

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 1 (102) ✧ 2009

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России
и в Российский индекс научного цитирования

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.
Квардаков В. В.
Климов Д. М.
Ковальчук М. В.
Нарайкин О. С.
Никитов С. А.
Сауров А. Н.
Сигов А. С.
Чаплыгин Ю. А.
Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И.
Андреевский Р. А.
Антонов Б. И.
Арсентьева И. С.
Астахов М. В.
Быков В. А.
Волчихин В. И.
Горнев Е. С.
Градецкий В. Г.
Гурович Б. А.
Журавлев П. В.
Захаревич В. Г.
Кальнов В. А.
Карякин А. А.
Колобов Ю. Р.
Кузин А. Ю.
Мокров Е. А.
Норенков И. П.
Панич А. Е.
Панфилов Ю. В.
Петросянц К. О.
Петрунин В. Ф.
Путилов А. В.
Пятышев Е. Н.
Серебряников С. В.
Сухопаров А. И.
Телец В. А.
Тимошенко С. П.
Тодуа П. А.

Отв. секретарь
Лысенко А. В.

Редакция:

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

Учредитель:
Издательство
"Новые технологии"

Издается с 1999 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

- Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Нанoeлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития 2

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

- Потапов А. А. Атом: ключ к созданию основ нанотехнологии 5
Лугин А. Н. Наноразмерные эффекты пространственной неоднородности распределения тока и мощности рассеяния в тонкопленочном контакте 13
Маркелов А. С., Трушин В. Н., Чупрунов Е. В. Особенности формирования контраста рентгеновских изображений при дифракции рентгеновских лучей от поверхности кристаллов, имеющих колончатую структуру. 16
Глухова О. Е. Жесткость Y-образных углеродных нанотрубок при деформации растяжения/сжатия. 19

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

- Ринкевич А. Б., Устинов В. В., Самойлович М. И., Клещева С. М., Кузнецов Е. А. Магнитный резонанс в опаловых матрицах с 3D-структурой, образованной наночастицами никель-цинкового и марганец-цинкового феррита. 23
Мустафаев Г. А., Мустафаев А. Г. Разработка процесса формирования глубокой изоляции структур кремний на изоляторе 30
Шиляев П. А., Павлов Д. А., Коротков Е. В., Треушников М. В., Кривулин Н. О. Исследование упругих и фрикционных свойств субмикронных слоев кремния на сапфире. 32

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

- Адамов Д. Ю., Матвеев О. С. Элементная база нанометровых КМОП-микросхем 34

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

- Соболев В. С., Косцов Э. Г., Щербаченко А. М., Уткин Е. Н., Харин А. М. Микровибрации конструкций капитальных строений как источник возобновляемой энергии для МЭМС-генераторов 42
Возможности микроэлектромеханических систем 47

ИНФОРМАЦИЯ

- Раткин Л. С. Итоги Общего собрания Российской академии наук. 51
Contents 55

Информация о журнале доступна на сайте журнала:
<http://www.microsystems.ru> <http://eLIBRARY.ru>

ПОДПИСКА:

- по каталогу Роспечати (индекс 79493);
- по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)
- в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10)

Адрес для переписки:
e-mail: nmst@novtex.ru

Г. Я. Красников, чл.-корр. РАН, ген. директор,
Н. А. Зайцев, д-р техн. наук, проф., нач. отдела,
ОАО "НИИМЭ и Микрон"

НАНОЭЛЕКТРОНИКА: СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Приведены главные проблемы современной наноэлектроники и указаны пути их решения. Даны основные понятия наноматериалов и приборов наноэлектроники.

Ключевые слова: наноэлектроника, наноматериалы, нанотрубки, нанопленки, КМОП.

Нанотехнологии включают в себя создание и использование материалов, приборов и устройств, функционирование которых определяется наноструктурой с размерами от 1 до 100 нм. Нанотехнологии можно разбить на два больших класса:

- наноматериалы;
- наноэлектроника (квантовая электроника).

