявляются для тонких пленок, как в морфологически особых формах, в частности, в виде их волокнистого строения (при сохранении или потери когерентности для различных участков пленок), так и в определенных способах оптимизации интегральной энергии таких систем.

Список литературы

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. М.: Наука, 1964. 567 с.
2. Чернов А. А. Теория устойчивости гранных форм роста кристаллов // Кристаллография. 1971. Т. 16. Вып. 4. С. 842—863.
3. Ройтбурд А. Л. Особенности развития фазовых превращений в кристаллах // Проблемы современной кристаллографии. М.: Наука, 1975. С. 245—369.
4. Синтез минералов. Коллективная монография. Т. 1. М.: Недра, 1987. 488 с.
5. Материалы, оборудование и технологии нанoeлектроники и микрофотони-

ки / Под ред.: А. Ф. Беянина, М. И. Самойловича. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2003. 357 с.

6. **Беянин А. Ф., Самойлович М. И., Житковский В. Д., Каменева А. Л.** Ударостойкие защитные пленочные покрытия на основе AlN в электронной технике // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2005. № 5. С. 35—41.

7. **Беянин А. Ф., Самойлович М. И., Житковский В. Д.** и др. Формирование методами магнетронного распыления пленок алмазоподобных материалов и их применение в устройствах электронной техники // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2003. № 1, 2. С. 62—78.

8. **Belyanin A. F., Samoilovich M. I.** Diamond and diamond-like materials films: formation, structure and applications in electronics // Nanostructures and photon crystals. Collective monograph after the materials of plenary reports the 10 International conference. Russia. Moscow. CRTI "Technomash". 2004. P. 115—194.

9. **Нанотехнологии** и фотонные кристаллы / Под ред. А. Ф. Беянина, М. И. Самойловича. Калуга—Москва: ОАО ЦНИТИ "Техномаш". 2004. 243 с.

10. **Беянин А. Ф., Самойлович М. И.** Применение в акустоэлектронике наноструктурированных пленок алмаза и алмазоподобных материалов // Материалы X международной конференции "Высокие технологии в промышленности России". М.: ОАО ЦНИТИ "Техномаш", 2004. С. 5—120.

11. **Семенов А. П., Беянин А. Ф., Семенова И. А.** и др. Тонкие пленки углерода. II. Строение и свойства // Журнал технической физики. 2004. Т. 74. Вып. 5. С. 101—105.

12. **Самойлович М. И., Беянин А. Ф., Житковский В. Д., Багдасарян А. С.** Наноструктурные углеродные материалы в тонкопленочной технологии // Инженерная физика. 2004. № 1. С. 33—39.

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

14. **Sadoc J. F., River N.** Boerdijk-Coxeter helix and biological helices // Europ. Phys. J. B. 1999. V. 12. P. 309—318.

15. **Samoilovich M. I., Talis A. L.** Structural realization of a fibre space technick and other algebraic geometry constructions as a foundation for the theory of nanostructural symmetry // Nanostructures and photon crystals. Collective monograph after the materials of plenary reports the 10 International conference. Russia. Moscow. CRTI "Technomash". 2004. P. 5—114.

16. **Самойлович М. И., Талис А. Л.** Теория симметрии наноструктурных состояний конденсированных сред как структурная реализация конструкций алгебраической геометрии // Материалы X международной конференции "Высокие технологии в промышленности России". М.: ОАО ЦНИТИ "Техномаш". 2004. С. 121—255.

17. **Шевченко В. Я., Самойлович М. И., Талис А. Л.** и др. Геометрические структурные комплексы наночастиц ZrO₂ // Физика и химия стекла. 2005. Т. 31. № 2. С. 92—109.

18. **Andersson S., Wadsley A. D.** On the description of complex inorganic crystal structures // Nature. 1966. V. 211. P. 581—587.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 539.216.2

Ю. В. Брюхова,
ОАО "НИИМЭ и завод "Микрон",
Н. А. Зайцев, д-р техн. наук,
ОАО "Элпа"

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММ ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Экстракция Spice-параметров моделей является важным этапом в получении адекватных и достоверных моделей полупроводниковых приборов, включая приборы микросистемной техники. В статье описываются и анализируются различные методы построения моделей полупроводниковых приборов.

Преодоление полупроводниковой технологией 0,18-микрометрового рубежа предъявляет новые требования к системам моделирования ИС. Теперь

даже при моделировании цифровых ИС, а также разработке МЭМС приборов требуются Spice-подобные программы детального схемотехнического моделирования с применением точных моделей полупроводниковых приборов. Экстракция Spice-параметров моделей является важным этапом в получении адекватных и достоверных моделей полупроводниковых приборов, включая приборы микросистемной техники. В статье описываются и анализируются различные методы построения моделей полупроводниковых приборов.

Введение

В работе [1] вводятся основные понятия и определения, используемые в маршруте моделирования МОП-транзисторов, которые широко применяются в мировой практике, поэтому во введении целесообразно определить эти понятия, строго следуя работе [1].

Компактные модели используются для замещения компонентов электрической цепи в целях ее машинного моделирования. Основным противоречием, которое преодолевается при разработке модели, является противоречие между точностью и сложностью.

В отличие от *физико-технологических моделей*, которые отражают физические процессы, протекающие в полупроводниковых приборах и описываются системой дифференциальных уравнений в частных производных, компактные модели отражают поведение прибора только относительно его внешних выводов и описываются системой обыкновенных дифференциальных уравнений.

К компактным моделям не относятся также достаточно сложные математические модели, описывающие физические процессы в полупроводниковых приборах. Эти модели служат для объяснения и глубокого аналитического исследования транзисторных (полупроводниковых) структур с целью их оптимального конструирования и создания элементной базы нового поколения.

Компактные модели делятся на *физические* и *формальные*. Физические модели создаются в результате анализа физических процессов, протекающих в приборе с упрощенной (модельной) геометрией, с упрощенным распределением легирующих примесей, в одномерном, квазидвумерном или квазитрехмерном приближении. При получении таких моделей используется множество других упрощающих предположений: о диапазоне применимости, о погрешности аппроксимации, о постоянстве параметров и др. Детальное исследование физических процессов и строгое обоснование сделанных допущений очень важно для создания простой и одновременно точной компактной модели. Несмотря на множество упрощающих предположений, физические модели сохраняют физический смысл своих параметров и часто позволяют установить связь этих параметров с основными параметрами технологического процесса. Примером физической модели является BSIM3 [2].

В отличие от физических, формальные модели строят на основе формального сходства между поведением модели и объекта относительно внешних выводов. При этом уравнения модели выводятся не из физических представлений о работе прибора, а путем экспертного подбора функциональных зависимостей для наилучшей аппроксимации вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик. Для получения таких моделей широко используются методы средней квадратической подгонки параметров уравнений с целью минимизации погрешности моделирования. Примером формальной модели является широко известная малосигнальная модель транзистора в виде линейного четырехполюсника, модель *Level 3* программы *Spice* [8], кусочно-линейные модели Чуа [3, 4], модель Ангелова [6]. Предельно упрощенными разновидностями формальных моделей являются *модели переключательного уровня*, которые используются для упрощенного моделирования цифровых СБИС [7].

В практике схемотехнического моделирования долгое время использовались как формальные, так и физические модели, однако последние 10 лет и в настоящее время подавляющее большинство разработчиков СБИС применяют исключительно физические модели, поскольку только они позволяют прогнозировать поведение транзистора при изменении его геометрии и электрофизических параметров [1].

На протяжении всей истории развития области схемотехнического моделирования, которая насчитывает уже более 30 лет, возможности компактных моделей отставали от быстро растущих потребностей электронной промышленности. Особенно жесткие требования к ним предъявила 0,25-микрометровая и последующие технологии, когда оказалось, что огромная индустрия цифровых СБИС и систем на кристалле уже не может использовать упрощенные модели переключательного уровня и должна применять более точные компактные модели и детальное (*Spice*-подобное) моделирование [9].

Процессы проектирования и производства ИС в большинстве случаев разделены в пространстве: производство выполняется преимущественно в Юго-Восточной Азии, разработка с последующим размещением производства в кремниевых мастерских ведется по всему миру, в том числе несколько десятков фирм имеется в России. Очень распространенной стала организация бизнеса, при которой разработкой ИС занимаются небольшие фирмы, не имеющие своих кремниевых производств (*Fabless semiconductor companies*) [1].

Таким образом, между разработчиками и кремниевыми мастерскими должен быть надежный канал передачи информации о проекте и технологическом процессе, исключающий возможность изготовления неработоспособных ИС по причине искажения информации.

При традиционном методе получения параметров моделей информацию о техпроцессе получают с помощью тестовых чипов, которые разрабатывает кремниевая мастерская для отработки техпроцесса или компания, специализирующаяся на разработке тестовых кристаллов. Часто их разрабатывают сами проектировщики ИС, которые не доверяют данным, полученным из кремниевой мастерской. Тестовый кристалл является первичным источником информации о технологическом процессе. Далее его используют для получения параметров компактных моделей, включая статистические параметры, которые передаются проектировщикам ИС. Если при моделировании ИС разработчик использует параметры моделей, полученные из кремниевой мастерской, то послед-

няя гарантирует работоспособность спроектированных кристаллов.

К недостаткам этого метода стоит отнести продолжительность получения и внедрения модели в производство, а также высокие экономические затраты, возникающие в процессе разработки модели. Внедрение модели в полупроводниковую индустрию требует ~3 года, а продолжительность ее разработки составляет 10...50 чел.-лет, поэтому возникает вопрос о поиске компромисса между временем разработки модели и ее вычислительной эффективностью [1].

Один из альтернативных методов синтеза моделей основан на использовании программ физико-технологического моделирования (например, ISE TCAD) при моделировании полупроводниковых структур и приборов и получении, таким образом, параметров моделей полупроводниковых приборов. При этом модель автоматически получается физической, с физическими параметрами. Для уменьшения сложности модели при сохранении точности выполняют аналитическое интегрирование уравнений полупроводника с заданными начальными и граничными условиями. Параметры, необходимые для интегрирования, находят с помощью численных физико-топологических моделей.

Основным недостатком этого метода является применение для идентификации параметров физико-топологических моделей, которые сами по себе имеют много нерешенных проблем. К ним относятся: отсутствие надежной метрологической базы; трудоемкость калибровки моделей; постоянное появление новых физических эффектов, для учета которых требуется переделка или модификация моделирующих программ. К ограничениям этого метода также следует отнести проблематичность (или чрезмерную трудоемкость) моделирования трехмерных эффектов.

К потенциальным достоинствам метода можно отнести: возможность быстрого моделирования приборов, для которых еще не создана модель, эффектов внешних воздействий (магнитного поля, радиации), саморазогрева прибора; уменьшение времени, необходимого на разработку модели и экономических затрат, связанных с этим; уменьшение времени, необходимого для принятия решения о целесообразности выполнения того или иного проекта, так как используя этот метод, можно оценить возможности проектирования ИС в выбранном технологическом базисе. Также с помощью этого метода можно более четко определять состав тестового кристалла, включая в него элементы калибровки, необходимость которых может быть выявлена в ходе комплексного моделирования.

Основные задачи моделирования интегральных структур. Уровни моделирования

В связи с постоянной разработкой новой элементной базы БИС необходимы методы моделирования, позволяющие посредством численных экспериментов на ЭВМ устанавливать количественные зависимости между электрофизическими, топологическими параметрами интегральных структур и множеством их эксплуатационных характеристик с учетом сложных взаимодействий в конкретных БИС. При этом проводятся следующие исследования:

- физических процессов в технологических установках;
- физических процессов в объеме и на поверхности интегральных структур при внешних воздействиях;
- электрических взаимодействий полупроводниковых приборов в составе БИС.

Моделирование физических процессов посредством программ физико-технологического моделирования позволяет получить, в частности, количественные характеристики полупроводниковых интегральных структур. К таким характеристикам прежде всего относятся: распределение концентраций легирующих примесей в эпитаксиальных, ионно-легированных и диффузионных слоях; толщины таких слоев и другие параметры. Они являются исходными данными для проектирования приборов. Следует отметить, что моделирование технологических процессов является важным, но не единственным источником данных, которые используются на следующем этапе проектирования [11].

Моделирование физических процессов в интегральных структурах элементов необходимо для:

исследования физики процессов, протекающих в принципиально новых элементах БИС;

исследования новых конструктивно-технологических вариантов компонентов (в частности, компонентов с субмикрометровыми размерами) и экстремальных режимов их работы;

определения параметров эквивалентных электрических схем.

В результате должны быть определены структурные и топологические параметры элементов БИС. К структурным параметрам относятся такие геометрические размеры приборов, как толщины технологических слоев, глубины залегания $p-n$ -переходов и концентрации примесей в этих структурах. Топологическими параметрами являются геометрические размеры областей прибора в плоскости рабочей поверхности БИС, конфигурации электродов и взаимное расположение рабочих областей [11].

Задачи, стоящие перед разработчиком на данном уровне проектирования, решаются методом

так называемого численного эксперимента над моделями объектов проектирования, проводимого с помощью ЭВМ. Численные эксперименты по исследованию физики работы принципиально новых приборов с помощью программ физико-технологического моделирования являются одним из наиболее эффективных средств, используемых разработчиком. Альтернативой численному эксперименту в данном случае является технологический эксперимент. Однако технологические эксперименты сопряжены с большими затратами средств и времени.

В эволюции структур элементов БИС имеется постоянно действующая тенденция — уменьшение геометрических размеров (топологических и структурных). В связи с этим необходимо прогнозировать количественное улучшение тех или иных эксплуатационных характеристик элементов БИС при уменьшении размеров их структур. Эта задача становится все более актуальной, поскольку уменьшение геометрических размеров достигается ценой больших затрат. В результате моделирования физических процессов могут быть определены статические и динамические характеристики и параметры элементов БИС. К основным характеристикам элементов относятся входные и выходные ВАХ, коэффициенты усиления, времена задержки переключения, рабочие частоты и т. п. Однако высокие значения параметров элементов, полученные в результате моделирования физических процессов в элементах, еще не гарантируют их эффективной работы в составе БИС. Дело в том, что эксплуатационные характеристики БИС определяются не только параметрами собственно элементов, но и в значительной мере организацией БИС, в частности, видом их внутрисхемных соединений, средствами изоляции и т. п. [11]. Например, при освоении электронной литографии ставится задача определения степени увеличения быстродействия при ее использовании в БИС определенного класса. Для решения подобной задачи необходимо, как минимум, моделирование технологических процессов с целью расчета параметров структуры элементов (*первая часть задачи*). В частности, следует провести моделирование термических операций и операции легирования. Уменьшение топологических размеров, обусловленное использованием электронной литографии, в соответствии с принципом пропорциональной миниатюризации влечет за собой и снижение структурных размеров (толщин слоев и глубин залегания $p-n$ -переходов). Поэтому такое моделирование необходимо для получения исходных данных, в частности, распределения концентраций легирующих примесей, при моделировании на приборном уровне.

На следующем уровне моделирования (*вторая часть задачи*) исследуют особенности функционирования элементов с субмикрометровыми размерами в целях получения количественных параметров статических ВАХ и динамических параметров. Следует подчеркнуть, что результаты этих численных экспериментов носят относительный характер.

На третьем уровне моделирования (*третья часть задачи*) исследуют электрические характеристики приборов с учетом взаимодействия между элементами на модели БИС в целом или на ее фрагменте. Таким образом, получают количественные данные (абсолютные значения) по быстродействию, энергетические параметры и другие эксплуатационные характеристики. На основании полученных данных можно сделать аргументированные выводы о целесообразности применения технологических новшеств для конкретного изделия [10, 11].

Иерархическая система моделей используемых в САПР элементов БИС

Общепринятым в настоящее время является метод, согласно которому на различных уровнях моделирования используют различные модели. Это обеспечивает достижение разумного компромисса: сложность модели — точность моделирования. Кроме того, такой метод позволяет достаточно гибко и оперативно проводить сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными и уточнять исходные значения, т. е. осуществлять итерационный процесс оптимизации приборных структур по электрофизическим параметрам с учетом заданных электрических параметров БИС и принятых ограничений. Этот метод позволяет также соразмерить возможности численного моделирования по точности с точностью исходных данных.

В условиях резкого увеличения размерности задач, характерного для этапа создания СБИС и УБИС, главной тенденцией развития методов моделирования стало совместное применение моделей различных иерархических уровней. Идея многоуровневого моделирования структур элементов БИС подразумевает комплексное использование при проектировании различных моделей одного и того же объекта — полупроводникового прибора.

На этапе технологического моделирования применяют модели, имитирующие процессы ионного легирования, диффузии, эпитаксиального (гомо, гетеро, молекулярного) наращивания и оксидирования. Именно эти процессы в основном определяют распределение примесей в полупроводниковых структурах, глубины и конфигурации $p-n$ -переходов. Кроме этих моделей используют модели процессов формирования поверхностных конфигураций (топологии). Такими моделями являются

модели литографии, исключая нанесение и травление пленок. Исходными данными для моделирования являются параметры режимов соответствующего технологического оборудования (время обработки, температура, давление, доза и энергия ионной бомбардировки и т. п.).

Общее назначение моделей технологических процессов состоит в получении информации о конфигурации и размерах областей, распределении примесей в полупроводниковой структуре. На основании этой информации по известным зависимостям определяют электрофизические параметры отдельных рабочих областей структуры, например, подвижность и время жизни носителей заряда, скорость рекомбинации и т. п. Как объект моделирования, полупроводниковый прибор представляет собой трехмерную структуру, состоящую из полупроводниковых, диэлектрических и металлических областей со сложным распределением концентраций легирующих примесей и с различными электрофизическими параметрами. Кроме того, особенностью объекта моделирования является множество физических процессов, протекающих в его структуре, и сложный характер взаимодействия с окружающей средой.

Исходя из задач проектирования элементной базы в качестве основных определены следующие классы моделей интегральных структур: физико-технологические; физико-топологические; электрические. Совокупность моделей образует систему, взаимосвязи в которой определяются иерархическим принципом. Модели, используемые на каждом последующем более высоком уровне проектирования, отличаются большей степенью абстрагирования. Результаты моделирования на более низком уровне используют как исходные данные для моделирования на более высоком уровне.

Для каждого уровня характерны своя теоретическая основа и математический аппарат для синтеза и анализа моделей.

На первом уровне моделирование проводят наиболее детально. На основе физики полупроводников рассматривают физические процессы в полупроводниковой структуре: дрейф, диффузию, генерацию и рекомбинацию основных и неосновных носителей заряда. Исходными данными являются структурно-технологические параметры (геометрия структуры и распределение концентрации примесей в ней). В результате моделирования получают пространственно-временные распределения подвижных носителей заряда и электрического потенциала в структуре [10, 11].