К наноматериалам, с одной стороны, могут быть отнесены следующие объекты [1]:

- наночастицы, нанопорошки (объекты, у которых три характеристических размера находятся в диапазоне до 100 нм);
- нанотрубки, нановолокна (объекты, у которых два характеристических размера находятся в диапазоне до 100 нм);
- нанопленки (объекты, у которых один характеристический размер находится в диапазоне до 100 нм).

С другой стороны, объектом наноматериалов могут быть макроскопические объекты, атомарная структура которых контролируемо создается с разрешением на уровне отдельных атомов.

В электронных приборах с размерами активных областей менее 100 нм начинают играть значительную роль квантовые явления, поскольку размеры приборов становятся сравнимы с размерами,

характерными для электронов проводимости: длиной волны де Бройля на поверхности Ферми и длиной свободного пробега электронов. В данной работе мы не рассматриваем проблемы металлизации, которые необходимо исследовать в отдельной работе.

Приборы наноэлектроники можно разделить на два больших класса:

- транзисторы с размерами $10 \text{ нм} \leq d \leq 100 \text{ нм}$ — это КМОП УБИС; перенос носителей заряда в этих приборах подчиняется квазигидродинамической модели;
- транзисторы с размерами $d \leq 100 \text{ нм}$ — это приборы квантовой наноэлектроники, где перенос носителей заряда осуществляется по баллистическому механизму.

Уменьшение минимальных размеров транзисторов приводит к проблемам в разработке технологического маршрута в целях получения адекватных параметров приборов. Так, переход проектных норм через границу 130 нм в рамках традиционной структуры наталкивается на физические ограничения, которые приведены в табл. 1.

Уменьшение минимальных размеров и увеличение быстродействия (рис. 1, 2) приводит к росту потребляемой мощности, в основном связанной с утечкой через подзатворный диэлектрик.

При снижении рабочего напряжения до 1 В (размер 45 нм и менее) резко возрастают утечки сток—исток (табл. 2). Этот эффект сейчас более существенен, чем утечки затвора.

Проведенный в работе [1] анализ показал, что МОП-транзистор сохраняет необходимые для схемотехнических применений свойства и характери-

Таблица 2

Физико-технологические проблемы, возникающие при разработке нанотранзисторов

Минимальный топологический размер, нм	Напряжение питания, В	Проблемы	Примечание
130	1,2	—	
90 65	1,2 1,1	Повышенные токи утечки через подзатворный диэлектрик	Разработка принципиально новой подзатворной системы
45 32 22 16	1 0,9 0,8 0,7	Повышенные шумы, а также токи утечки сток-исток	Разработка принципиально новой с учетом квантовых эффектов модели транзистора

Таблица 1

Таблица ограничений

Характеристики	Предел	Причина ограничений
Толщина оксида, нм	2,3	Туннелирование носителей заряда через оксид
Глубина <i>p-n</i> переходов, нм	30	Сопротивление областей истока/стока
Легирование канала, пороговое напряжение, В	0,25	Подпороговый ток
Мелкие области стока/истока, нм	15	Сопротивление
Длина канала, нм	60	Подпороговый ток

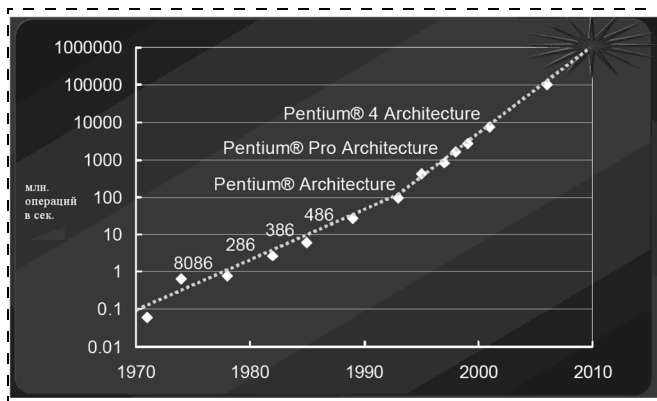


Рис. 1. Прогноз зависимости роста быстродействия процессоров до 2010 г. (источник: Intel)