На втором уровне моделирования полупроводниковых структур используются модели с меньшей детализацией. На основе теории поля с распределенными источниками тока рассматривают про-

цессы растекания токов основных носителей заряда в рабочих областях элементов (транзисторных, функционально-интегрированных элементах, резисторах и т. п.). Исходными данными для такого моделирования являются топология и интегральные параметры физической структуры, инвариантные относительно топологии. К таким параметрам относятся удельные значения объемных и поверхностных сопротивлений рабочих областей, токи утечки $p-n$ -переходов, барьерные и диффузионные емкости и т. д. Эти параметры могут быть определены на первом уровне моделирования или же экспериментально с помощью специальных тестовых элементов. Модели второго уровня, использующие уже найденные с помощью сложных физических моделей первого уровня интегральные параметры физической структуры, экономят машинное время по сравнению с моделями первого уровня за счет исключения вычислений пространственного распределения носителей заряда на каждом шаге итерационного процесса отработки топологии элементов. По существу, применение моделей второго уровня делает реальным автоматизацию процесса разработки топологии элементов за счет разделения задачи большой размерности, непосильной для современной вычислительной техники [11].

Заключение

Таким образом, модели данного уровня используют в качестве исходных данных результаты моделирования на первом уровне, позволяющие с помощью ЭВМ определить параметры электрических эквивалентных схем. Математическим аппаратом анализа на данном уровне являются численные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных, в основе которых лежит метод конечных разностей.

Модели третьего уровня представляют собой обширную группу электрических эквивалентных схем. Эквивалентные схемы полупроводниковых приборов широко используются для расчета электрических режимов БИС. Теоретической основой для синтеза данного класса моделей являются модели первого уровня, применяемые для идентификации некоторых параметров эквивалентных схем. Другой основой синтеза электрических эквивалентных схем и средством идентификации их параметров являются физико-топологические модели. В этом случае появляется возможность учета в эквивалентных схемах конкретной топологии элементов БИС. Кроме того, разработаны методы идентификации параметров эквивалентных схем по экспериментальным ВАХ. Результатом моделирования является нахождение токов и напряжений в ветвях и узлах принципиальной электрической

схемы БИС или ее фрагментов. Данные модели являются практически единственным аппаратом оценки эффективности того или иного схемотехнического решения БИС или ее отдельных фрагментов с учетом особенностей физической структуры и топологии. В конечном счете, от точности данных моделей зависит точность прогнозирования электрических характеристик БИС.

Список литературы

1. Денисенко В. В. Моделирование МОП транзисторов. Методологический аспект // Компоненты и технологии. 2004. № 8. http://www.rlda.ru/MOSFET_Simulation.pdf.
2. Cheng Y., Hu C. MOSFET modeling & BSIM3 user guide // Kluwer Academic Publishers. 1999. 461 p.
3. Chua L. O., Deng A. Canonical piecewise linear modeling // IEEE Transactions on Circuits and Systems. 1986. Vol. 33. N 5. P. 511—525.
4. Chua L. O., Deng A. Canonical piecewise linear representation // IEEE Transactions on Circuits and Systems. 1988. Vol. 35. N 1. P. 101—111.
5. Citterio M., Kierstead J., Rescia S., Radeka V. Radiation effects on Si-JFET devices for front-end electronics // IEEE Transactions on Nuclear Science. June 1996. Vol. 43, N 3. P. 1576—1584.
6. Angelov I., Rorsman N., Stenarson J., Garcia M., Zirath H. An Empirical Table-Based FET Model // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. December 1999. Vol. 47. N 12. P. 2350—2357.
7. Acar E., Dartu F., Pileggi L. T. TETA: Transistor-level waveform evaluation for timing analysis // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. May 2002. Vol. 21. N 5. P. 605—616.
8. Liu S. A unified CAD model for MOSFETs // ERL Memorandum No. UCB/ERL M81/31, University of California, Berkeley, May 1981.
9. Денисенко В. В. Проблемы схемотехнического моделирования КМОП СБИС // Компоненты и технологии. 2002. № 3. С. 74—78; 2002. № 4. С. 100—104.
10. Рындин Е. А., Коноплев Б. Г. Субмикронные интегральные схемы: элементная база и проектирование. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2001. 147 с.
11. Физико-топологическое моделирование структур элементов БИС. <http://book.teonet.ru>

УДК 621.3.049

А. Я. Сафронов, канд. техн. наук,
Е. С. Горнев, д-р техн. наук,
Н. А. Зайцев, д-р техн. наук,
И. В. Матюшкин, канд. техн. наук,
ОАО "Элпа"

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ И ТОНКИХ ПЛЕНОК ПЬЕЗОКЕРАМИКИ

Рассмотрена возможность использования пьезокерамических элементов на основе ЦТС в микроэлектромеханических системах (МЭМС). Показано, что наиболее перспективными методами получения пленок ЦТС микрометровой толщины является золь-гель метод и магнетронное распыление. На примере матрицы микрозеркал, приводимых в движение пьезоактюатором, обсуждаются пути создания пьезоМЭМС.

В настоящее время во всем мире проводятся исследования в целях разработки изделий микросистемной техники различного функционального назначения с использованием преимуществ кремния и пьезокерамических пленок, осаждаемых на кремниевую подложку. Перспективность данного направления в первую очередь обусловлена тем, что данный класс приборов (устройств) можно было бы изготавливать в условиях микроэлектронного производства, а кроме этого появляется пер-

спектива изготовления на одном чипе исполнительного механизма, состоящего из элементов и/или приборов, изготовленных на основе кремния и/или на тонких пьезокерамических пленках, а также схем управления этими устройствами. Для реализации этого замысла необходимо разработать базовый маршрут, позволяющий в едином технологическом цикле изготавливать этот класс приборов. Причем, используя данный подход, можно как отдельно изготавливать приборы на кремнии и пьезокерамики, так и создавать устройства, включающие в себя эти элементы вместе. В настоящее время данный подход разрабатывается во всем мире, в первую очередь в США, Японии и Германии.

Данная статья посвящена разработке элементов базовых конструкций и технологии изготовления микросхем на основе кремния и тонких пленок (~1 мкм) пьезокерамики.

Проведенный нами анализ (табл. 1) литературных источников [1, 2, 12—18] позволил определить основные направления развития изделий микросистемной техники (МСТ) на основе пьезокерамических пленок.

Для создания приборов на основе пьезокерамических пленок необходимо осуществить:

- выбор материала и разработку технологии получения тонких (~1 мкм) пьезоэлектрических пленок;
- разработку системы металлизации (Me—ЦТС—Me);
- разработку конструктивно-технологического базиса пьезокерамических и/или кремниевых

Таблица 1

Основные направления развития изделий МСТ на основе пьезокерамических пленок

Класс объектов	Направление разработок
Микродатчики	Интеллектуальные сенсоры, тактильные датчики, ПАВ датчики, брызговые датчики, микропереключатели
Оптоэлектромеханические микросистемы	Адаптивная оптика, световоды, линии задержки
Микроэлектромеханические системы и машины	Микромеханизмы, микропривод, микродвигатели, микронасосы, микрогироскопы
Микросистемы энергообеспечения и преобразования энергии	Автономные миниатюрные источники энергии, трансформаторы, твердотельные батареи
Микроаналитические системы	Миниатюрные аналитические приборы
Биотехнические системы	Миниатюрные системы для диагностики организма и замещения органов
Технологические микросистемы	Микрореакторы, микроинструмент
Микроробототехнические системы	Автономные многофункциональные мини-системы для специальных условий эксплуатации (самолеты и т.д.)
Устройства передачи, преобразования и приема сигналов	Пьезокерамические фильтры, пьезокерамические резонаторы, линии задержки, излучающий антенный модуль, гидроакустическая антенна, приемники ИК излучения

приборов, определение перечня библиотечных элементов;

- проведение моделирования разрабатываемой конструкции и материалов;
- разработку тестовых элементов и кристалла;
- изготовление и исследование элементов, входящих в состав тестового кристалла.

Одним из перспективных сегнетоэлектрических материалов, используемых при изготовлении изделий микросистемной техники, является твердый раствор цирконата-титаната свинца $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ (ЦТС) с составом, близким к морфотропной фазовой границе, где $x \approx 0,52 \div 0,55$ [3, 4].

К настоящему времени разработано достаточно большое число способов осаждения пленок ЦТС [3–10]. При осаждении этих пленок в их объеме возникают механические напряжения. Основной источник механического напряжения в тонких пленках заключается в несоответствии между коэффициентами теплового расширения пленки, электродов и подложки. Кроме того, при охлаждении пленка ЦТС испытывает фазовый переход из кубической фазы в тетрагональную и/или ромбоэдрическую, что приводит к дополнительным внутренним напряжениям в структуре пленки. При этом очевидно, что в зависимости от значений и знака остаточных внутренних напряжений диэлектрические свойства пленок могут существенным образом изменяться, что в конечном итоге будет

предопределять и свойства конструируемого на их основе устройства [3].

Так, с помощью фокусировки струйного потока из сверхмелких частиц материалов [6] на подложку кремния осаждались керамические пленки ЦТС. Согласно данным рентгеновского дифракционного анализа, пленки имеют статически ориентированную поликристаллическую структуру, которая аналогична кристаллической структуре исходных частиц. Пленки имеют хорошую адгезию, при комнатной температуре наблюдается сегнетоэлектричество. Однако поверхность этих пленок имеет развитый рельеф, что ограничивает осаждение на них тонких металлических и других пленок. Для изготовления тонкопленочного пьезоэлектрического актюатора с помощью абляции КгF-эксимерным лазером осаждали пленки ЦТС толщиной более 1 мкм [7]. В этом случае наблюдаются трудности получения пленок с необходимым воспроизводимым фазовым составом. Так, пироклорная фаза, получаемая при высокой температуре осаждения, не переходит при отжиге в перовскитную фазу. Однако перовскитная фаза наблюдается при осаждении из аморфной фазы при комнатной температуре.

В работе [8] отмечается, что при использовании пленок ЦТС в актюаторах применяют метод их осаждения из аэрозоля. При этом модуль Юнга пленок (Y_{11}) составляет 80 ГПа. Поляризация материала (40 кВ/см, 250 °С, 20 мин) увеличивает Y_{11} в 4–5,5 раза, что способствует повышению пьезоэлектрического коэффициента $d_{31} \sim$ в 4 раза. В работе [9] показано влияние температуры пиролиза на диэлектрическую постоянную и диэлектрические потери. Пленки, полученные при 500 °С, имеют самое низкое значение тока утечки, при этом диэлектрическая постоянная равна 255, а диэлектрические потери — 0,0165. Достаточно долго исследуются пленки ЦТС, полученные магнетронным распылением, в целях использования их в изделиях микросистемной техники.

Данные оптической эмиссионной спектроскопии потока [10], полученные в процессе осаждения пленки, показали четкую связь между интенсивностью характеристических линий излучения атомов Zr, Ti и Pb и составом тонких пленок ЦТС. Отношение Ti и Zr изменялось за счет корректировки мощности, подаваемой на соответствующие мишени. Содержание свинца стабилизировалось с помощью температуры осаждения, которая составила 570 °С. При достаточно высоких значениях скорости реакционного потока и плотности энергии ВЧ разряда реакции образования пленки протекают в основном на поверхности подложки. Пленки перовскита ЦТС с кристаллографической ориентацией (III) получены золь-гель методом при темпе-

Сравнительный анализ способов получения пленок ЦТС

Метод получения	Положительные характеристики процесса	Отрицательные характеристики процесса
Магнетронное распыление: а) $Pb_{1,1}(Zn_{0,4}Ti_{0,6})$ в атмосфере Ag, O_2 ; б) из трех мишеней	Высокая частота процесса, широкий выбор оборудования, сервис	Дорогостоящее оборудование, трудность введения модификаторов
Лазерная абляция (экцимерный лазер на KrF)	Широкий выбор температуры подложки	Процесс находится на стадии отработки, трудность введения модификаторов
Осаждение из струи потока сверхмелких частиц материала (плазмотрон)	Высокая скорость осаждения	Развитый рельеф (сложность осаждения тонких пленок), отсутствие промышленного оборудования
Осаждение из газовой фазы металлоорганических соединений	Технологичность (высокая загрузка, малое время процесса), высокая управляемость процесса	Высокая концентрация органических включений в пленку, проблемы получения пленок с воспроизводимыми электрическими характеристиками $E_{пр}$, d_{33}
Золь-гель метод	Технологичность, легкоуправляемость структурой и фазовым составом, легкость ввода модифицирующих добавок	Трудность приготовления растворов, подверженность старению

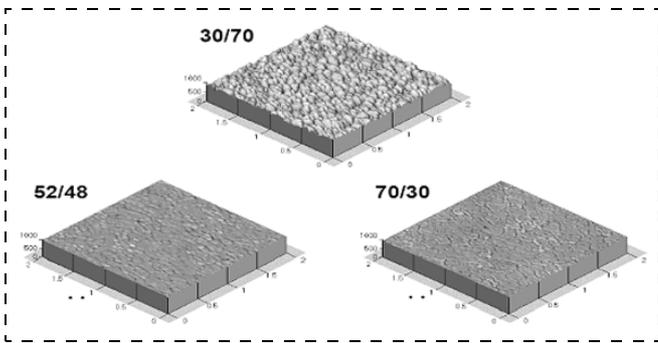


Рис. 1. Структура пленок в зависимости от соотношения Zr/Ti, толщина 1 мкм

ратуре 440 °С [11]. Энергия активации кристаллизации для фазового перехода из пироклорной в перовскитную фазу равна 179 кДж/моль. Закристаллизованные при температуре 480 °С пленки хорошего качества имели пьезоэлектрический коэффициент $1,8 \cdot 10^{-4}$ Кл/м · К и остаточную поляризацию 24 мКл/м². Результаты анализа сведены в табл. 2, откуда следует, что наиболее перспектив-

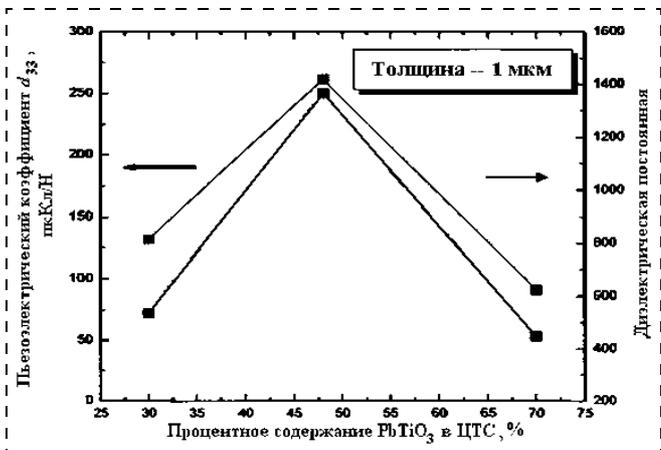


Рис. 2. Зависимость пьезомодуля d_{33} и диэлектрической постоянной от состава керамики

ными методами получения пленок ЦТС является золь-гель метод и магнетронное распыление.

При расчете параметров пьезоэлектрических устройств используется пьезоэлектрический модуль d . Пьезоэлектрический модуль — это генерируемый заряд (поляризация) на единицу механического давления, приложенного к пьезоэлектрическому материалу, или это механическая деформация пьезоэлектрического материала на единицу приложенного электрического поля.

Для изготовления приборов на основе пьезокерамических пленок необходимо, чтобы микро-рельеф поверхности был микрогладкий. Это достигается при соотношении $Zr/Ti = 52/48$ (рис. 1). Также необходимо получать пленки с максимальным значением пьезоэлектрического коэффициента (d_{33}).

Максимальное значение коэффициента d_{33} для пленок ЦТС достигается при соотношении $Zr/Ti = 52/48$ (рис. 2).

Пьезоэлектрические константы пленок в сильной степени зависят от их толщины (рис. 3) и увеличиваются с их ростом [11]. Пленки с ориентаци-

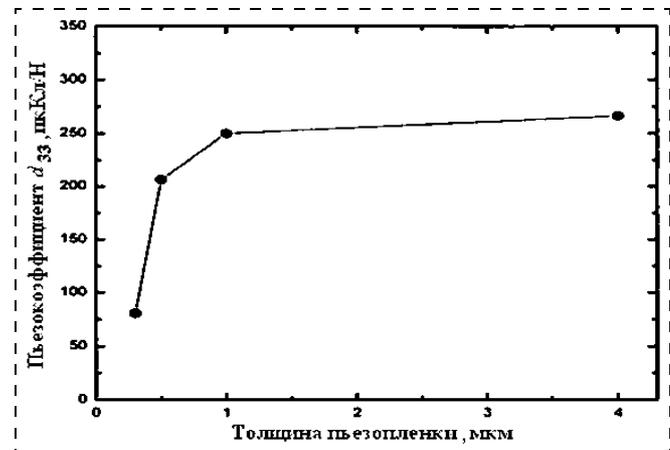


Рис. 3. Зависимость пьезомодуля d_{33} от толщины пленки для соотношения Zr/Ti = 52/48

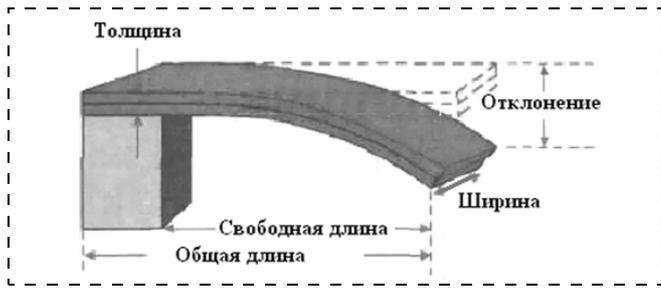


Рис. 4. Параллельный двухслойный гибкий микроактюатор

ей (100) имеют более высокие пьезоэлектрические константы и меньшие потери, чем пленки с ориентацией (111) [13].

При разработке осевых и поперечных актюаторов необходимо обеспечить максимальное значение пьезоэлектрических коэффициентов d_{33} и d_{31} соответственно. Наибольшее значение коэффициента d_{31} достигнуто для ориентации ЦТС (110) [16] при концентрации циркония 45 % [15], в то время как максимальные значения диэлектрической проницаемости и пьезоэлектрического коэффициента d_{33} соответствуют содержанию циркония 52 %.

На рис. 4 представлено схематическое изображение параллельного двухслойного гибкого микроактюатора, который находит применение в различных областях науки и техники [18].

Разработанные нами пьезоактюаторы предполагается использовать также и в матрице микрозеркал для управления каждым зеркалом индивидуально. Для получения четкого изображения необходимо микрозеркала как можно ближе располагать друг к другу. С помощью кремниевых актюаторов данную задачу решить очень трудно. На рис. 5–7 (см. третью сторону обложки) представлена матрица, состоящая из 300 тыс. микрозеркал, каждое размером 97×97 мкм [19, 20].

Данное устройство сочетает в себе элементы кремниевой технологии (схема управления, зеркало) и пьезотехнологии (актюаторы). В настоящее время в ОАО "Элпа" разработан тестовый кристалл, включающий элементы для отработки технологии получения тонких пленок ЦТС, а также тесты по отработке конструкции приборов: актюаторов, акселерометров, датчиков давления и микрореле. При разработке технологического маршрута и конструкции приборов используется пакет программы ф. ANSYS.