стики, т. е. обеспечивает необходимые электрофизические параметры, если длина канала транзистора более 30 нм. Проблемы с потребляемой мощностью, по оценкам фирмы Intel, начинаются при размерах транзисторов 30 нм и менее, выполненных по традиционной КМОП-технологии. Для оценки серьезности данной проблемы можно привести следующий пример: при минимальном размере 10 нм и работе на частоте 10 ГГц рассеиваемая мощность составит 500 Вт. Решение этой проблемы связано с применением нового материала (графена) или углеродных нанотрубок, которые рассеивают небольшую мощность. В то время как микрочипы становятся все меньше и меньше, тепловые потери становятся одной из главных причин дальнейшего уменьшения минимальных размеров. Как было отмечено выше, с уменьшением минимальных размеров быстродействие микропроцессоров возрастает, однако в большей степени возрастает мощность потребления (см. рис. 2). В 2007 г. произошел серьезный прорыв в решении этой проблемы, связанный с переходом к металлическим затворам с оксидами редкоземельных металлов. Подобный переход (*Intel*, *IBM*, *Toshiba*) привел к уменьшению токов утечки через подзатворный диэлектрик и, как следствие, к уменьшению статических потерь мощности.

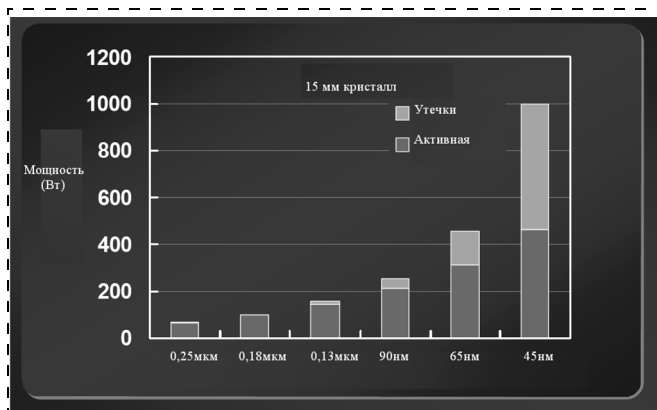


Рис. 2. Зависимость потребляемой мощности от min размера (источник: Intel)

Вместе с тем, с уменьшением размеров транзистора до нескольких нанометров, уменьшается число электронов/дырок, участвующих в переносе тока, а также резко возрастает роль квантовых эффектов, приводящих к существенному росту шумов и повышенных токов утечки через подзатворный диэлектрик.

В экспериментах с приборами, имеющими толщину оксида 13...15 нм, было установлено, что туннельный ток через подзатворный диэлектрик может быть существенно уменьшен путем повышения однородности диэлектрика. Кроме того, транзисторы с такой толщиной подзатворного диэлектрика обнаруживают флуктуации порогового напряжения и крутизны транзистора. Это проявляется, когда сопротивление туннельного оксида становится сравнимым с сопротивлением поликремниевому затвору. С уменьшением толщины подзатворного диэлектрика использование поликристаллического кремния в качестве полевого электрода становится неприемлемым за счет того, что происходит увеличение эффективной толщины подзатворной системы. Поэтому в настоящее время деятельность многих фирм направлена на исследование применения металлических затворов. Предполагается, что их применение начнется с минимального размера 45 нм, поэтому в настоящее время ведущие фирмы проводят свои разработки по созданию подзатворных систем, состоящих из альтернативного оксида и металла затвора. В этом случае, как отмечают специалисты фирмы *Intel*, становится возможным создание элементной базы с минимальными размерами менее 10 нм. Это происходит вследствие того, что уменьшение диэлектрической проницаемости, происходящее за счет низкоомного затвора возможно, предотвратить введением между затвором и оксидом высокоомного металла толщиной 0,3 нм. Снижение диэлектрической проницаемости объясняется экранированием ионного диэлектрика электронами металла вследствие квантового эффекта.