Выводы

- ✧ На основе проведенного литературного анализа установлены основные направления развития изделий МСТ на основе пьезоэлектрических пленок.
- ✧ Проведен сравнительный анализ способов получения пленок ЦТС. Определено, что золь-

гель метод и магнетронное распыление ЦТС мишеней наиболее перспективны для практического использования тонких пленок в приборах.

- ✧ В целях получения пьезоприборов (актюаторов, акселерометров и датчиков давления) с оптимальными параметрами определен состав и толщина пьезопленок.

Список литературы

1. Сафронов А. Я., Парфенов Б. Г., Чернов В. А., Климашин В. М. Стратегия развития, направления пьезокерамических изделий // Тр. Международной научно-практической конференции 23–26 августа 2005, Ростов-на-Дону. 2005. С. 143–146.
2. Данцигер А. Я. и др. Многокомпонентные системы сегнетоэлектрических сложных оксидов: физика, кристаллохимия, технология. Аспекты дизайна пьезоэлектрических материалов. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 2001. Т. 1. 408 с.
3. Witvrow A., Tilmaus H. A., De Wolf // Int. microporous and mesoporous Mater. 2004. 76. N 1–4. С. 245–257.
4. Лалетин Р. А., Бурханов А. И., Шильников А. В., Сигов А. С., Воротилов К. А. Поведение доменной структуры в электромеханических полях в тонких сегнетоэлектрических пленках PZT // Тр. Международной научно-практической конференции, 23–26 августа 2005, Ростов-на-Дону, 2005. С. 111.
5. Park Gun-Tae, Choi Jong-Gin, Park Chee-Sung, Lee Gae-Wung Klim Hyoun-Eo. Piezoelectric and ferroelectric properties of 1- μ m thick lead zirconate titanate film fabricated by a double-spin-coating process // Appl. Phys. Lett. 2004. 85. N 12. P. 2322–2324.
6. Akedo Yun, Ichiki Masaaki, Maeda Ryutaro. New Dunctional ceramic deposition method for MEMS // Ferroelectrics. 1999. 224. N 1–4. P. 331–337.
7. Kikuchi Kaoru, Wang Zhanjie, Umezawa Akihiro, Maeda Ryutaro. Deposition of PZT thin films by excimer laer ablation for piezoelectric application // Ferroelectro. 1999. 224. N 1–4. P. 267–273.
8. Akedo J., Lebedev M. Piezoelectric properties and poling effect of Pb (Zr, Ti)O₃ think films prepared for microactuators by aerosol deposition // Appl. Phys. Lett. 2000. 77. N 11. P. 1710–1712.
9. Wang Jing, Zhang Liang Ying, Yao Xi, Li Yian Kang. The effect of pyrolyzing temperature to the microstructure of PZT // PT multiplayer thin films. Ceram Int. 2004. 30. N 7. P. 1521–1524.
10. Ayguavives F., Ea-Kem B., Aubert P., Ageus B., Bretagne J. Correlation between in siti optical emission spectroscopy in a reactive Ar/O₂ of magnetron sputtering discharge and Pb (Zr_xTi_{1-x})O₃ thin film compositional // Appl. Phys. Lett. 1998. 73. N 8. P. 1023–1025.
11. Huang Z., Zhang Q., Whatmore R. W. Low temperature crystallization of lead zirconate titanate thin films by a sol gel method // Appl. Phys. 1999. 85. N 10. P. 7355–7361.
12. Hwang K. S., Manabe T., Nagahama T., Yamaguchi L., Kumagai T., Mizuta S. Effect of substrate material in the zystallinity and epitaxy of Pb (Zr, Ti)O₃ thin films // Thin solid films. 1999. 347. N 1–2. P. 106–111.
13. Lian L., Sottos N. R. Effects of thickness on the piezoelectric and dielectric properties lead zirconate titanate thin films // J. Appl., Phys. 2000. 87. N 8. P. 3941–3939.
14. Tran-huu-hue L. P., Audrain P., Levassart F., Lethiecy M. Influence of the different loss parameters on piezoelectric material performances Ferroelectrics. 1999. 224. N 1–4. P. 177–184.
15. Cattan Eric, Velu Gabriel, Haccart Thibautt. Remanent piezoelectric constant of PZT thin films // Ferroelectrics. 1999. 224. N 1–4. P. 307–314.
16. Muralt Paul, Ledermann Nicolas, Hiboux Stephane. I-plane piezoelectric coefficient of PZT thin films as a function of composition // Ferroelectrics. 1999. 224. N 1–4. P. 235–242.
17. Baborowski J., Hediger S., Muralf P., Wuethrich Ch. Fabrication and characterization of micromachined accelerometers based on PZT thin films // Ferroelectrics. 1999. 224. N 1–4. P. 283–290.
18. Yinyin Zhao et al. MEMS-based Piezoelectric Microphone for Biomedical Applcation // MEMS AlliancePoster Session. Pt. 1. 1998.
19. Sang-Gook et al. Thin-film micromirror array (TMA) — a new chip-based display device for large screen display // SID Asia Display. 1998.
20. Sang-Gook et al. Micromachined thin — film mirror array for reflective light modulation //Annals of the CIRP. 1997. 46. N 1. P. 455–458.

УДК 621.382

И. И. Абрамов, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, г. Минск,
Республика Беларусь

ПРОБЛЕМЫ И ПРИНЦИПЫ ФИЗИКИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ.

Часть I. Основные положения

Выделены и рассмотрены проблемы, принципы и подходы к моделированию физических процессов в приборных структурах на твердом теле. Их анализ в цикле статей проводится для самых разнообразных элементов микро- и наноэлектроники. В данной части работы сформулированы основные положения, необходимые при рассмотрении указанных вопросов с единых позиций для приборных структур как микроэлектроники, так и наноэлектроники.

Введение

Одно из самых сложных в настоящее время изделий промышленности — интегральная схема (ИС). Современная ИС микроэлектроники может содержать более 10^8 элементов на кристалле и среди искусственных объектов наиболее близка по своей организации, структуре и возможностям к человеческому мозгу. В то же время мозг может интерпретироваться в качестве объекта органической гибридной наноэлектроники, созданного Природой. Отметим лишь следующие факты: передача информации в мозгу осуществляется с помощью электрических сигналов; активными структурами, участвующими в этом процессе, являются органические молекулы, т. е. объекты с нанометровыми размерами. В связи с этим речь идет об органической наноэлектронике. Гибридная же она потому, что кроме электрических здесь очень важны, по крайней мере, биохимические процессы. Уровень интеграции мозга человека около 10^{10} нейронов. Ожидается, что ИС твердотельной наноэлектроники будут содержать 10^{10} и более элементов на кристалле. Таким образом, речь идет о создании искусственных интеллектуальных информационных систем, по многим показателям сравнимых и превосходящих мозг, но на твердом теле. Основным же преимуществом систем на твердом теле, судя по всему, останется быстродействие.

Качество таких высокоинтегрированных систем во многом будет определяться активным элементом, или приборной структурой*, т. е. "кирпичиками" системы. Здесь уместна следующая аналогия.

Известно, что из плохого кирпича хорошее надежное здание не построишь.

Для глубокого исследования и анализа элементов ИС необходимо использовать математическое моделирование, причем соответствующие физико-математические модели должны характеризоваться достаточно высокой степенью адекватности. Такие модели, как правило, сложны и реализуются с применением численных методов на высокопроизводительных ЭВМ. Следовательно, здесь целесообразно использование концепции вычислительного эксперимента [1].

Целью предлагаемого цикла статей является выделение и анализ проблем, принципов и подходов к моделированию физических процессов в самых разнообразных приборных структурах микро- и наноэлектроники. В первой статье сформулированы основные положения, которые будут необходимы для рассмотрения указанных вопросов с единых позиций для элементов как микроэлектроники, так и наноэлектроники.

Основные определения. Парадокс

Для облегчения восприятия дальнейшего материала приведем основные определения. В литературе можно встретить более или менее удачные определения в области математического моделирования. В качестве базовых были выбраны книги [1, 2]. Применительно к рассматриваемой области необходимый спектр основных определений был сформулирован в [3, 4]. Следуем именно этим работам.

Определение. Под *математической моделью* (или просто моделью) элемента понимаем набор математических объектов (чисел, переменных, векторов, множеств и т. п.) и математических соотношений, в совокупности отражающих тем или иным образом физические процессы, происходящие в исследуемой приборной структуре.

Таким образом, будем рассматривать только модели физического типа (I тип, физико-математические модели). Заметим, что модели формального типа (II тип, чисто математические модели) могут с успехом использоваться в ряде важных случаев, например, на этапах функционально-логического, архитектурного проектирования ИС. Граница между моделями этих двух типов иногда бывает весьма условной. Так, при более глубоком рассмотрении в наиболее удачных формальных моделях все же устанавливается связь с базовыми физическими закономерностями функционирования исследуемого объекта, например фрагмента ИС [5, 6].

Далее приведем определение основных характеристик модели.

Определение. *Адекватность модели* — это сте-

* Термины *элемент* и *приборная структура* будут эквивалентными в данном цикле статей.

пень соответствия (или правильность отображения) физических процессов, описываемых моделью, процессам, реально протекающим в элементе.

Определение. *Точность модели* обычно оценивают по точности описания выходных (интегральных) характеристик элемента относительно экспериментальных данных.

Эти два определения устанавливают принципиальную разницу между адекватностью и точностью модели, которые в работах даже специалистов иногда отождествляются. Приведем пример. Так, часто формально можно описать вольт-амперную характеристику (ВАХ) приборной структуры с высокой точностью полиномами определенной степени, но такая модель в общем случае не будет адекватной, так как никак не вытекает из физической сущности работы элемента.

Определение. *Универсальность* определяется применимостью модели к описанию элементов с необходимой степенью точности в определенном диапазоне управляющих воздействий (токов, напряжений, температур и т. д.).

Определение. *Экономичность модели* характеризуется затратами времени и памяти системы "оборудование (ЭВМ, измерительная установка и т. п.)—человек" для подготовки исходных данных модели, ее реализации и обработки результатов.

Легко заметить противоречивость требования высокой точности, универсальности и экономичности модели. Так как чем выше точность и универсальность модели, тем, как правило, ниже ее экономичность, больше требуемые затраты времени и памяти ЭВМ.

Необходимо отметить, что с диалектической точки зрения *модель не может быть полностью адекватной (соответствовать) самому элементу*, т. е. она всегда лишь приближенно отображает свойства реальных элементов. Этим мы подчеркиваем идеальный характер модели. В дальнейшем мы также убедимся в справедливости основного парадокса моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники, заключающегося в том, что чем меньше носителей заряда непосредственно участвуют в транспорте, тем, как правило, более сложную физико-математическую модель необходимо использовать.

Концепции и подходы физики открытых систем

Анализ литературы показывает, что в современной физике существует целый ряд нерешенных проблем, а квантовая механика, к сожалению, не является панацеей от всех бед. В принципе, в этом нет ничего удивительного, так как квантовая механика является теорией, т. е. основывается на моделях, а следовательно, — идеализациях. Данный взгляд полностью согласуется с теоремой Геделя, в которой утверждается, что не существует конечной

аксиоматической системы, позволяющей разрешить все проблемы. Тем не менее, постулаты квантовой механики привели к созданию одной из самых мощных физических теорий окружающего нас мира.

В настоящее время наметился ряд тенденций в обобщении и дальнейшем развитии квантовой механики. Наиболее успешные подходы, по-видимому, развиваются в рамках физики открытых систем (ФОС) [7—10]. Введем определение открытой системы, следуя И. Пригожину — одному из основателей ФОС.

Определение. *Открытой системой* является система, которая обменивается с окружающей (внешней) средой энергией и массой.

В соответствии с приведенным определением рассматриваемые элементы микро- и нанoeлектроники могут интерпретироваться как объекты ФОС, т. е. открытые системы. К ним же могут быть отнесены и ИС, интегрированные системы, включающие отмеченные приборные структуры.

По изложенным причинам именно *в рамках ФОС возможен, с точки зрения автора, единый подход к описанию самых разнообразных приборных структур микроэлектроники и нанoeлектроники.*

Рассмотрим основные концепции и подходы, развиваемые в настоящее время в рамках ФОС, которые могут представить практический интерес при исследовании элементов.

Существуют две принципиально различные концепции представления открытых систем на микроуровне, т. е. на "первом шаге" перехода от реального объекта к его описанию в виде строгой модели. В рамках первой концепции описание ФОС изначально основывается на известных обратимых уравнениях квантовой механики, в частности, уравнении Шредингера и его следствиях. Необходимая необратимость при описании ФОС вводится на последующих огрубленных уровнях описания [9, 10]. В рамках второй концепции описания ФОС необратимость по сути дела постулируется на начальном уровне (микроуровне) описания. В одном из подходов, в частности [8], предлагается в связи с этим отказаться от традиционного изначального описания исходя из уравнения Шредингера, т. е. оперирования с величинами в гильбертовом пространстве. С математической точки зрения необходимо перейти к более общим оснащенным гильбертовым пространствам, а исходное уравнение Лиувилля—фон Неймана также постулируется. Итак, и в том и в другом случаях мы начинаем с постулата. Это и есть "первый шаг" — начало идеализации.

Здесь, действительно, возникает очень сложная проблема — проблема "первого шага". И она часто связывается в известными парадоксами и проблемами квантовой механики, хотя, по-видимому, является более философской. Основной вопрос, ин-

интересный для нас по сути дела, следующий: возможно ли описать систему точно? Ясно, что на практике для сложных систем это, как правило, невозможно. А возможно ли в принципе? Оставим этот вопрос без ответа по двум причинам. Первая причина уже была пояснена и следует из описанного выше общеподлинного взгляда на модель — *это всегда идеализация*, если речь идет об относительно сложных системах. Такими, в частности, и являются элементы. В связи с этим уместно вспомнить слова А. Эйнштейна, который отметил, что "доказать "сверхчеловеческую" объективность научной истины не удастся никогда". Вторая причина связана с указанным выше ответом на более важный вопрос — на практике полное описание невозможно. Таким образом, мы с вами изначально постулируем, что *любая модель приборной структуры микроэлектроники и нанoeлектроники на любом уровне описания является приближенной, т. е. содержит погрешности в описании*.

Рассмотрим основные подходы к описанию открытых систем, которые приводят к положительным результатам или являются продуктивными. Эти подходы основаны на следующих моделях:

- модель системы (на различных уровнях строгости описания), которая включает основную систему, ее окружение и взаимодействие между ними;
- модель, в основе которой лежит уравнение для матрицы плотности системы и получить которое можно после суммирования по степеням свободы окружения;
- модель, включающая ограниченные интегралы по траекториям (квантовые коридоры), на основе фейнмановской формулировки квантовой механики;
- модель на основе уравнения Шредингера с комплексным гамильтонианом;
- модель на основе уравнения для матрицы плотности в оснащенных гильбертовых пространствах;
- модель на основе стохастического уравнения Шредингера.

Указанные известные подходы имеют достоинства и недостатки. В целом, они, хотя и могут приводить к различным уравнениям модели, однако часто устанавливается их эквивалентность. Например, показано [10], что модель на основе ограниченных интегралов по траекториям может быть сведена к модели на основе уравнения Шредингера с комплексным гамильтонианом. Данное замечание имеет важное значение, так как позволяет нам не углубляться в отмеченную ранее философскую проблему "первого шага".

В связи с этим в качестве базовой выберем общую методологию вывода основных уравнений моделей последующих иерархических уровней в результате физических допущений с огрублениями по пространству, времени и статистическому ус-

реднения. Данный подход в свое время с успехом использовался Н. Боголюбовым [11] при выводе необратимых кинетических уравнений исходя из обратимого уравнения Лиувилля и был обобщен впоследствии на квантовомеханический случай [12]. Подход оказался эффективным и при получении моделей различных иерархических уровней, в частности, гидродинамических [12], причем в различных областях физики. В последнее время данный классический и традиционный подход для открытых систем наиболее последовательно развивался в работах Ю. Климонтовича [9]. С точки зрения автора, подход особенно эффективен при выводе уравнений моделей последующих иерархических уровней, т. е. после "первого шага".

Таким образом, *описание открытых систем эффективно проводить на основе построения уравнений модели путем введения дополнительных физических предположений с дальнейшим огрублением по пространству, времени и статистическим усреднением на каждом последующем иерархическом уровне описания*. Отличие от работ Ю. Климонтовича состоит в том, что в данной формулировке исключена проблема "первого шага" вследствие изложенного выше.

Следуя [9], введение дополнительных источников диссипации возможно путем огрубления по пространству и времени. В ряде случаев целесообразно введение источников Ланжевена, так как бывает очень сложно описать некоторые воздействия на открытую систему и некоторые процессы в самой системе. Возможно также введение дополнительных источников диссипации через граничные условия.

Проведенное рассмотрение приводит к выводу, что серьезной проблемой теоретического исследования объектов ФОС, в частности, приборных структур микро- и нанoeлектроники, является *проблема неполноты описания модели*. Возникает она, начиная с "первого шага", и, к сожалению, неизбежна для моделирования. Для нас также принципиально важно подчеркнуть, что в рамках той и другой концепций описания открытых систем исходные уравнения первого (иерархического) уровня постулируются.

Подходы к описанию явлений переноса и синтезу моделей элементов

Выделяются два общих подхода к описанию явлений переноса в приборных структурах микро- и нанoeлектроники, а именно [13–16]: *полуклассический и квантовомеханический*.

Первый служит в качестве основы моделей структур, когда электронно-дырочная плазма (ЭДП) является классической системой, а сам подход основывается на статистической физике и некоторых квантовомеханических представлениях, в частности, о полупроводниках. Второй общий подход не-

обходимо применять при существенном влиянии квантовомеханических эффектов на процессы переноса, наблюдаемые при соизмеримости длины волны де Бройля носителей заряда λ_B с характеристической длиной прибора или размерами технологических неоднородностей $L_{\text{хар}}$, т. е. когда ЭДП является квантовомеханической системой.

Анализ известных моделей полупроводниковых приборов и элементов ИС физического типа в рамках отмеченных двух подходов позволил выделить *три общих метода синтеза [15, 16], в основе которых лежат: первого — физические допущения с огрублениями по пространству, времени и в результате статистического усреднения; второго — использование различных модельных зависимостей для параметров моделей; третьего — аппроксимации о характере поведения исходных функций.* Первый подход является наиболее кардинальным и, как уже отмечалось, лежит в основе построения иерархии уравнений ФОС. В работах [3, 4] было показано, что в сочетании с двумя другими подходами он приводит к синтезу практически всех известных моделей элементов кремниевых ИС физического типа, т.е. не формальных.

Впоследствии будет показано, что *отмеченные два общих подхода к описанию явлений переноса и три основных метода синтеза достаточны для того, чтобы построить практически любую модель приборной структуры как микроэлектроники, так и нанозлектроники физического типа.* Кроме того, дальнейшее рассмотрение будет проводиться в соответствии с основными положениями данной статьи.

Список литературы

1. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. 616 с.
2. Системы автоматизированного проектирования в радиоэлектронике: Справочник / Под ред. И. П. Норенкова. М.: Радио и связь, 1986. 368 с.
3. Абрамов И. И. Курс лекций "Моделирование элементов интегральных схем": Учеб. пособие. Мн.: БГУ, 1999. 92 с.
4. Абрамов И. И. Лекции по моделированию элементов интегральных схем. Москва-Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2005. 152 с.
5. Носов Ю. Р., Петросянец К. О., Шилин В. А. Математические модели элементов интегральной электроники. М.: Советское радио, 1976, 304 с.
6. Чахмахсазян Е. А., Мозговой Г. П., Силян В. Д. Математическое моделирование и макро моделирование биполярных элементов электронных схем. М.: Радио и связь, 1985. 144 с.
7. Пригожин Н. Введение в термодинамику необратимых процессов. М.: Изд. иностр. лит., 1960. 127 с.
8. Пригожин Н., Стенгерс И. Время, хаос, квант. К решению парадокса времени. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 240 с.
9. Климонтович Ю. Л. Статистическая теория открытых систем. Т. 3. Физика квантовых открытых систем. М.: Янус — К, 2001. 508 с.
10. Менский М. Б. Квантовые измерения и декогеренция. М.: Физматлит, 2001. 232 с.
11. Боголюбов Н. Н. Проблемы динамической теории в статистической физике. М.—Л.: Гостехиздат, 1946. 120 с.
12. Гуров К. П. Основания кинетической теории (метод Боголюбова). М.: Наука, 1966. 352 с.
13. Barker J. R., Ferry D. K. On the physics and modeling of small semiconductor devices // Solid-State Electron. 1980. V. 23. N 6. P. 519—549.
14. Рыжий В. И., Баннов Н. А. Математическое моделирование субмикронных элементов интегральных схем: состояние и проблемы // Микроэлектроника. 1987. Т. 16. № 6. С. 484—496.
15. Абрамов И. И., Харитонов В. В. Проблемы моделирования элементов кремниевых интегральных схем // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 1991. Вып. 5. С. 3—9.
16. Абрамов И. И. Моделирование физических процессов в элементах кремниевых интегральных микросхем. Мн.: БГУ, 1999. 189 с.

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

УДК 621.382.3

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

N-ТРАНЗИСТОРНЫЕ ОПТРОНЫ

Проведено моделирование и экспериментальное исследование характеристик N-транзисторных оптронов. Приведены спектральные, передаточные характеристики, а также зависимости передаточных характеристик от температуры. Рассмотрены особенности оптронов на основе N-приборов с шунтированием эмиттерного перехода и с модуляцией тока базы.

На основе фоточувствительных кремниевых биполярных N-приборов малой мощности с шунти-

рованием эмиттерного перехода и модуляцией тока базы возможно создание принципиально новых N-транзисторных оптронов (рис. 1), обладающих рядом уникальных свойств, таких как внутренняя защита от пробоя выходного транзистора и воз-

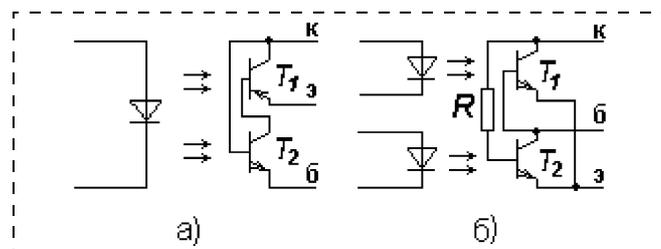


Рис. 1. N-транзисторные оптроны на основе фоточувствительных неагтронов:

а — с модуляцией тока базы; б — с шунтированием эмиттерного перехода (б — база, э — эмиттер, к — коллектор)

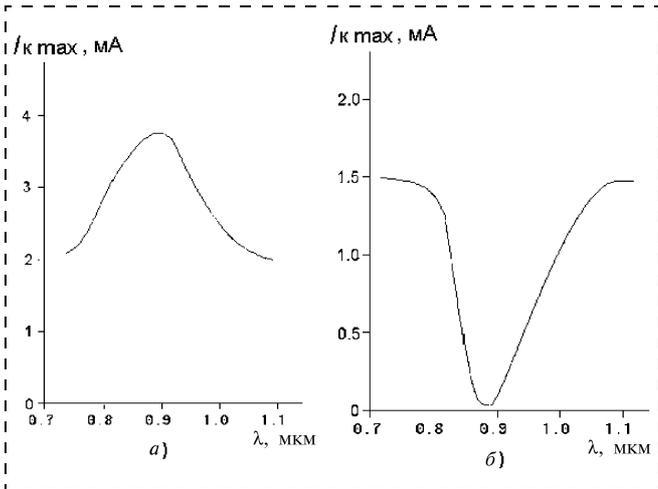


Рис 2. Спектральные зависимости токов пика N-транзисторов: а — с модуляцией тока базы; б — с шунтированием перехода база—эмиттер

возможность управления выходной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) как в сторону увеличения тока максимума, так и в сторону его уменьшения вплоть до полного спрямления ВАХ [1—3]. Целью работы является моделирование и исследование передаточных характеристик N-транзисторных оптронов и их зависимости от температуры.

Модели фотоприемников оптронов реализованы в пакете схемотехнического моделирования Orcad 10 и аналогичны описанным в работах [1—3]. В качестве фоточувствительных N-транзисторов применялись структуры, параметры которых даны в [1—3]. Для измерения спектральных характеристик применялся монохроматор МУМ-3, с погрешностью измерения длины волны ± 1 нм; ток

коллектора фиксировался с помощью вольтметра В7-77 с погрешностью измерения $\pm 0,25$ %. Максимальные значения токов и напряжений передаточных характеристик $I_{к\max}(P_{изл})$ и $U_{к\max}(P_{изл})$ определялись с помощью характериографа С1-157. Погрешность измерения температуры составляла ± 1 °С.

Выбор источника излучения оптопары определяется двумя основными параметрами: необходимой мощностью и длиной волны максимума излучения. Для достижения максимальной эффективности работы оптрона длины волн максимумов спектра излучения источника и спектра поглощения фотоприемника должны совпадать. Спектральные зависимости тока максимума выходной ВАХ обоих типов негатронов, представленные на рис. 2, получены в результате усреднения данных 20 измерений при одновременном облучении обоих N-приборов.

Для негатрона с модуляцией тока базы (рис. 2, а) зависимость имеет сходство со спектром поглощения обычного кремниевого фототранзистора, так как увеличение фототока в модулирующем транзисторе T_2 (см. рис. 1, а) приводит к росту тока коллектора негатрона в целом. Для негатрона с шунтированием эмиттерного перехода (рис. 2, б) снижение тока максимума выходной ВАХ обусловлено возрастанием шунтирования цепи база—эмиттер выходного транзистора T_1 транзистором T_2 (см. рис. 1, б) [1—3]. Полученные спектральные характеристики позволили выбрать в качестве источника излучения диод У-226Б, длина волны максимума излучения которого составляет 870 ± 10 нм, мощность излучения 50 мВт при напряжении не более 2 В. Дифференциальное сопротивление на

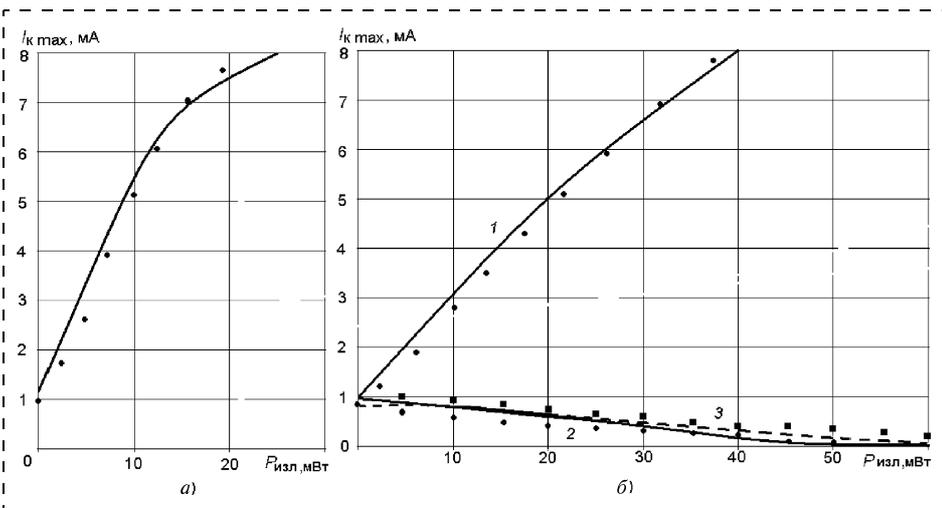


Рис 3. Зависимости тока максимума N-транзисторов от мощности ИК излучения: а — с модуляцией тока базы, $U_{бэ} = 0,7$ В; б — с шунтированием эмиттерного перехода, $U_{бэ} = 0,5$ В; 1 — при облучении транзистора T_1 ; 2 — при облучении транзистора T_2 ; 3 — при облучении транзисторов T_1 и T_2 ; ■, ● — экспериментальные данные; — — — — схематическое моделирование

линейной части прямой ветви светодиода У-226Б составляет $r_g = 0,6$ Ом, что позволяет использовать этот диод в импульсном режиме. Диапазон рабочих температур находится в пределах от -40 до $+70$ °С [4].

Зависимости тока максимума от мощности ИК излучения линейны на участке от 0 до 15 мВт для первого типа негатрона (рис. 3, а) и практически линейны для второго N-прибора в диапазоне от 0 до 40 мВт (рис. 3, б). Напряжение пика меняется линейно с ростом мощности источника излучения для негатронов как с модуляцией тока базы (рис. 4, а), так и с шунтированием эмиттерного перехода (рис. 4, б).

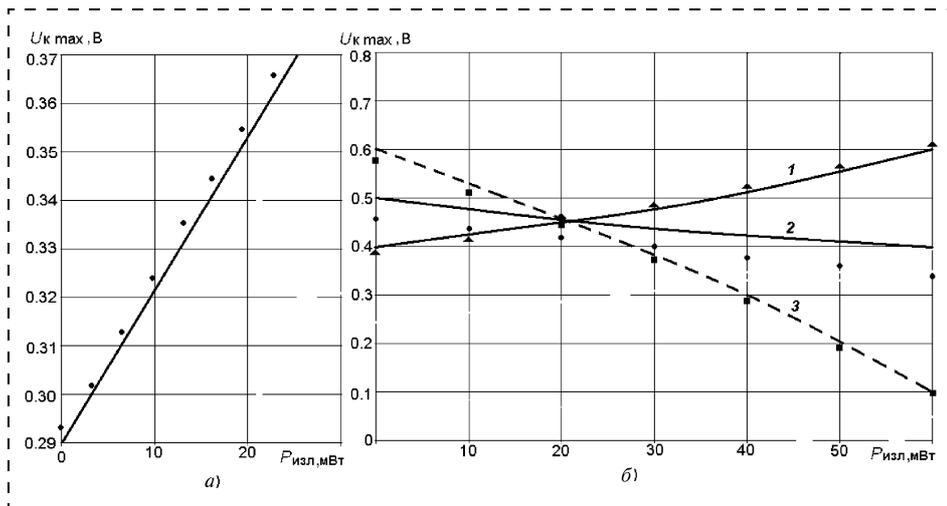


Рис. 4. Зависимости напряжения максимума N-транзисторов от мощности ИК излучения: *a* — с модуляцией тока базы, $U_{бэ} = 0,7$ В; *б* — с шунтированием эмиттерного перехода, $U_{бэ} = 0,5$ В; 1 — при облучении транзистора T_1 ; 2 — при облучении транзистора T_2 ; 3 — при облучении транзисторов T_1 и T_2 ; ●, ▲, ■ — экспериментальные данные; — — результаты схемотехнического моделирования

Передаточные характеристики оптронов при различных температурах (рис. 5) получены в результате моделирования при использовании опто-термических моделей оптронов, построенных в пакете моделирования Orcad 10 аналогично рассмотренным в [5].

При создании оптрона на основе фоточувствительного N-прибора с шунтированием эмиттерного перехода оптимальной является двухходовая конструкция с двумя независимыми источниками

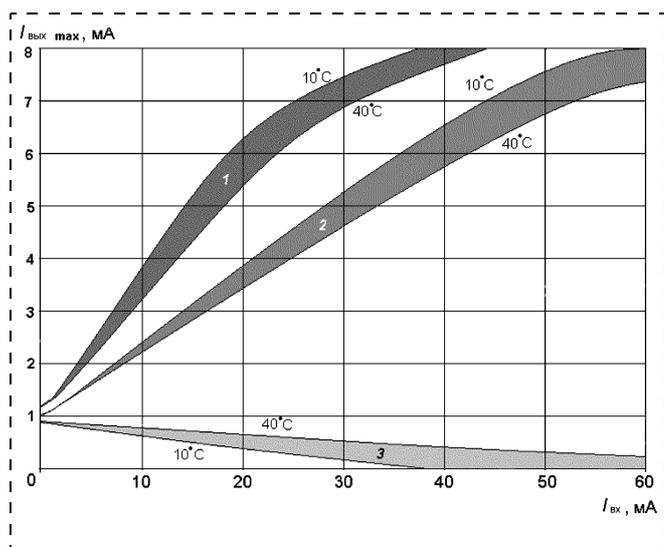


Рис. 5. Передаточные характеристики N-транзисторных оптронов при изменении температуры от 10 до 40 °С:

1 — негатрон с модуляцией тока базы, $U_{бэ} = 0,7$ В; 2 — негатрон с шунтированием эмиттерного перехода при облучении T_1 ; 3 — негатрон с шунтированием эмиттерного перехода при облучении T_1 и T_2 , $U_{бэ} = 0,5$ В

ИК излучения, каждый из которых связан оптически с одним из транзисторов T_1 или T_2 (см. рис. 1). В этом случае, модулируя токи двух светодиодов, возможно осуществлять изменение выходной ВАХ оптрона как в сторону увеличения тока максимума, так и в сторону его уменьшения вплоть до полного спрямления N-участка на ВАХ. Конкуренции процессов увеличения тока пика за счет фотогенерации и процесса шунтирования в таком N-приборе приводит к увеличению требуемой мощности излучения ИК диодов (см. рис. 3, 4) по сравнению с негатроном с модуляцией тока базы, в котором процессы фотогенерации в транзисторах T_1 и T_2 ведут

к увеличению тока пика до некоторого порогового значения, после которого исчезает N-участок, и ВАХ выходной цепи прибора становится подобной ВАХ обычного биполярного фототранзистора [2]. Конструктивно рассмотренные оптроны могут быть выполнены как с открытыми, так и с закрытыми оптическими каналами.

Рассмотренные N-транзисторные оптроны позволяют также реализовать режим управления выходным сигналом при одновременном воздействии оптического и электрического (в цепи базы) сигналов на негатрон.

Очевидно, что описанные типы оптронов включают в себя все преимущества N-приборов: встроенная защита выходного транзистора от перегрузок, широкие возможности применения в генераторных и цифровых электронных схемах, а также в микрооптосистемной технике.

Список литературы

1. Каштанкин И. А., Гурин Н. Т. Фоточувствительные кремниевый биполярный N-прибор с управляемой вольт-амперной характеристикой // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. № 13. С. 46—49.
2. Каштанкин И. А., Гурин Н. Т. Фоточувствительные кремниевые биполярные N-приборы с управляемой вольт-амперной характеристикой // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 6. С. 39—42.
3. Каштанкин И. А., Гурин Н. Т. Динамические характеристики фоточувствительных биполярных N-приборов с управляемой вольт-амперной характеристикой // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 10. С. 35—39.
4. Коган Л. М. Светодиоды с повышенной мощностью излучения // Светотехника. 2000. № 2. С. 16—19.
5. Каштанкин И. А., Гурин Н. Т. Температурные характеристики биполярных N-приборов с управляемой вольт-амперной характеристикой // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 6. С. 41—43.

УДК 802.0(075.8)

К. Д. Яшин, канд. техн. наук, доц.,
Белорусский государственный радиотехнический
университет (г. Минск),
Е. В. Лацапнёв, аспирант
Белорусского национального технического
университета (г. Минск)

АНГЛО-РУССКИЙ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК ПО МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ

Даны термины и наиболее широко употребляемые словосочетания и аббревиатуры по микро- и наносистемной технике, а также технологии их изготовления.

I

Implantation — имплантация. От латин. "сажание внутрь". В технологии микрообработки ионной имплантацией называют процесс внедрения в приповерхностные области какой-либо мишени ионизированных атомов. См. также *Ion implantation*. Управляемое ионное легирование полупроводников бором, фосфором, кислородом, мышьяком, сурьмой и другими примесями очень широко применяется в микроэлектронном и МЭМС-производстве. Глубина залегания имплантированной примеси пропорциональна энергии внедряемых ионов. Основные преимущества ионной имплантации: точное управление числом внедряемых атомов примеси; легкое управление профилем распределения внедренных ионов по глубине мишени (подложки); маски для ионной имплантации могут быть изготовлены из любых материалов, используемых в производстве СБИС и МЭМС (фоторезист, оксиды, нитриды, поликремний, металлические пленки и т. д.); можно воспроизводимо получать малые и сверхмалые глубины залегания $p-n$ -переходов, что чрезвычайно важно для повышения вертикальной степени интеграции микроизделий. Процесс ионной имплантации, проводимый в вакууме, относится к категории чистых и сухих процессов. В биосистемах имплантацией называется прикрепление зародыша к стенке органа, где он будет в дальнейшем развиваться, что обеспечивает его питание.

Impurity — примесь. Любое инородное вещество, включенное в структуру микроизделия. Примесью может быть как специально введенная легирующая примесь, так и нежелательный загрязнитель. Преципитаты примесей (или легирующих

элементов) образуют дефекты кристаллической структуры. Поясним. Каждая примесь, введенная в решетку, имеет предельную растворимость в ней, т. е. концентрацию, до которой решетка может принять в свой твердый раствор эту примесь. Для большинства примесей при понижении температуры растворимость уменьшается. Поэтому, если примесь вводится при температуре T_2 с максимальной концентрацией, определяемой пределом растворимости этой примеси при данной температуре, то при охлаждении до более низкой температуры T_1 в решетке возникает состояние пересыщения. Кристалл возвращается в равновесное состояние путем выделения примесных атомов, превышающих уровень растворимости. Избыток примесных атомов переходит в другую фазу — преципитат. В общем случае преципитаты нежелательны, так как являются источниками дислокаций. Элементы I и VIII групп периодической системы являются быстродиффундирующими примесями в кремнии. Они образуют глубокие уровни в запрещенной зоне и захватывают на этих уровнях носители заряда. Это приводит к уменьшению времени жизни неосновных носителей заряда и к увеличению токов утечки обратно смещенных $p-n$ -переходов. В то же время золото и платина используются, например, для снижения времени срабатывания переключающих транзисторов.

Inductively coupled plasma — индуктивно связанная плазма. Так называют системы плазменного травления, которые используют ВЧ энергию посредством применения катушки индуктивности, установленной на внешней стороне кварцевого реактора. ВЧ энергия используется в сочетании с низконапорным (низкое давление) газом. Как и реактивно-ионное травление, этот технологический процесс плазменного травления протекает при низком давлении, но с большой концентрацией ионов.