Отметим еще раз, что квантовая наноэлектроника определяется баллистическим переносом носителей заряда в канале МДП-транзистора, при этом минимальный размер канала составляет 10 нм и менее. Поэтому такие приборы должны как минимум на два порядка превосходить по технико-экономическим характеристикам КМОП-УБИС с минимальным размером 100 нм [2]. В настоящее время разработка таких приборов происходит на новых материалах: "напряженный кремний" и кремний-германий (рис. 3). В этом случае реализуются приборы с минимальными размерами 90 и 65 нм.

Для решения проблемы увеличения подвижности носителей заряда используется механически напряженный кремний, который выращивается на поверхности SiGe. Вследствие различия постоянных кристаллических решеток кремний испытывает растягивающее усилие по двум координатам. При 30 %-ном содержании Ge в SiGe подвижность электронов в

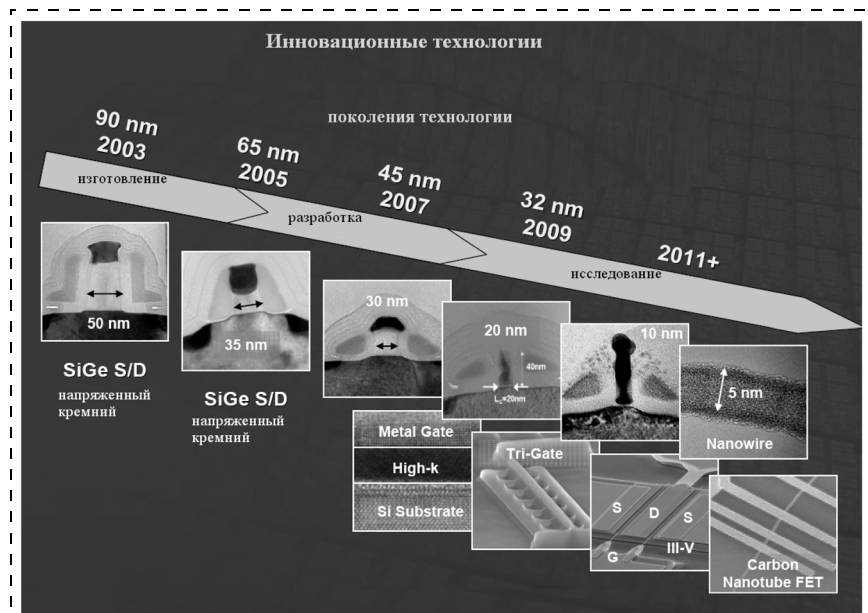


Рис. 3. Прогноз развития инновационных технологий (источник: Intel)

напряженном кремнии увеличивается на ~80 %. Создание областей стока/истока на основе SiGe увеличивает подвижность носителей канала за счет формирования локальных механических напряжений в канале.

Развитие квантовой электроники предполагает, что традиционные "макроскопические" модели работы МОП-транзисторов, основанные на статическом усреднении по огромному числу носителей заряда, перестают адекватно описывать работу транзистора, и требуется пересмотр самой работы нанoeлектронных приборов и создание новых моделей.

МДП-нотранзистор сохраняет свои усиленные свойства до нанометровых длин канала. Японскими исследователями было установлено прямое туннелирование электронов от истока к стоку через зону проводимости *p*-Si подложки при длине затвора 8 нм в различных МОП-транзисторах с мелкими переходами [3]. Таким образом, как было установлено в этой работе, длина канала, равная 8 нм при комнатной температуре, является критичной, т. е. физическим пределом для стандартных кремниевых МОП-транзисторов. Выход из этой ситуации — создание туннельно прозрачного диэлектрика на обоих концах канала либо поиск альтернативных классическому МОП-транзистору конструкций. Квантовомеханическая природа инверсионного слоя приводит к проникновению волновых функций электронов в подзатворный диэлектрик на 0,7 нм. Максимум пространственного распределения электронов в инверсионном слое находится на расстоянии около 1 нм от поверхности. Все это вместе увеличивает эффективную толщину подзатворного диэлектрика на 1,2 нм. Необходимо отметить, что шероховатость границы раздела Si—SiO₂, характерная для термического окисления кремния, будет изменять эту величину. Нотранзистор, работающий в баллистиче-