Inductor — индуктор, катушка индуктивности. Индуктор — электромагнитное устройство для индукционного нагрева тел вихревыми токами. Индукционный нагрев — нагрев тел путем возбуждения в них электрических токов переменным электромагнитным полем. Для создания последнего используются токи низкой (50 Гц), средней (до 10 кГц) и высокой (свыше 10 кГц) частоты. Индукторы применяются в технологических установках для плавления полупроводников; в эпитаксиальном оборудовании; в некотором оборудовании для плазменных операций и др. Взаимная индукция — это частный случай электромагнитной индукции: переменный ток в одном контуре индуцирует (наводит) ток в другом контуре, неподвижном относительно первого. Катушка индуктивности — это катушка из

провода с изолированными витками. Обладает значительной индуктивностью при относительно малой емкости и малом активном сопротивлении. Применяется: в качестве одного из основных элементов электрических фильтров и колебательных контуров; накопителя электрической энергии; источника магнитного поля и др. Индукция в нано-биоинформационных системах — это взаимодействие возбуждения и торможения. Торможение в одной группе нейронов вызывает (индуцирует) возбуждение в другой группе. Возбуждение — это положительная индукция, торможение — отрицательная индукция.

Inertial sensor — инерционный сенсор. Микроустройство, которое определяет изменение инерции тела, к которому оно присоединено, и преобразует это изменение во входной сигнал системы накопления информации. Два основных типа подобных устройств — это акселерометры и микрогирометры. Основная рабочая характеристика гироскопа — это диапазон измерения угловой скорости, а акселерометра — диапазон измеряемых ускорений. Инерция (инертность) в механике — это свойство тела сохранять состояние равномерного прямолинейного движения или покоя, когда действующие на него силы отсутствуют или взаимно уравновешены. При действии неуравновешенных сил инерция проявляется в том, что тело изменяет свое движение постепенно и тем медленнее, чем больше его масса, являющаяся мерой инерции тела. Используются инерционные сенсоры: в автомобилях; роботах; системах навигации и т. д. Основные производители инерционных сенсоров: Summit Instruments, Inc. (США); Xsens Technologies (Нидерланды); Analog Devices (США); O-Navi (США).

Infrared — инфракрасное (излучение). Электромагнитное излучение, имеющее длину волны в диапазоне от 700 нм до 1,5 мкм. Таким образом, оно имеет большую длину волны и меньшую частоту, чем видимое красное излучение. Примеры применения: ИК нагрев микроизделий или полупроводниковых пластин; ИК датчики (сенсоры) и др.

Inhomogeneous — неоднородная. Неоднородная, негомогенная система — противоположность гомогенной системы (см. *Homogeneous*). Пример понятия: неоднородное распределение примеси в полупроводнике. Гетероэпитаксиальная структура для НЕМТ-изделий — вот другой пример негомогенной (неоднородной) системы.

Insulator — изолятор. Кроме того, в англоязычной технической литературе таким словом обозначают: диэлектрик, изолирующий слой или электроизоляционный материал. Это вещество с очень большим удельным электрическим сопротивлением (диэлектрик); микроструктура или микроустройство, предотвращающие образование электриче-

ских контактов между металлизированными дорожками (или слоями); в биомикротехнологии — защитный бокс для изоляции источников инфекции.

Integrated chemical analyzing system — интегральная система химического анализа. Это микрохимическая система анализа, которая интегрирует в себе химические сенсоры и элементы контроля жидкости. Эти изделия коммерчески доступны для потребителя. Пример: микросистема химического анализа, состоящая из двух интегральных подсистем, а именно, подсистемы мониторинга газа в крови и хроматографической подсистемы. Первая подсистема анализирует уровень рН микропроб крови, периодически получаемых из тела. Одна из известных конструкций этой подсистемы (подсистемы мониторинга газа в крови) включает в себя: микроклапан; полевой транзистор, чувствительный к ионам водорода (англ. — рН-ISFET \Rightarrow рН-Ion Sensitive Field Effect Transistor); другие компоненты на кремниевой подложке. Во второй подсистеме (хроматографической) разделение и анализ определенных компонентов пробы основаны на разной адсорбционной способности этих компонентов.

Integrated Circuit (IC) — интегральная схема (ИС). Это электронная схема. Включает от нескольких штук до миллиарда микроскопических компонентов, сформированных на твердотельной подложке как единое целое. Интегральная микросхема представляет собой микроминиатюрное электронное устройство, элементы которого нераздельно связаны (объединены) конструктивно, технологически и энергетически. Различают интегральные микросхемы: полупроводниковые (другое название — монолитные), многокристальные, пленочные и др. По виду обрабатываемого сигнала ИС делятся на цифровые, аналоговые и смешанные. Цифровые ИС могут содержать от одного до миллионов логических вентилях, триггеров, мультиплексоров на площади в несколько квадратных миллиметров. Аналоговые ИС — это операционные усилители, активные фильтры, демодуляторы, микшеры (смесители) и т. д. Современные технологии позволяют получать полупроводниковые подложки для изготовления ИС с диаметром 300 мм (12 дюймов) и достигать размеров минимальных топологических элементов ИС до 65 нм. Список основных производителей: Alcatel (Франция), AMD (США), Analog Devices (США, Германия), ATI Technologies (США), Atmel (США), IBM (США), Intel (США), National Semiconductor (США), Nordic Semiconductor (Норвегия), NEC Corporation (Япония), NVIDIA (США), Philips (Голландия), Renesas Technology Corp (Япония), Rohm (Япония), SmartCode Corp (США), STMicroelectronics (Швейцария), Texas Instruments (США), VIA Technologies (Тайвань), Xilinx (США), Ангстрем (Россия), Микрон (Россия), Интеграл (Белоруссия).

Integrated mass flow controller — интегральный контроллер массового расхода (газов). Это микроустройство для контроля расхода газового потока. Интегрирует в себе микроклапаны с микрорасходом газа, изготовленными в одном чипе методом микрообработки. Пример некоторой конструкции: микроклапан состоит из кремниевой и стеклянной подложек, соединенных друг с другом; кремниевая подложка подвергается микрообработке для получения порта (отверстия), открывающегося и закрывающегося микродиафрагмой; стеклянная подложка подвергается микрообработке для формирования впускного и выходного отверстий; диафрагма управляется пьезоэлектрическим или электростатическим микроактюатором. Разработаны различные типы конструкций микроклапанов, например, трехходовой микроклапан. Часто используется тепловой тип сенсора потока, который определяет снижение температуры нагревателя из-за изменения газового потока. Современные исследования и разработки сконцентрированы на управлении потоком газа на молекулярном уровне. Это необходимо для применения подобных микроустройств в полупроводниковом производстве, требующем использования газов сверхвысокой степени чистоты.

Integrated MicroElectroMechanical Systems (IMEMS) — интегральные микроэлектромеханические системы. Интегральные МЭМС — так называют производственный процесс, разработанный научно-исследовательским институтом SNL (Sandia National Laboratories, США). Технология позволяет совместить на одном чипе: КМОП-устройства управления и микроэлектромеханические узлы. История развития технологии заключается в следующем. В ранних проектах вначале на чипе изготавливались КМОП СБИС управления, а затем микромеханизмы (МЭМС-узлы). Возникал ряд тупиковых противоречий: алюминий не выдерживал механических нагрузок в объемных микроконструкциях; использование же вольфрамовых межсоединений приводило к изменению профилей легирования и деградации полупроводниковых структур КМОП-схем. Тупиковым был и другой путь, когда МЭМС-узлы изготавливались не после, а перед формированием КМОП-схем. Удачным компромиссным техническим решением стала разработанная SNL-фирмой IMEMS-технология. Она предполагает формирование микромеханических узлов в углублениях, точнее — в канавках кремниевого слоя. Именно этот прием позволил создавать МЭМС-узлы до начала изготовления КМОП СБИС управления. IMEMS-технология реализует многочисленные преимущества микроэлектроники. Теоретически технология позволяет совмещать ее процессы с базовыми технологическими процессами изготовления микросхем управления на схемах:

КМОП, биполярных, БиКМОП, КМОП/КНС, КМОП/КНИ, A_3B_5 и др. В технической англоязычной литературе IMEMS-технология (КМОП/МЭМС) называется — SUMMiT (Sandia Ultra-planar Multi-level MEMS Technology). Можно встретить другое название SUMMit-V (пятиуровневая микроструктура). Технологию SNL широко применяют производители КМОП/МЭМС-изделий: BSAC (Berkeley Sensor and Actuator Center, США), Analog Devices (США, Германия), Motorola, Inc. (США) и др.

Integrated microprobe — интегральный микрозонд. Это микроустройство, полученное методами кремниевой микрообработки. Выполнено в виде ультрамикроскопической иглы и встроенной схемы обработки сигнала. Микрозонды имеют диаметр от нескольких нанометров до нескольких микрометров. В качестве схемы обработки сигнала используется схема преобразования импеданса. Интегральный микрозонд имеет следующие особенности: малая площадь контакта с измеряемым объектом; малое влияние измеряемого объекта на микрозонд; более высокий коэффициент "сигнал—шум" при измерении; может быть получено больше данных о малых локальных участках измеряемого объекта. Интегральный микрозонд используется как микроскопический электрод: для сканирующих туннельных микроскопов; для атомных силовых микроскопов; для экспериментов на живых организмах.

Integrated optics — интегральная оптика. Оптическая схема (сеть, канал) со встроенными оптическими компонентами, такими как светоизлучатель, фотоприемник, модификатор и световод. Оптическая схема создается с помощью производственного микроэлектронного процесса. Особенно часто используется технология осаждения многослойных тонких пленок, включая технологию "кремний на изоляторе" (англ. — SOI, *silicon on insulator*). Оптическая микросистема преобразует оптический сигнал в электрический сигнал, затем после обработки электрического сигнала снова преобразует его в оптический сигнал. Впрочем, микроустройства интегральной оптики совершают обработку сигнала непосредственно в оптической интегральной схеме. За счет этого существенно уменьшаются размеры, масса микроаппаратуры, происходит экономия энергии и увеличивается скорость обработки информации.

Integrated strain sensor — интегральный тензодатчик. Тензодатчик с расположенной на единой подложке микросхемой обработки сигналов. Микроизделие относится к тензодатчикам, обладающим механически деформирующимся элементом и элементом обнаружения напряжения, встроенными в единую подложку.

Intelligent sensor — интеллектуальный сенсор. Сенсор, обладающий такими передовыми свойствами, как самокалибровка, самодиагностика и способность компенсировать изменения во внешней среде. Ключевой момент в данных сенсорах — это обладание достоверной информацией, исходя из которой сенсор может обеспечивать истинность измерения и возможность взаимодействия с другими интеллектуальными устройствами. Такой сенсор должен обладать свойством компенсации, т. е. способностью обнаруживать и вырабатывать ответную реакцию на изменения во внешних условиях посредством самодиагностики, самокалибровки и адаптации. Информационная обработка охватывает обработку данных, заключающуюся в улучшении и интерпретации собранных данных и максимизации эффективности системы, через формирование сигнала, сжатие данных, обнаружение событий и принятие решения. Она также может содержать набор методов фильтрации и других методов, таких как продвинутое обучение для обеспечения интерфейсу связи наиболее релевантных данных. Интерфейс связи должен обладать стандартизированным сетевым протоколом, который может объединять интеллектуальные сенсоры в распределенную информационную систему. Еще одна особенность интеллектуального сенсора — это объединение на одном кристалле как чувствительного элемента, так и системы обработки сигнала. К интеллектуальным сенсорам и их системам можно отнести: "электронный" нос; "электронный" язык; "умный" дом; "интеллектуальный" унитаз и т. д.

Interconnect, interconnection — межсоединение (электрическое), разводка (электрическая). Представляет собой металлический или поликремниевый рисунок на микроизделии. Межсоединение (разводка) электрически связывает элементы (например, транзисторы), подает питание и распределяет электрические данные по всей электронной схеме. Дальнейшее развитие технологических схем и функциональных возможностей микроизделий в большой степени связано с разработкой структур многослойных межсоединений. Возрастание сложности микроизделий приводит к тому, что большая часть площади кристалла занята межэлементной разводкой. Два независимых уровня межсоединений как бы естественным образом создаются в микроизделиях на полевых МОП-транзисторах: это слой с затворами на основе тугоплавких металлов и слой "обычной" металлизации. В качестве первого уровня металлизации может служить поликремний, покрытый пленкой силицида. К преимуществам многоуровневых металлизированных межсоединений следует отнести существенное уменьшение размеров кристалла. Формирование микроизделия с использованием четырех уровней

металлизации сокращает площадь, занимаемую микроизделием, почти в 2 раза по сравнению с микроизделием с тремя уровнями металлизации. Недостатками такой технологической схемы является усложнение технологического процесса и снижение выхода годных микроизделий. Последнее связано с необходимостью введения дополнительных фотолитографических слоев.

Interferometer — интерферометр. Аппаратура, которая собирает две или более электромагнитные или звуковые волны. Волны испускаются одним источником, но они идут разными путями для получения интерференции между ними. Таким образом, это оптический прибор и принцип его действия основан на интерференции света. Применяется: для измерения длин волн и структуры спектральных линий; для измерения показателей преломления прозрачных сред (например, тонких диэлектрических пленок SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 и др.); для измерения дефектов отражающих поверхностей; для высокоточных измерений длин. С применением интерферометрии можно измерять толщину диэлектрических пленок. Метод автоматизирован для использования в промышленном полупроводниковом производстве. Этот метод нельзя использовать для измерения толщины диэлектрических пленок менее 400 нм. Распространены следующие интерферометры: интерферометр Майкельсона; интерферометр Гваймана—Грина; интерферометр Физо; интерферометр сдвига; интерферометр Маха—Цандера; интерферометр Фабри—Перо.

Interlevel planarization — межуровневая планаризация. Это планаризация, выполняемая после осаждения каждого слоя металла или диэлектрика в ходе процесса производства интегрального чипа. Так как размеры транзисторов уменьшаются, то плоские поверхности и, следовательно, планаризация требуются на каждом шагу, на каждом уровне технологического процесса. Это необходимо для гарантирования точности литографического процесса. Эту точность определяет каждый новый слой металла или межсоединение, построенное над металлическим слоем.

Intrinsic — беспримесный (о полупроводнике) или собственный (об электропроводности). Беспримесный — чистый полупроводник, чья электрическая проводимость зависит только от температуры окружающей среды и энергии ширины запрещенной зоны, а не от внешних легирующих примесей.

Ion — ион (от греч. "идущий"). Электрически заряженная частица, образующаяся в результате потери или присоединения одного или нескольких электронов атомами или молекулами. Заряд иона кратен заряду электрона. Понятие и термин ион ввел в 1834 г. Майкл Фарадей (Англия). Фарадей, изучая действие электрического тока на водные

растворы кислот, щелочей и солей, предположил, что электропроводность таких растворов обусловлена движением ионов. Положительно заряженные ионы, движущиеся в растворе к отрицательному полюсу (катоде), Фарадей назвал катионами, а отрицательно заряженные, движущиеся к положительному полюсу (аноду), — анионами. В виде самостоятельных частиц они встречаются во всех агрегатных состояниях вещества — в газах (в частности, в атмосфере), в жидкостях (в расплавах и в растворах), в кристаллах. Применительно к растворам различают понятия: ионная сила раствора, ионный обмен, иономеры и др. Применительно к твердым веществам различают понятия: ионная связь, ионные радиусы, ионнообменные смолы и др. Применительно к технологии микрообработки различают понятия: ионная откачка, ионная эмиссия, ионное внедрение, ионное травление, ионный источник, ионный пучок, ионный микроскоп и др. (например, см. *Ion beam etching*).

Ion beam etching — ионно-лучевое травление. Процесс травления, который использует ионы для бомбардировки материала и физического выбивания молекул из мишени (подложки). Ионное травление — удаление вещества с поверхности твердого тела в результате ионной бомбардировки; позволяет выявить структуру поверхности твердого тела. В технической и иной литературе часто не делают различия в названиях и методах так называемого сухого травления. Требуется разъяснения. Сухое травление часто называют также плазменным травлением, хотя сухое травление — это намного более широкое техническое понятие. Плазменное травление может осуществляться разными методами: ионным травлением и методами реактивного травления. Методы ионного травления включают: ионно-лучевое травление и ионно-плазменное травление. Процесс ионного травления происходит исключительно по механизму физического распыления. Реактивные методы травления включают: реактивное собственно плазменное травление, реактивное ионно-лучевое травление и реактивное ионно-плазменное травление. Реактивные методы основаны на сочетании химических реакций (в ходе которых образуются летучие соединения) и физических взаимодействий, таких как ионная бомбардировка. При переводах английских текстов надо внимательно следить, о каких методах травления идет речь. Методы различаются между собой физико-химически, технологически и аппаратно. Из всех перечисленных выше методов наибольшее распространение в полупроводниковой технологии микрообработки получил метод реактивного ионно-лучевого травления. Часто для сокращения (не совсем правильно и не совсем удачно) его называют просто ионно-лучевым травлением. Это неправильно, поскольку при ионно-

лучевом травлении используют ионы инертных газов, например Ar^+ , а при реактивном ионно-лучевом травлении вместо инертных газов типа аргона источником ионов служат молекулярные газы, содержащие один или более атомов галогенов в своих молекулах. Примеры таких газов: CF_4 , SF_6 , NF_3 , Cl_2 , CCl_4 , CCl_3F , CCl_2F_2 , $CClF_3$, C_2F_6 , C_3F_8 , CHF_3 , $SiCl_4$, BCl_3 и др.

Ion beam machining — ионно-лучевая обработка. Процесс обработки материалов, основанный на их распылении ускоренным ионным лучом. При использовании этого английского выражения со словом *machining* авторы технических статей хотят обратить внимание, что методы ионно-лучевой обработки использовались не просто для создания микроэлектронных структур, а именно для создания 3Д-микроструктур (в МЭМС- и НЭМС-технологии). Это некоторое обобщенное название определенных технологических приемов. Различают обработку материалов в локальных областях. Это обработка материалов с использованием предварительно нанесенных на них масок (шаблонов) или с использованием микрокоординатной системы фокусирования и управления ионными лучами. Кроме того, различают обработку всей поверхности материала в целях его утонения или модификации структуры поверхности, а также в целях удаления с поверхности ненужных загрязнений или слоев (пример: удаление уже ненужного фоторезиста или его остатков, удаление остатков уже ненужного ванадия и др.). Различают следующие виды ионно-лучевой обработки: окисление, модифицирование структуры поверхности, травление и др. Очень широко используется ионно-лучевое травление (см. *Ion beam etching*). Высокие требования к точности переноса фотолитографических рисунков удовлетворяются при использовании некоторых методов плазменного травления, обеспечивающих высокую анизотропность травления. Эти методы обеспечивают высокую анизотропию травления, что позволяет жестко контролировать размеры вытравливаемых элементов. Процессы травления, применяемые для переноса рисунков в технологии микрообработки, должны быть в высокой степени селективными. Методы сухого плазменного травления, основанные на использовании газов, в состав которых входят реакционноспособные компоненты, наилучшим образом обеспечивают требования, предъявляемые к селективности. В качестве источников ионов используется газы аргон Ar и криптон Kr , но могут применяться и другие газы.

Ion beam milling — ионно-лучевое фрезерование. Это очень широкая формулировка различных технологических приемов микромеханической обработки материалов. Возможны следующие понятия: ионное микрофрезерование; микрообработка с использованием установки ионного фрезерования;

ионно-химическое микрофрезерование; реактивное ионное микрофрезерование. Сюда же совершенно свободно можно отнести следующие понятия: реактивное ионное травление; химическое травление; ионное травление; ионно-лучевое дробление крупных частиц на мелкие; ионно-лучевое размывание (размол). Таким образом, один из вариантов перевода будет означать: это процесс физического удаления ненужного (незащищенного) материала с поверхности полупроводника посредством ионной бомбардировки. Для лучшего понимания смысла нелишне напомнить, что традиционно в металлообработке фрезерование — это обработка материала резаньем. В традиционной металлообработке фреза совершает вращательное, а заготовка — поступательное движение. При этом в технологии микрообработки различают фрезерование (собственно микрорезание): ионное, лазерное, химическое, а также с использованием микрофрез.

Ion implantation — ионная имплантация. Технология внедрения в полупроводниковый материал ионизированных атомов (ионов), разогнанных в электрическом поле и обладающих энергией, достаточной для проникновения в приповерхностные области полупроводникового материала. Этот процесс намного более точен, чем диффузионный метод легирования. Аналогичное понятие — ионное внедрение. Это введение посторонних (примесных) атомов внутрь твердого тела путем бомбардирования его ионами. Это способ легирования полупроводников (см. *Implantation*). Ионная имплантация применяется практически на каждой стадии легирования в технологии микрообработки при изготовлении СБИС, МЭМС- и НЭМС-изделий. Установка имплантации состоит из следующих основных компонентов: 1) газовый источник вещества (для имплантации бора это может быть BF_3 или B_2H_6 , фосфора — PH_3 , мышьяка — AsH_3 и т. д.); газовый источник находится под высоким напряжением; 2) источник ионов, содержащий ионную плазму частиц As^+ , B^+ , BF_2^+ , P^+ и др. при давлении ~ 1 Па или меньше; 3) насос для создания низкого давления, обеспечивающий перемещение ионов с малым рассеянием ионизированного газа; 4) магнитный анализатор ионов по массе, отбирающий только нужные частицы; 5) разрешающая щель (апертурная диафрагма), через которую проходят ионные частицы и затем попадают в ускоряющую трубку; 6) ускоряющая трубка, после прохождения которой ионный пучок подготовлен к бомбардировке мишени; 7) отклоняющие пластины, к которым приложено пилообразное напряжение, для сканирования ионного пучка и обеспечения однородности внедрения ионов по площади мишени; 8) камера с мишенями (полупроводниковыми пластинами).

Ion plating — ионное осаждение. Другое название — ионное нанесение покрытия (слоя). Пример: ионное осаждение металлизированных или диэлектрических слоев. Это осаждение из газовой фазы, при котором газообразные частицы ионизированы или возбуждены в плазме. Осаждение веществ осуществляется на подложку. Исходную кинетическую энергию газообразные частицы приобретают вследствие прохождения через электрическое поле. Эта комбинированная технология объединяет традиционное вакуумное осаждение материалов и более современную плазменную технологию. В традиционном процессе вакуумного осаждения большинство частиц, которые достигают подложку, — нейтральны. В нашем методе частицы являются: ионами; возбужденными частицами; радикалами с внутренней и кинетической энергией. Поэтому по сравнению с вакуумным осаждением структура и свойства осажденных описываемым методом пленок являются намного более сложными и обладают более высоким качеством. Так как скорость осаждения пленок достаточно высока и пленки обладают высоким качеством, этот метод активно используется вместо нанесения покрытия методом традиционного вакуумного осаждения, особенно при формировании пленок из непроводящих материалов.

Ion Sensitive Field Effect Transistor (ISFET) — полевой (канальный, униполярный) транзистор, чувствительный к изменению концентрации ионов. Полупроводниковый сенсор, интегрирующий электрод, чувствительный к ионам, и полевой транзистор. На участке, содержащем электрод, чувствительный к ионам, напряжение на мембране изменяется в соответствии с флуктуациями pH или парциальным давлением углекислого газа в крови. В качестве усилителя напряжения используется полевой транзистор. Полевой транзистор — полупроводниковый прибор, в котором ток изменяется в результате действия, перпендикулярного току электрического поля, создаваемого входным сигналом. Протекание в полевом транзисторе рабочего тока обусловлено носителями заряда только одного знака (электронами или дырками), поэтому такие приборы называются униполярными (в отличие от биполярных). Канальный (полевой, униполярный) транзистор, чувствительный к изменению концентрации ионов, изготавливается по кремниевой технологии микрообработки. Интегральные детектор (сенсор) и усилитель расположены на одной кремниевой подложке (на одном чипе). Подобные микроустройства используются в биомедицинском микроанализе и в устройствах контроля окружающей среды.

Ionized metal plasma physical vapor deposition — физическое осаждение металлов из ионизированной газовой плазмы. Процесс формирования ме-

таллизации напылением, при котором металл ионизируется в ВЧ плазме и ионы металла текут по строго направленной траектории для получения конформного покрытия микроструктур с высоким характеристическим отношением.

Ionic bond — ионная связь. Тип химической связи, обусловленной переносом валентных электронов с одного атома на другой с образованием положительных и отрицательных ионов и электростатическим (кулоновским) взаимодействием между ними. Ионную связь можно рассматривать как предельный случай полярной ковалентной связи между атомами с сильно различающимися электроотрицательностями. Ионная связь пространственно не направлена (сферически симметрична) и ненасыщаема, что приводит к стремлению каждого иона окружить себя максимальным числом ионов противоположного знака. Ионная связь характерна для соединений типичных металлов (например, щелочных) с типичными неметаллами (например, галогенами), образующих ионные кристаллы. Длины ионных связей составляют около 1,5–3,5 Å. Кристаллы с ионной связью при низких температурах являются диэлектриками. При температурах, близких к температуре плавления, вещества становятся проводниками электричества. Примером кристаллов с ионной решеткой являются кристаллы каменной соли (NaCl) с энергией ионных связей 410 кДж/моль, CsH — 170 кДж/моль, LiF — 570 кДж/моль.

Isolation — изоляция. Широкое понятие. Различаются: изоляция тепловая, изоляция электрическая; изоляция в микробиологии как возникновение барьеров (экологических, генетических, территориально-механических и др.); изоляция очагов инфекционных заболеваний и др. Пример тепловой изоляции — это защита трубопроводов от нежелательного теплового обмена с окружающей средой. Обеспечивается специальными покрытиями из теплоизоляционных материалов. Пример: термоизоляция трубопроводов, по которым в реактор поступают пары металлоорганических соединений (пример касается оборудования и технологии A_3B_5 -, A_2B_6 -эпитаксии из газовой фазы. Электрическая изоляция — разделение проводников тока диэлектриком в целях предотвращения их непосредственного контакта или электрического пробоя между ними; различные средства, обеспечивающие такое разделение (слой диэлектрика, вакуумный промежуток, изделие из диэлектрического материала). В микротехнологии изоляция — это электрическое разделение между разными областями микроизделия. Примеры: изоляция оксидом (изопланарная изоляция), изоляция $p-n$ -переходом (коллекторная изоляция) и др.

Isolation diffusion — изолирующая (разделительная) диффузия. Метод получения изоляции по-

средством диффузии таким образом, что $p-n$ -переходы, окружающие данную область, становятся отделенными друг от друга. В более ранних технологических схемах электрическая изоляция биполярных ИС основывалась на обратно смещенных $p-n$ -переходах, которые располагались вокруг активных областей. Способ изоляции $p-n$ -переходом требует больших затрат площади ИС и сопровождается большими паразитными емкостями по сравнению с методом изоляции оксидом.

Isotropic — изотропный. Изотропия — это независимость свойств физических объектов от направления. Характерна для жидкостей, газов и аморфных состояний твердых тел. В технологии микрообработки есть понятия "изотропный травитель", "изотропное травление". При равенстве вертикальной и горизонтальной скоростей травления (более точно — когда скорость травления не зависит от направления) к концу процесса травления формируется профиль края, имеющий контур четверти окружности. В этом случае (т. е. при изотропном травлении) смещение равно удвоенной толщине пленки, подвергшейся травлению. К проблемам металлизации обычно относят также проблемы с травлением слоя металла. Так как металл подвергается нежелательному травлению под маской (под фоторезистом), то необходимо вводить поправку на уменьшение ширины линий в процессе литографического переноса топологического рисунка схемы из-за подтравливания металла. С уменьшением планарных размеров и сближением линий компенсация подтравливания металла становится физически невозможной. Таким образом, вместо изотропного травления необходимо использовать анизотропное травление. О других материалах. Тогда как кремний более подвержен химически изотропному травлению, травление SiO_2 происходит в основном анизотропно. Вся совокупность процессов плазменного травления может быть эмпирически также классифицирована на изотропные и анизотропные процессы (см. также *Isotropic etching*).

Isotropic etching — изотропное травление. Обработка материала травлением, при которой травление происходит во всех направлениях с равными скоростями (см. *Isotropic*).

Isovalent doping — изовалентное легирование. Это легирование полупроводников, при котором вводимая добавка является элементом, входящим в ту же группу Периодической системы Д. И. Менделеева, что и основной полупроводник. Например, изовалентное легирование индием арсенида галлия в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии при низкой температуре приводит к увеличению концентрации избыточного мышьяка, захватываемого в растущий эпитаксиальный слой.

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>).

Метаустойчивые состояния макромолекул внутри полимерного монослоя

Номер проекта: 99-03-33385
Год представления отчета: 2001

Построена строгая теория, описывающая поведение полимерной цепи на границе жидкость—жидкость с учетом возможных метастабильных состояний системы. Моделями служили: гауссова цепь и цепь случайных блужданий на простой кубической решетке. Граница раздела жидкость—жидкость моделировалась внешним потенциальным полем U Хевисайдской (ступенчатой) формы. Один конец полимерной цепи фиксировался на произвольном расстоянии Z от границы раздела.

Если конец цепи был фиксирован в области с высоким потенциалом, то полимерная молекула претерпевала фазовый переход первого рода из состояния хаотически свернутого клубка в состояние (цветка). Цветок имел сильно вытянутый (стебель), простирающийся от места закрепления конца до границы раздела, и (крону), располагающуюся в энергетически выгодной области и состоящую из оставшихся звеньев в конформации деформированного клубка.

Получено точное аналитическое выражение для функции Ландау и проанализирован фазовый переход клубок—цветок. Параметром порядка служила доля звеньев полимерной цепи, оказавшаяся в энергетически выгодной области. Построена фазовая диаграмма системы, связывающая критические значения параметров U и Z . Эта диаграмма состоит из линии фазовых переходов первого рода (линии бинадали), заканчивающейся в критической точке $U = 0$; $Z = 0$, и двух линий спинодалей. В областях между бинадалью и спинодалями существуют метастабильные состояния клубка и метастабильные состояния (цветка).

Аналитическая теория подтверждена численными расчетами для решеточных модельных цепей различной длины, учитывающих эффект конечной растяжимости макромолекулы при образовании

(стебля). С использованием скейлингового подхода проанализировано влияние эффектов исключенного объема на характеристики фазового перехода. Установлена связь между поведением макромолекулы близости границы раздела жидкость—жидкость и при адсорбции на твердую поверхность.

Санкт-Петербургская государственная химико-фармацевтическая академия

Фундаментальные основы окисления борсодержащих кластеров при горении

Номер проекта: 99-03-32122
Год представления отчета: 2002

Экспериментально исследованы закономерности воспламенения и горения борсодержащих кластеров $(C_2B_4H_2)_n$ размером 1—4 нм при относительно низких температурах 500—660 К и субатмосферном давлении кислорода. Кластеры синтезируются из молекул карборана $C_2B_4H_6$. Показано, что стадия собственно горения кластеров существенно короче стадии их воспламенения. Определено влияние размера кластеров, температуры и давления кислорода на длительность стадии воспламенения в условиях эксперимента. Изучены с применением квантово-химических ab initio методов элементарные реакции взаимодействия поверхностных фрагментов кластеров с молекулами кислорода и кислородсодержащими радикалами. Показано, что в реакциях происходит отрыв от поверхностных фрагментов борсодержащих радикалов и определены константы реакций. Предложена кинетическая схема и разработана математическая модель начальной стадии окисления кластеров. Модель позволяет рассчитывать воспламенение кластеров различного размера в широком диапазоне температур и давлений кислорода. Установлены температуры и давления, обеспечивающие воспламенение кластеров размером 1—10 нм в течение 1 мс и 1 мкс.

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук

Создание магнитного упорядочения спиновых систем на основе формирования двумерных оксидных наноструктур заданной топологии

Номер проекта: 99-03-32010
Год представления отчета: 2002

Проведена работа по теоретическому и экспериментальному обоснованию процесса структурирования вещества на наноуровне. Исследованы процессы сверхупорядочения твердого тела, т. е. образования (синтеза) упорядоченных распределений вещества определенного (нанометрового) размера и предлагаются подходы к описанию структур, имеющих различное пространственное распределение атомов синтезируемого вещества [обзор (18 стр.) в Ж. общей химии, 2002]. Исследована взаимосвязь между пространственным распределением атомов в объеме синтезированной оксидной наноструктуры и магнитными свойствами этих наноструктур. Изучена определенная последовательность поверхностных химических реакций на поверхности кремнезема и кремния и показана возможность синтеза оксидных наноструктур с высоким уровнем топологической организации — содержащих оксидные сверхструктуры с пространственными неоднородностями в синтезированной структуре. Обоснована возможность воспроизводимого синтеза двумерных оксидных наноструктур с заданной топологией атомов, содержащих чередующиеся монослои различных элементкислородных групп ($Zn_{2+}-O$ и $Fe_{3+}-O$, $Fe_{3+}-O$ и $Sn_{4+}-O$, $Cu_{2+}-O$ и $Fe_{3+}-O$, $Fe_{3+}-O$ и $Ti_{4+}-O$, $Ti_{4+}-O$ и $P_{5+}-O$). Проведена дополнительная теоретическая и экспериментальная работа, направленная на обоснование ранее выявленного нами (ДАН, 1997, 356) эффекта — существования двумерной области намагниченности при определенном количестве $Fe-O$ групп на поверхности диамагнитной (кремнезёмной) матрицы. Впервые выявлена возможность направленно регулировать тип магнитного упорядочения за счет чередования определенных по химическому составу элементкислородных надслоев ($Zn_{2+}-O$ и $Fe_{3+}-O$, $Fe_{3+}-O$ и $Sn_{4+}-O$, $Cu_{2+}-O$ и $Fe_{3+}-O$, $Fe_{3+}-O$ и $Ti_{4+}-O$) в оксидных наноструктурах с заданной топологией атомов. Проведено ЯГР-спектроскопическое исследование оксидных наноструктур на кремнии, содержащих чередующиеся монослои $Fe_{3+}-O$ и $Sn_{4+}-O$ групп, в том числе в варианте скользящей геометрии. Показана возможность методом транспортного восстановления тонко регулировать отношение Fe_{3+} и Fe_{2+} в железооксидных двумерных наноструктурах (нанослоях толщиной 3–15 Å) на кремнеземе. Предложен метод повышения термостабильности дисперсного металлического железа на кремнеземе на основе введения элементкислородного ($\Theta = W, Al, Mo$) монослоя в качестве подслоя на поверхности.

Самоподдерживающиеся волны в метастабильных физико-химических системах

Номер проекта: 99-03-32042
Год представления отчета: 2002

Проведено теоретическое исследование переходных режимов распространения волн в метастабильных средах, приводящих к смене типов самоподдерживающихся волновых структур. Исследовано управление процессом перехода горения в детонацию в гомогенных газовых и гетерогенных горючих смесях. В частности, рассмотрено влияние таких управляющих параметров, как геометрические характеристики канала, концентрация горючего в смеси, исходная температура смеси. Показано, что изменение значения одного из управляющих параметров может качественно менять характер зависимости переходных процессов от других определяющих параметров. Поэтому изучение управляющих воздействий при переходе горения в детонацию нуждается в продолжении.

Показано, что при инициировании детонации ударной волной в полидисперсной газокapельной смеси происходит значительное затухание ударной волны с образованием позади нее слоя повышенной концентрации конденсированной фазы. В отличие от аналогичных слоев, образующихся в инертных пылевоздушных смесях, в горючих смесях с диспергированной жидкой фазой максимум концентрации капель в слое несколько ниже и смещен ближе к ударной волне вследствие испарения и дробления капель в потоке за ударной волной. В случае успешного инициирования гетерогенной детонации ее выход на самоподдерживающийся режим осуществляется через моду пересжатой детонации аналогично случаю инициирования детонации в гомогенных газовых смесях.

Изучена роль неравновесных эффектов при испарении и дроблении капель горючего в гетерогенных смесях. Введен критерий, характеризующий степень отклонения системы от состояния равновесия. При изучении перехода горения в детонацию в гомогенных газовых смесях показано, что экспериментально наблюдаемая множественность сценариев при переходе горения в детонацию объясняется возникновением тепловых взрывов в горячих точках, образующихся в результате взаимодействия волн перед ускоряющимся турбулентным фронтом пламени. В зависимости от предыстории процесса и градиентов времен задержки воспламенения в окрестности горячей точки тепловой взрыв может привести либо к возникновению детонационной волны, либо к возникновению волны нормального горения.

Изучены аналогии волн горения и волн вскипания в метастабильных перегретых жидкостях, в ко-

торых скорость распространения волн определяется цепным механизмом дробления растущих паровых пузырьков. При наличии тепловых неоднородностей возможна смена режима медленного кипения на быстрый режим, сопровождающийся резким повышением давления.

Механико-математический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Водородсодержащие производные фуллеренов, фуллеридов металлов и углеродных нанотрубок: синтез, структура и свойства

Номер проекта: 99-03-32647
Год представления отчета: 2002

В целях направленного поиска новых водородсорбирующих составов и разработки новых методов синтеза водородсодержащих производных углеродных наноструктур исследовано взаимодействие с водородом фуллеренов, фуллеридов металлов, углеродных нанотрубок и графеновых нановолокон. Подробно изучена система $C_{60}-H_2$ (D2): синтезированы и исследованы новые кристаллические гидро- и дейтерофуллерены; установлена линейная зависимость параметра ГЦК решетки гидрофуллерита от содержания водорода; разработана методика получения фуллерита с расширенной ГЦК решеткой путем синтеза гидрофуллерита определенного состава и последующего дегидрирования; определена область существования гидрофуллеритов без разрушения фуллеренового каркаса. Установлено, что гидрирование фуллеридов металлов может происходить (в зависимости от температуры и давления) как с образованием их водородных производных, так и с их распадом с образованием гидрофуллеритов и металлических или гидридных фаз.

Освоены методики получения углеродных нанотрубок электродуговым испарением графит-металлических электродов и впервые — с использованием интерметаллических соединений.