ском режиме переноса носителей заряда, существенно влияет на ток стока и крутизну транзистора. Этот эффект сильно зависит от ориентации поверхности кремния, прилегающей к диэлектрику. Поэтому толщина оксида 1,2 нм — это предел дальнейшего снижения толщины подзатворного диэлектрика, дальнейшее уменьшение приводит к резкому росту токов утечек и потребляемой мощности. Для дальнейшего уменьшения минимальных размеров транзистора (≤ 5 нм) необходимо, чтобы передача сигнала осуществлялась, например, фотонами или спиновыми электронами. Поэтому дальнейшее развитие нанoeлектроники возможно лишь по пути разработки новой элементной базы, основанной на новых физических принципах и эффектах. К основным направлениям относят разработки

приборов на основе нанотрубок, графена и нанопроволок.

При смещении минимальных размеров в нанометровую область при проведении масштабирования возникают принципиальные проблемы адекватности описания работы транзистора. Как отмечалось выше, переход проектных норм через границу 130 нм в рамках традиционной структуры наталкивается на физические ограничения. В этом случае транзистор должен иметь иную структуру или использовать новые материалы. После преодоления технологического рубежа 0,25 мкм поведение цифровых схем стало приближаться к поведению аналоговых. Исследование данных нанообъектов традиционными экспериментальными методами затруднительно, так как результаты этих исследований нуждаются в надежной теоретической интерпретации. Поэтому для разработки технологии и структуры данных приборов необходимо использовать моделирование. Причем математическая модель была бы пригодна как для цифровых, так и для аналоговых схем. Число моделей в настоящее время превышает 100. Для практических целей чаще других используются физические и физико-технологические модели, которые отражают физические процессы, протекающие в полупроводниковых приборах. В этом случае резко обостряется проблема достоверности модели, и актуальность ее продолжает увеличиваться по мере появления новых физических эффектов в нанометровых транзисторах.

Атомистическое моделирование, как правило, основано на фундаментальных принципах, что делает этот подход предсказательным и, в известном смысле, независимым от эксперимента источником фундаментальных знаний о структуре и свойствах нанообъекта. Примером успешного применения атомистического моделирования служит работа [4].

Уменьшение характерных размеров транзисторов вызывает увеличение разброса значений их параметров и снижение процента выхода годных. Это привело к возрастанию потребности в достоверном статистическом моделировании. Перспективным направлением идентификации статистических параметров является их экстракция из результатов электрических тестов. Таким образом, освоение нанотранзисторов предполагает разработку принципиально новой, с учетом квантовых эффектов, модели транзистора с набором свойств, необходимых для адекватной работы квантовых транзисторов.

Список литературы

1. <http://www.wikipedia.ru>.
2. Бубенников А. Н., Бубенников А. А., Зыков А. В., Ракитин А. В. Нанoeлектроника уровня 100—50 нм. Техноэкономическая перспектива // Электроника. Наука, технология, бизнес. 2000. № 1. С. 56—60.
3. Matsuo N., Yamanchi J., Kitagawa Y., Hamada H., Miura T., Miyoshi T. // Jap. Appl. Phys. 2000. 39. С. 3850—3853.
4. Brodskii V. V., Rykova E. A., Bagatur'yants A. A., Korokin A. A. Modelling of ZrO_2 deposition from $ZrCl_4$ and H_2O on the Si(1 0 0) surface: initial reactions and surface structures // Computational Materials Science. 2002. V. 24. Is. 1—2. P. 278—283.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 539.2-022.532

А. А. Потапов, д-р хим. наук, гл. науч. сотр., проф.,
Институт динамики систем и теории управления
СО РАН

АТОМ: КЛЮЧ К СОЗДАНИЮ ОСНОВ НАНОТЕХНОЛОГИИ

Показана основополагающая роль атома в становлении механосинтеза как ведущего направления нанотехнологии. Предложен новый подход к построению теоретических основ нанотехнологии.