Изучено влияние состава катализатора, газовой среды, режима поддержания дуги и условий предварительной обработки стержней на состав конденсированных продуктов испарения графита. Предложены новые каталитические системы, позволяющие повысить выход одностенных нанотрубок и регулировать их диаметр. Разработаны методики концентрирования и выделения одностенных углеродных нанотрубок программируемым термоокислением, травлением минеральными кислотами, ультразвуковой обработкой, центрифугированием и ультрафильтрацией. Освоен метод получения графеновых нановолокон пиролизом C_2H_2 и C_2H_4 на различных металлических катализаторах и впервые — с использованием гидридов интерметаллических соединений. Разработаны методики раскрытия торцов одностенных углеродных нанотрубок и пор графитовых нановолокон. Предложен набор методик для аттестации углеродных наноструктур.

Изучена обратимая сорбция водорода полученными углеродными наноструктурами и их композициями с гидридообразующими металлическими фазами. Выработаны рекомендации по направленному синтезу водородсорбирующих углеродных наноструктур. Проведен сравнительный анализ водородсорбционных характеристик углеродных наноматериалов и известных сорбентов водорода и сделан вывод о перспективности высокопористых углеродных нанотрубок и нановолокон для аккумуляции водорода.

Государственное учреждение Институт проблем химической физики РАН

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Компания BeSang разрабатывает трехмерные чипы памяти

Компания BeSang Inc. (США), малоизвестный производитель полупроводниковых чипов, 6 апреля 2006 г. объявила о начале разработки первой в мире нанопамяти по трехмерной архитектуре (3D memory technology).

Как утверждают представители компании BeSang, проект разрабатывается ими совместно с учеными из

Колледжа наноразмерных наук и инженерии (College of Nanoscale Science and Engineering — CNSE) из Университета Олбани. Трехлетняя программа стоимостью \$1,1 млн направлена на разработку и промышленное изготовление трехмерной кремниевой памяти.

Участие компании BeSang состоит в том, что она разрабатывает ядро памяти и ее структурную архитектуру для реализации 3D чипа. Сам чип будет представлять собой интегрированную кремниевую микросхему, на которой будут последовательно наращиваться слои чипа. У компании уже есть успешные раз-

работки в области архитектуры наноустройств. "Наша инновация состоит в новой технологии "плавающей памяти", позволяющей производить доступ к "ядру" памяти с очень высокой плотностью записи данных", — говорит Кеннет Ли, бизнес-директор компании.

Пока все разработанные на сегодняшний день трехмерные чипы памяти (рис. 1) характеризуются низкой плотностью данных и средним быстродействием. Как правило, их применение не выйдет за пределы отрасли мобильной электроники.

Еще одно преимущество архитектуры 3D чипа от BeSang — ее многослойность. Причем логических взаимосвязей между слоями может быть практически любое число, соответственно, память можно наращивать "ввысь" практически неограниченно. Это, естественно, существенно увеличивает количество информации, которую можно хранить на чипе.

"Трехмерная архитектура будет одним из основных направлений квантовой наноэлектроники", — отметил Стэн Уильямс, глава отдела НР в области квантовых исследований, на международном симпозиуме в области нанотехнологий, который состоялся 25 марта 2005 г.

"Мы уверены, что благодаря новому подходу в области микроэлектроники и нанотехнологиям технологии производства компьютерных чипов переместятся ниже по размерной шкале — до отдельных молекул. Это позволит отказаться от традиционной кремниевой микроэлектроники и начать освоение молекулярной наноэлектроники, — сказал Стэн Уильямс. — Переход к молекулярной электронике состоится благодаря развитию трех направлений: результатов фундаментальных исследований в области квантовой физики в наноразмерном диапазоне, построению архитектуры чипов нового типа, позволяющей более эффективно использовать возможности наноэлектроники и, конечно, методам дешевого массового производства наноэлектронных компонентов".

Такие заявления и прогнозы компании НР связаны с новой архитектурой построения компьютеров. Она основана на новых молекулярных ключах, пред-

ставляющих собой пересекающиеся линии, между которыми при подаче на них напряжения возникают проводящие мостики. Преимущество нового ключа состоит в том, что благодаря конструкции устройства емкость памяти на его основе будет выше той, которая существует сейчас. Если же использовать каждый ключ в качестве элемента памяти, то емкость одного слоя составит 2,5 Гбит/см², в то время как самые "сверхплотные" чипы памяти характеризуются емкостью в 1 Гбит/см².

Как утверждают специалисты компании, "узловая" архитектура, сформированная пересекающимися нанопроводниками (crossbar architecture), позволит упростить массовое производство чипов. Как ни странно, новые чипы будут дешевле обычных кремниевых благодаря большим объемам производства.

В недалеком будущем эти две архитектуры могут быть совмещены для создания не только 3D чипов памяти, но и процессоров, и других наноэлектронных устройств.

Для начала компания планирует создать основу чипа — прослойку, состоящую из отдельной логики и SOI-вафель, соединенных между собой металлическими связями. Перенять и положить на коммерческую основу именно этот метод производства проще всего — эта технология производства используется в микроэлектронике уже давно.

"Однако мы не просто комбинируем между собой традиционные чипы, — продолжает объяснять Ли. — Мы всего лишь используем металлические соединения для связи между собой непосредственно "ядра памяти" и логики".

Следующий шаг компании после исследований и прототипирования устройства — его патентование и лицензирование.

Компания BeSang была основана в 2003 г. бизнесменом Санг-Юн Ли (Sang-Yun Lee). Сан-Юнг ранее работал в компаниях Samsung, IDT и Motorola. Финансирование компании частное.

Надеемся, что после успешного прототипирования на рынке появятся новые продукты на основе трехмерных чипов.

Источник: 1. EETimes: BeSang, Albany Nanotech devise 3D memory (<http://eetimes.com/news/semi/showArticle.jhtml;jsessionid=4HFHLYNFRVS24QSNDBECKHSCJUMKJVN?articleID=184429433>)

Нанотрубки как основа Flash-памяти

Углеродные однослойные нанотрубки, хорошо рекомендовавшие себя в микро- и наноэлектронике, микросистемотехнике и биологии, имеют, оказывается, еще ряд полезных свойств, которые можно использовать в вышеперечисленных областях.

Недавно группе исследователей удалось на основе нанотрубки создать Flash-память. Пока еще устройство далеко от полноценного коммерческого продукта, но ученые надеются, что их исследования откроют новые типы архитектуры молекулярной памяти на ос-

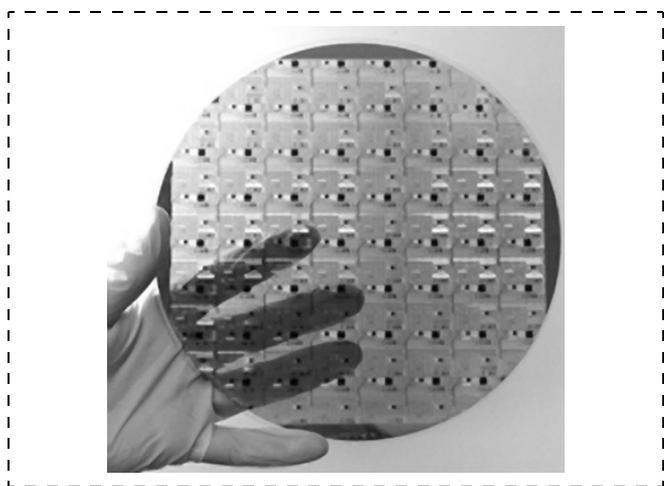


Рис. 1. "Вафля" с матрицей 3D чипов

нове нанотрубок и позволят выпускать полноценные массовые электронные устройства на их основе.

"В то время, как подавляющая часть нанoeлектроники на основе нанотрубок работает при достаточно низких температурах, наше устройство может работать при комнатной, — говорит Джиян Дай (Jiyan Dai), ученый из Политехнического университета Гонконга (Hong Kong Polytechnic University). — Это свидетельствует о том, что нанотрубочная электроника становится "теплой", что позволит ей скорее выйти на потребительский рынок".

Трудно сказать, где не используется Flash-память. В основном это накопитель данных в цифровых аудиоплеерах, видеокамерах, мобильных телефонах, фотоаппаратах и USB-устройствах переноса информации.

Основное достоинство Flash-памяти — то, что она энергонезависима, т. е. продолжает хранить данные без дополнительного питания.

Обычная Flash-память состоит из матрицы транзисторов-ячеек, каждая из которых состоит из трех слоев: "управляющий ключ" и "плавающий ключ", разделенные тонкой пленкой оксида-изолятора.

Как только на ячейку подается напряжение, электроны формируют отрицательный заряд на "плавающем ключе", который при определенном числе зарядов становится закрытым, и ячейка принимает значение логического "0". Как только напряжение понижается, затвор ключа открывается, и ячейка принимает значение "1". Так каждая ячейка может хранить один бит информации.

Дай и его коллега Лу (X. V. Lu) смогли создать ячейку, в которой роль "плавающего ключа", хранящего заряд, играет пленка, содержащая композит из нанотрубок. Об этом они сообщили в текущем выпуске Applied Physics Letters.

Композит, содержащий углеродные нанотрубки, состоит из гафния, алюминия и кислорода (так называемый HfAlO-композит). Он служит как в качестве "управляющий ключа", так и в качестве оксидной пленки, разделяющей части ячейки между собой. Новая Flash-ячейка — это своеобразный бутерброд, состоящий из нанотрубок, композита и кремниевой подложки (рис. 2). Его толщина — всего несколько нанометров. Естественно, память, изготовленная на основе нанобутерброда, будет гораздо более миниатюрной, чем современные аналоги.

Дай и Лу провели ряд исследований, которые позволили получить информацию об электронных характеристиках нового устройства. В первую очередь, это емкость ячейки — то, как долго она может хранить без утечек электрический заряд. Ученые провели ряд замеров — от нескольких секунд до часов. Как выяснилось, устройство плохо держит краткосрочно полученные заряды и гораздо лучше — полученные при длительном заряде ячейки. При слабой зарядке "окно памяти" (порог напряжения, при котором информация хранится) становится более узким, что нежелательно для памяти этого типа. Однако при

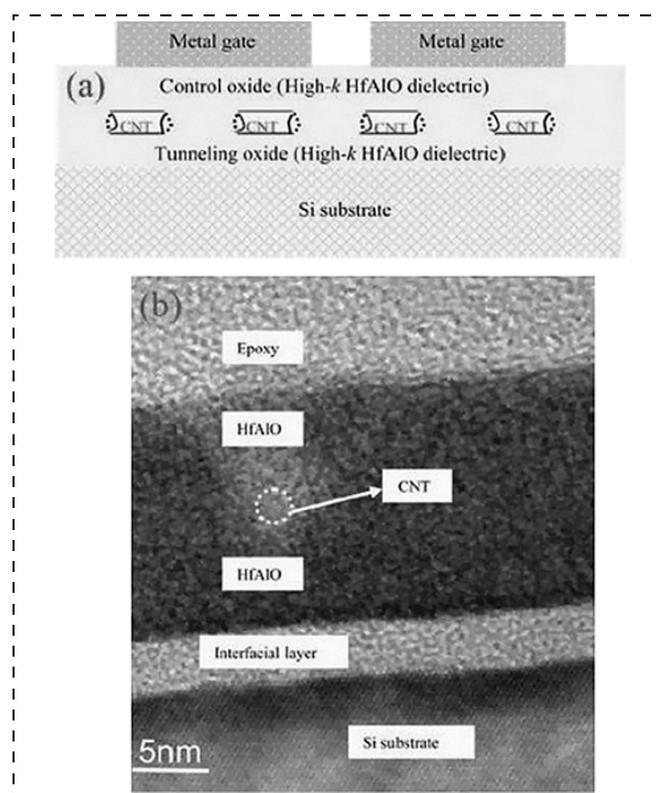


Рис. 2. Структура и микрофотография памяти на основе нанотрубок

более длительной зарядке "окно памяти" держится на уровне 0,5 В.

"Мы уверены, что у нас получится создать память с более широким окном памяти, что сделает новый тип Flash-памяти коммерчески возможным продуктом", — говорит Дай.

Источник: PhysOrg: Carbon Nanotubes with a Memory (<http://www.physorg.com/news63291916.html>)

МЭМС-резонаторы готовы захватить рынок кварцевых осцилляторов

Как считает ветеран МЭМС-индустрии Курт Петерсен, МЭМС-резонаторы не были коммерчески успешными продуктами. Ранее для того, чтобы интегрировать эти резонаторы в структуру рабочего электронного чипа, требовалось достаточно много затрат на единицу продукции, поэтому готовый МЭМС-продукт не мог конкурировать с электронными устройствами на базе кварцевых осцилляторов.

"Я один из тех, кто начал производить МЭМС-резонаторы еще в 1970-х, и тогда считал, что они не смогут конкурировать на рынке микроэлектроники с кварцевыми аналогами", — говорит Курт.

Но это было давно. Сегодня есть все предпосылки к использованию МЭМС-резонаторов в микроэлектронике вместо кварцевых генераторов. Курт, трезво оценив ситуацию в области МЭМС-технологий, микропроизводства и нанолитографии, сделал вывод, что

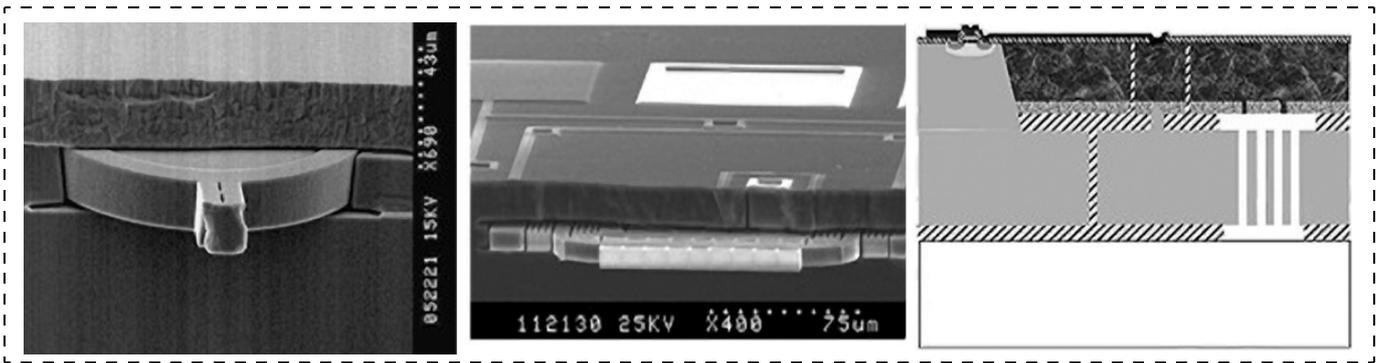


Рис. 3. МЭМС-осциллятор SiT8002

в ближайшем будущем МЭМС-устройства будут доминировать на рынке микроэлектроники.

И неудивительно, что Курт и его коллега Джо Браун работают над новой серией МЭМС-осцилляторов в компании SiTime Corp. Разработанные компанией осцилляторы (рис. 3) с частотой от 1 до 125 МГц серии SiT1xxx и SiT8002 уже пользуются спросом у производителей чипов. Готовый продукт характеризуется также малыми размерами: $2 \times 2,5 \times 0,85$ мм.

Это стало возможным с использованием технологии упаковки МЭМС QFN, совместимой с традиционной CMOS-архитектурой. Планы компании довольно оптимистичны: они хотят вытеснить с рынка кварцевые осцилляторы, которые, по словам Курта, уже проигрывают по компактности и стоимости МЭМС-устройствам.

Еще одно преимущество SiT1xxx и SiT8002 состоит в их вибрoneзависимости и устойчивости к "шоковым" механическим ударам. На сегодняшний день осцилляторы широко используются практически во всех микропроцессорах, без которых, в свою очередь, немислимы мобильные телефоны, ноутбуки, GPS-навигаторы и цифровые фотокамеры. Одно из сложнейших препятствий для производителей МЭМС и микроэлектронщиков, которое состояло в нанесении МЭМС на верх микросхемы или чипа (MEMS on top of a wafer), устранено компанией. Ею разработана технология адгезии МЭМС и кремниевых вафель при температуре около 1000°C — "MEMS First".

Изобретение именно этого технологического процесса позволяет компании уверенно заявлять свою позицию на рынке резонаторов. Сама технология "MEMS First" впервые была разработана и запатентована компанией Bosch, а SiTime Corp. применила ее непосредственно для осцилляторов; соответственно компания имеет право использовать эту технологию только для МЭМС-резонаторов.

Курт надеется, что новые осцилляторы будут использоваться не только в таких "сложных" устройствах, как MP3-плееры, но и в брелоках-ключах для автомобильной сигнализации, где тоже необходимы сверхкомпактные резонаторы. Другое применение серии SiT1xxx — гироскопы, акселерометры и другая аналогичная точная техника. Как утверждает Курц, компания может занять до 80 % рынка осцилляторов.

Но, как он добавил, для этого потребуется длительное время.

Источник: SmallTimes: SITIME ANNOUNCES SAMPLING OF MEMS OSCILLATORS (http://www.smalltimes.com/document_display.cfm?document_id=11207)

Ученые синтезировали "Звезду Давида"

Фракталы окружают нас почти повсюду. Их форму можно найти в большинстве природных объектов: снежинках, листьях на деревьях и т. д. Недавно ученые смогли синтезировать большую молекулу-фрактал. Ее удалось синтезировать команде ученых из университета Акрона, Огайо, США и университета Клемсона.

Чтобы получить необычную молекулу, ученые воспользовались технологией самосборки наноструктур, которая значительно облегчает задачу при исследовании наномира.

Молекула-фрактал (рис. 4) представляет собой гексагональную наноструктуру с включениями атомов железа и рутения.

Чтобы получить снимки молекулы для изучения ее морфологии, ученым пришлось заморозить ее до -267°C .

Размеры молекулы — всего 12 нм, однако они достаточно большие для одиночной молекулы.

Процесс синтеза молекулы во многом схож с получением полимеров.

Как утверждают ученые, это не первая созданная человеком наноструктура, однако это первая молекула, похожая по форме на "Звезду Давида".

Исследования учеными проводились в рамках межуниверситетской программы NanoBioTechnology Initiative, стоимостью 8 млн долл.

Как сказали ученые, применение молекулы-фрактала может быть самым разнообразным: от использования в батарейках до фотоэлектрических устройств.

Источник: Ohio news: Scientists Create the First Synthetic Nanoscale Fractal Molecule (<http://news.research.ohiou.edu/news/index.php?item=298>)

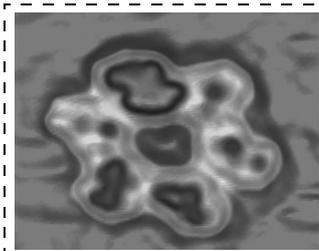


Рис. 4. Молекула-фрактал

Микрожидкостные установки охлаждают компьютерные чипы изнутри

Инженерам из университета Пэрдью (Purdue University) удалось сконструировать новый тип охлаждающей системы для компьютерных чипов. Новое устройство основано в основном на достижениях в области микрожидкостных систем и МЭМС. Что интересно, этот тип микрокулера можно устанавливать непосредственно в "камне" микропроцессора, и отпадает необходимость использовать традиционные механические кулеры-вентиляторы.

Основой микрожидкостной системы охлаждения (рис. 5) стал разработанный учеными "микронасос", перекачивающий охладитель через систему тонких микрокапилляров, охватывающих чип, который надо охладить целиком.

Как говорит один из исследователей, Сареш Гэри-мелла (Suresh Garimella), эта инновация позволит охлаждать микропроцессоры будущего, которые будут рассеивать больше теплоты, чем современные. Также преимущество встроенного охлаждения в том, что охлаждающие каналы могут пронизывать чип практически на всех уровнях, так что охлаждаться будут наиболее "жаркие" его регионы. Это позволит сократить энергопотребление систем охлаждения. Кроме того, данное охлаждение совершенно бесшумно, чего нельзя сказать о современных вентиляторах, издающих зачастую тем больше шума, чем больше мощности они рассеивают, т. е., грубо говоря, — чем мощнее процессор.

Минимальный размер чипа, который можно охладить с помощью микрожидкостного МЭМС-кулера, — около 1 см².

"Поскольку мы используем МЭМС-технологии при построении системы охлаждения, это позволяет нам очень просто интегрировать ее в современную электронику, — говорит Сареш. — И благодаря этому внедрение новой технологии не потребует сколь бы то ни было серьезных переделок в современном технологическом процессе изготовления микрочипов".

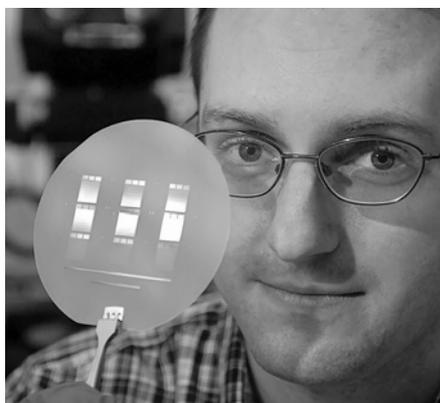


Рис. 5. Микрожидкостный холодильник на кремниевой вафле

Первое сообщение о достижениях Сареша и его команды появилось в майском выпуске журнала "Электронное охлаждение" (Electronics Cooling magazine).

"Наша цель — разработать настолько простую систему охлаждения, что она будет присутствовать в чипах будущего как неотъемлемая их часть, — говорит Сареш. — Я думаю, что это позволит создать новые типы более мощных микросхем и микропроцессоров".

Прототип чипа-охладителя состоит из ряда микроканалов, заполненных водой, диаметром всего около 100 мкм.

Каналы опутаны сложной системой электродов, одни из которых ионизируют воду-охладитель, а вторые — создают электромагнитное пульсирующее поле, заставляющее ионизированную воду циркулировать внутри каналов.

Этот электрогидродинамический эффект и является тем самым микромотором, который необходим для всех жидкостных систем охлаждения.

"Каждый шестой электрод получает такое же напряжение, как и первый, а между ними оно изменяется, создавая эффект пульсирующего электромагнитного поля, благодаря этому происходит охлаждение чипа", — говорит Сареш.

Однако одной гидродинамики для охлаждения недостаточно, поэтому ученые улучшили конструкцию охладителя, добавив к нему еще один микронасос. Этот насос представляет собой полоску пьезоэлектрика, который под действием электричества сокращается и распрямляется, ускоряя циркуляцию воды.

"Этот материал работает как диафрагма, выгибаясь то в одну сторону, то в другую, толкая воду. Благодаря применению альтернативного насоса нам удалось увеличить производительность охладителя на 13%. А расчеты, сделанные с помощью математического моделирования, показали, что, изменив конструкцию диафрагмы, мы сможем увеличить скорость протекания охладителя на 100%," — комментирует Сареш.

Для успешного внедрения охладителя в микроэлектронику следует еще доработать некоторые детали устройства, например, рассчитать оптимальную конструкцию насосов обоих типов. Также ученые должны разработать простую и надежную систему наполнения каналов водой в чипе.

Но, как надеются ученые, эти трудности можно будет преодолеть и на микропроцессоры будущего уже не будет необходимости устанавливать шумные и громоздкие вентиляторы.

Источник: Purdue News: Micro-pump is cool idea for future computer chips (http://news.uns.purdue.edu/UNS/html4ever/2006/060425_Garimella.micropump.html)

Быстрая сортировка молекул от IBM

Ученые из исследовательского центра IBM Almaden Research Center (США) на базе обычного атомно-силового микроскопа создали производственный модуль, который может сортировать молекулы и выкладывать из них различные двумерные наноструктуры.

Атомно-силовой микроскоп (АСМ) — самый распространенный инструмент нанотехнолога, на его основе проводится большинство исследований физики твердого тела, выполняется тестирование новых типов производства двумерных и трехмерных наносистем, изучаются биологические макромолекулы (ДНК, РНК, белки). Поэтому неудивительно, что у такого многостороннего инструмента появилось еще одно применение.

Удивительно другое — ученым удалось с помощью АСМ ускорить работу электрофорезной сортировки, которая широко используется при секвенировании ДНК и изучении белков.

"Использование АСМ в сортировке молекул — отличная находка для нас, так как такой подход обеспечивает высокоскоростное и надежное отделение молекул одних типов от других, — комментирует Дэвид Гарфин (David Garfin), президент американского общества по изучению электрофореза (American Electrophoresis Society). — Сегодня для того, чтобы отделить одну молекулу от другой, необходимо поместить их в капилляр, наполненный гелем, и подвергнуть воздействию электромагнитного поля, и, через несколько минут, а иногда и часов, мы можем достичь результата. И вот, сегодня стало известно, что этот процесс можно ускорить в сотни раз, используя разработки ученых из ИВМ. Продемонстрированная ими "сырая" технология процесса сортировки впечатляет своим быстрым действием и надежностью".

Ученые работали с молекулами ДНК разной длины. Оказалось, что они могут перемещаться под действием эффекта электрофореза вверх и вниз по зонду-кантилеверу АСМ, причем скорость их перемещения зависит напрямую от длины. Так, например, ДНК с пятью базовыми основаниями спускалась вниз по зонду АСМ длиной 11,2 мкм за 5 мс, а молекула с 16 основаниями — за 15 мс.

Более того, после преодоления этого расстояния молекулы съехали на подложку микроскопа, таким образом, двигая зонд АСМ, можно было "писать" различные слова и создавать двумерные наноструктуры, как если бы мы печатали струйным принтером по бумаге. Только вместо чернил — молекулы ДНК разного размера, а вместо бумаги — подложка микроскопа.

"Мы смогли управлять движением десяти молекул ДНК разной длины, а это значит, что ДНК-сортировщик может пригодиться при анализе сверхмалых биологических образцов, не прибегая к "долгому" электрофорезу", — говорит ученый Камар, один из исследовательской группы ИВМ.

Расскажем поподробнее о принципе действия новой технологии (рис. 6). Молекулы ДНК разного раз-

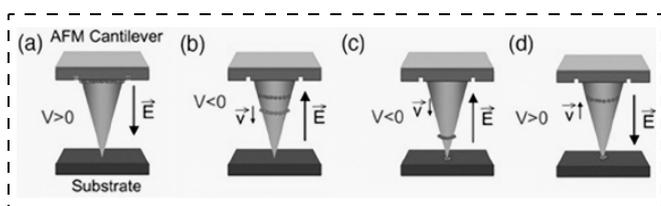


Рис. 6. Принцип действия АСМ-сортировщика

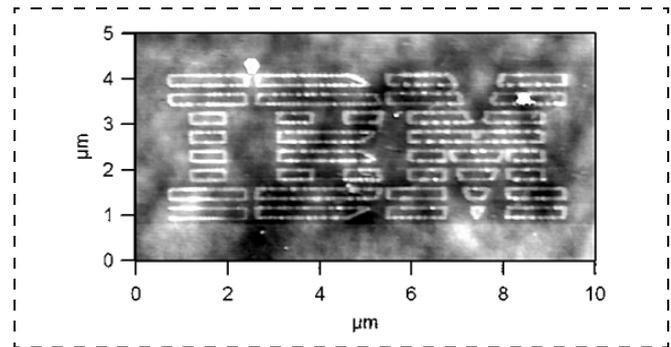


Рис. 7. Логотип компании ИВМ, написанный из пяти основных ДНК

мера хранились в резервуаре под зондом АСМ. Как только ученые подавали на зонд напряжение, молекулы разных типов "выползали" из резервуара и спускались вниз к концу зонда, причем со скоростью зависящей от их размера. Так, сначала возле подложки оказались короткие молекулы, а через некоторое время — длинные. Как только все молекулы оказались "внизу", ученые поменяли полярность напряжения, заставив молекулы подниматься обратно. И в этот момент, контролируя их подъем, они оставили некоторые молекулы "внизу". Так и происходил цикл всего письма — нанесением поэтапно молекул нужного размера.

Освоившись с нанописью, ученые выложили из молекул ДНК с пятью основаниями логотип компании ИВМ (рис. 7). Габаритные размеры логотипа составили всего $3,3 \times 8,8$ мкм. Толщина же линии, которой писали ученые, составила 59—79 нм.

Как говорят исследователи, тот же метод можно применить при построении нанoeлектронных цепей, в которых роли транзисторов будут играть отдельные молекулы.

"Мы можем "писать" молекулами, только когда электрическое поле присутствует, — поясняет Камар. — То есть, если нам необходимо, мы можем поднять зонд, перевести его на другое место и там писать снова без потери молекул. Также благодаря контролируемому нанесению молекул на основание эта технология производства менее чувствительна к химическим свойствам подложки".

Источник: Nanotechweb.org: Atomic force microscope sorts molecules out (<http://www.nanotechweb.org/articles/news/5/5/1/1>)

Нанометки в качестве штрих-кодов

Исследователи из Southampton University, Соединенное Королевство, разработали технологию нанесения наноструктурированных оптических меток в виде вытянутых решеток (рис. 8). Команда утверждает, что благодаря такому подходу можно создать до 109 различных типов кодов, каждый из которых можно будет легко идентифицировать бесконтактным оптическим способом (работа впервые появилась в выпуске Optics Express 14,1382). Особенность новых штрих-кодов — их сверхмалый размер.

Создание наноматериалов, которые можно легко и

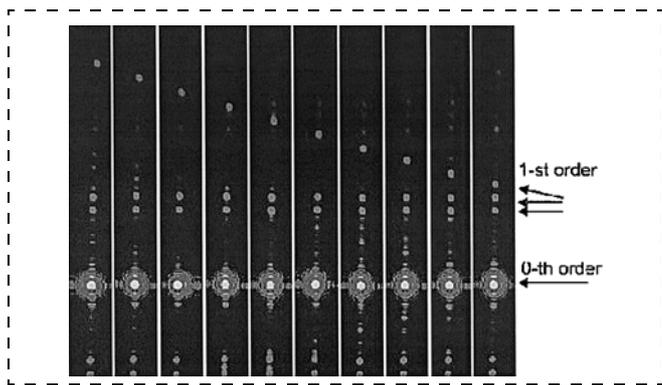


Рис. 8. Структура меток (разные типы дифракционных решеток)

быстро идентифицировать — не новость. Два года назад появились первые технологии наноидентификации на основе ДНК-штрих-кодов. Однако высокая стоимость их производства не позволила выйти этому изобретению на рынок.

Для нанесения новых нанометок на стеклянную поверхность ученые использовали электронно-лучевую литографию, работающую с разрешением 100 нм. Размер одной решетки — 50×50 мкм, толщина — 60 нм. Была составлена библиотека штрих-кодов, насчитывающая 7400 уникальных кодов.

Бартвелл поясняет, что код содержится в дифракционной решетке с определенным периодом, т. е. действует принцип: одна решетка — один код.

При попадании пучка света на решетку декодер фиксирует угол отклонения луча, который от нее отражается. Естественно, что для каждой решетки угол дифракции луча будет различным, это и определяет различие между кодами.

Теоретически, можно увеличить число различных

кодов путем комбинирования разных решеток из уже имеющейся библиотеки. Так, можно будет получать дифракционные решетки с кодами высокого уровня. Например, используя только три различных типа решеток, можно получить 68 000 вариантов штрих-кодов.

Но, как говорит Бартвейл, число решеток, нанесенных одновременно, не бесконечно, так как при их изготовлении используется нанолитография с максимальным разрешением 100 нм. "Чем выше будет число решеток в одном штрих-коде, тем труднее их изготовить. Так, штрих-код с четырьмя решетками мы уже не можем изготовить, — говорит Бартвейл. — Но мы работаем над преодолением этой проблемы, и в следующих наших работах, возможно, нам удастся увеличить число решеток так, чтобы получить как можно больше вариантов штрих-кодов".

"Новые штрих-коды на основе наночастиц с нанесенными на них продольными полосами будут использоваться в основном в комбинаторной химии", — говорит один из исследователей Сэм Бартвелл.

"Естественно, мы не исключаем и более широкие применения, такие как: маркирование птиц, домашних и диких животных, растений, насекомых; добавление идентификаторов на кредитные карты, банкноты, компьютерные чипы. Также возможно будет отметить одиночные живые клетки, что будет очень полезно биотехнологам, медикам и генным инженерам. Сейчас же мы заняты изготовлением биосовместимых меток для использования их в медицине и биотехнологии. Также мы пытаемся оптимизировать существующие коды для того, чтобы наше открытие смогло воплотиться на рынок средств идентификации", — завершает Бартвейл.

Источник: Nanotechweb.org: Optical barcodes show promise as labels
(<http://www.nanotechweb.org/articles/news/5/3/14/1>)

ИНФОРМАЦИЯ

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА. От исследований к разработкам

Сборник статей под редакцией д. т. н., профессора **П. П. Мальцева**.

Москва: Техносфера, 2005. — 592 с., ISBN 5-94836-063-6

Ежемесячному междисциплинарному теоретическому и прикладному научно-техническому журналу "Нано- и микросистемная техника" исполнилось пять лет. Наиболее цитируемые статьи, опубликованные в журнале с ноября 1999 г. по март 2005 г., сгруппированы в соответствии с названием рубрик и позволяют проследить развитие от микро- к наносистемной технике в России. В книге рассмотрены общие вопросы, технологии формирования наноструктур, методы исследования наноструктур, метрологическое обеспечение, основы технологии, моделирование и конструирование компонентов нано- и микросистемной техники, перспективы их применения. Монография представляет интерес для ученых, инженеров и преподавателей высшей школы, аспирантов и студентов, специализирующихся в области микро- и нанoeлектроники, микро- и нанотехнологии, микро- и наносистемной техники.

Книга постоянно продается в магазине "Дом книги": 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 42, корп. 2, рядом с гостиницей "Спутник". Ближайшая станция метро: "Ленинский проспект".

Заявки на покупку книги (5 и более экземпляров) присылайте по адресу:

125319, г. Москва, а/я 594
Издательство "Техносфера"
e-mail: knigi@technosphera.ru
sales@technosphera.ru
факс: (495) 956-33-46

В заявке обязательно указывайте свой почтовый адрес!

Продажа в Интернет по одному экземпляру и более:

<http://www.ozon.ru/context/detail/id/2538416>

Цена 434 руб.

Подробная информация о книгах на сайте
<http://www.technosphera.ru> МИР ЭЛЕКТРОНИКИ
Тел. (495) 234-01-10

CONTENTS

Dedkov G. V. *Physical Aspects of Interactions Between the Tip of Scanning Probe Microscope and the Sample Surface. Part 1* 2

Physical phenomena and effects being characteristic for the contact and noncontact operation regimes of the scanning probe microscopy, are discussed on an elementary level. A theoretical description and numerical estimations of energies, forces and other physical characteristics of contacts are given. Some applications and perspectives for future development of the scanning probe technique with regards to physics and nanotechnology are discussed.

Butyvsckaya M. V., Petronuk Yu.S. *The Ultrasonic Microscopy Technique as an Applicable Tool for Monitoring the Wafer Bonding Quality when Manufacturing the Silicon-on-Insulator (SOI) Structures* 12

The ultrasonic (US) system of visualization of the high sanction attractive owing to an opportunity to observe a microstructure in volume of opaque objects is described and to measure elastic, viscous and relaxational properties of small areas and inclusions. Results of the control of the connected substrates which in the further will form structure "silicon on insulator" (SOI) are presented.

Samoylovich M. I., Belyanin A. F. *Formation of Nanostructured Films of Diamond-Like Materials. Part 2* 15

Formation of diamond-like material films being obtained by plasma-methods occurs under condition of morphological instability of boundary growth forms. Coherence-breaking for such solid-state systems can be carried out by different relaxation mechanisms that is conditioned on ability to decrease total energy by internal sub-structure selection, coherent phases relative position and optimization of morphological forms. Sputtering methods, especially magnetron sputtering, are irreplaceable for the formation of nanostructured films on large substrate area of amorphous and polycrystalline materials.

Brukhova Yu. V., Zaitsev N. A. *Spice Modeling and Parameter Extraction of Semi-Conductor Devices Using TCAD* 25

Spice — modeling and parameter extraction is an important issue at the providing appropriate and reliable semi-conductor device models, including microsystem device models. This paper presents description and analysis different methods of extraction semi-conductor device models.

Safronov A. Ya., Gornev E. S., Zaitsev N. A., Matyushkin I. V. *The Development of a Design and Manufacturing Techniques for Microsystems on the Basis of Bulk Silicon and Thin Films of Piezoceramics* 30

The opportunity of application in microelectromechanical systems (MEMS) of piezoceramic elements on basis PZT is considered. It is shown, that the most perspective methods of PZT films (thickness is about 1 mkm) fabrication are sol gel technique and magnetron sputtering. By the example of a matrix of the piezoactuated micro-mirrors, the ways of p-MEMS creation are discussed.

Abramov I. I. *Problems and Principles of Physics and Simulation of Micro- and Nanoelectronics Devices. Part I. Basic Positions* . . . 34

The problems, principles and approaches of physical processes simulation of various micro- and nanoelectronics devices are considered. The analysis is based on the physics of open systems.

Kashtankin I. A., Gurin N. T. *N-transistor Optrons* 37

The models of bipolar silicon N-shaped optrons were developed. The spectral, transmission characteristics and their temperature dependence are analyzed. The features of silicon N-transistor optrons with shunting of the base-emitter junction and with modulation of the base current are discussed. The results of modeling correspond to experimental data.

For foreign subscribers:

Journal of "NANO and MICROSYSTEMS TECHNIQUES" (Nano- i mikrosistemnaa tehnika, ISSN 1813-8586)
Joint-stock company MK-Periodica. E-mail: info@periodicals.ru Tel.: +7(495) 684-5008. Fax: +7(495) 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(495) 269-5510.

E-mail: nmst@zknet.ru; <http://www.microsystems.ru>

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4/1. Телефон редакции журнала (495) 269-5510. E-mail: nmst@zknet.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 Т. Л. Демидова

Сдано в набор 29.05.2006. Подписано в печать 29.06.2006. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,13. Заказ 1047. Цена договорная

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