Ключевые слова: атом, модель, теория, проектирование, наносистемы, строение, межатомные и межмолекулярные взаимодействия, нанотехнологии.

Визуализация отдельных атомов и открывшаяся сегодня возможность манипулирования ими стали эпохальным событием в истории человеческой цивилизации. Изобретение атомно-молекулярных манипуляторов приблизило человека к осуществлению его исконной мечты о создании искусственной природы, полностью подвластной разуму человека и освобождающей человека от непредсказуемости стихий естественной природы. Собственно вся наша история представляет собой непрерывное и необратимое вытеснение биосферы техносферой. В этом поступательном эволюционном процессе становится зримым и осязаемым переход к принципиально новым технологиям, основанным на освоении управляемого синтеза материалов и изделий путем поатомной сборки [1, 2].

Цели и задачи. При наличии ассемблера процедура механосинтеза (с которым связаны основные надежды нанотехнологии) представляется предельно простой и сводится к наноконструированию путем последовательного присоединения отдельных атомов (или молекул) или путем использования некоторой стандартной молекулы подходящей конфигурации, выполняющей роль заготовки, которую доводят до желаемой формы "механическим" удалением лишних фрагментов. Для практического осуществления атомно-молекулярной сборки необходимо иметь свод правил и инструкций, обеспечивающих проведение инженерных расчетов в процессе проектирования и конструирования наносистем. Для этой цели необходимо разработать прогностическую теорию, обеспечивающую практику знаниями того, какие исходные элементы (атомы и молекулы) надо выбрать для наносборки, каким образом и в какой последовательности их следует собирать для получения у создаваемого материала или изделия требуемых эксплуатационных свойств и функций. По сути, проблема целенаправленной наносборки — это проблема современного естествознания и, в первую очередь, проблема атомно-молекулярного строения и межатомных взаимодействий [2, 3].

Истоки атомизма. Чтобы понять создавшееся положение в науке об атоме, начнем с экскурса в историю. Ее основные вехи:

- умозрительная атомистика древних;
- экспериментальное подтверждение существования атома, ставшее возможным благодаря введению в научную практику весового (массового) метода измерений и позволившего различать элементы материи по их весу (массе);

- накопление сведений о многообразии элементов и их систематизация, завершившаяся таблицей Менделеева;
- открытие сложного электрон-протон-нейтронного строения атома;
- современный этап — поиск приемлемых моделей внутриатомного строения.

На всех этапах становления атомистики идея атомизма выступала как движущий потенциал эволюции в миропонимании и мировоззрении. Анализ смены атомистических воззрений показывает, что переход на следующую, более высокую ступень постижения сущности атома был связан с открытием элементарных микрочастиц, составляющих атом, или с появлением новых эмпирических знаний.

Что мы должны знать об атоме? Для полного описания атома необходимо располагать параметрами, представляющими в первую очередь его геометрию и энергетическое состояние, а также способность к взаимодействию с другими атомами. В конечном итоге необходимо знать как устроен атом, т. е. знать его электронное строение [3, 4].

Что мы знаем об атоме? В настоящее время накоплен огромный массив данных, так или иначе относящихся к описанию атомов. Однако далеко не все данные из этого массива могут быть отнесены к категории атомных констант. К их числу могут быть отнесены только те величины, которые представляют невозмущенное состояние атома. Сказанное можно пояснить на примере рассмотрения *радиуса* и *энергии связи атомов*.

В настоящее время для описания размеров атома используются около десятка различного рода атомных радиусов, таких как Ван-дер-Ваальсовы, орбитальные, кинетические, ковалентные и др. Ни один из известных радиусов по своей сути не является радиусом; каждый из них несет условный смысл, связанный с методом регистрации, выбором объекта исследования или выбором той или иной модели микросистемы. Радиус атома, как один из его основополагающих параметров, которым задается масштаб и пространственная протяженность окружающего нас мира, оказался не определенным по формальным признакам и не раскрытым по существу [5, 6].

Энергия связи ε характеризует устойчивость и стабильность атомов и соответственно их прочностные (механические) свойства атомов. Для количественной оценки энергии связи ε в настоящее время используется так называемый потенциал ионизации I , представляющий собой энергию, необходимую для отрыва от атома валентного электрона [7]. Но между потенциалом ионизации I и энергией связи ε , несмотря на их физическую общность, имеется существенное различие. В отличие от энергии связи ε в процессе измерения потенциала ионизации происходит перестройка электронной оболочки, которая вызвана удалением электрона. Разность $(\varepsilon - I)$ представляет систематическую погрешность определе-

ния потенциала ионизации I , которая может достигать единиц электрон-вольта [5]. Данное обстоятельство не позволяет отнести потенциал ионизации к категории атомных констант.

Таким образом, основополагающие характеристики атома, каковыми являются радиус и энергия связи, не могут быть отнесены к категории атомных констант и потому не несут достоверной информации об электронном строении атома. Анализ других атомных параметров (валентность, энергия сродства, оптические и рентгеновские спектры и др.) также не приближают к пониманию устройства атома. Остается констатировать: сегодняшнее состояние эмпирического базиса в области атомной физики не обеспечивает необходимых условий для построения корректной теории атома и, соответственно, для полного понимания атома.

Как объясняет атом современная атомная физика. Сегодняшнее понимание внутриатомного строения опирается на вероятностные представления об электроном как бесструктурном облаке с переменной плотностью, описываемого волновой функцией. *Волновая функция* является решением уравнения Шредингера и выступает в качестве концептуальной основы квантово-механического описания атома. Считается, что волновая функция содержит всю информацию о состоянии и строении атомов [8].

Такое понимание атома формировалось в условиях ограниченного эмпирического базиса, когда анализ атомного строения опирался на имеющиеся у создателей квантовой механики данные по рассеянию микрочастиц, а также данные оптических и рентгеновских спектров. Эти данные получены с помощью аппаратуры, характерной чертой которой является разрушение начального состояния исследуемого объекта. Данное обстоятельство предопределило следующую логику рассуждений. Чтобы определить пространственное положение электрона как объекта исследования, необходимо длину зондирующего электромагнитного поля λ уменьшать до размеров, соизмеримых с размерами электрона. Но уменьшение длины волны эквивалентно увеличению энергии зондирующего поля $h\nu = hc/\lambda$ (где частота $\nu = c/\lambda$, c — скорость света, h — постоянная Планка), так что при характерных для атомов размерах энергия становится достаточно большой, для того чтобы разрушить сам объект исследования. Возникла проблема, известная как влияние "прибора" на энергетическое состояние атома. Обоснование идеи невозможности определения пространственного положения электрона в атоме закрепилось в виде принципа неопределенности В. Гейзенберга. Завершающим звеном этой логической цепочки стала идея М. Борна, предложившего вероятностное описание атома, согласно которому электрон представляется в виде аморфного облака с переменной плотностью; в качестве меры вероятности выступает волновая функция, которая является решением уравне-

ния Шредингера. Данный подход был успешно апробирован на примере атома водорода. Это послужило поводом для разработки "водородоподобной" теории Хартри—Фока, основанной на решении уравнения Шредингера в приближении самосогласованного поля; ее основные положения сохранилась и в более поздних теоретических построениях. Фактически на этом этапе (1925—1932 гг.) были заложены основы современной атомной физики, а затем квантово-механическое описание атома было принято в качестве концептуального основания теоретической химии [8].

Но современная атомная физика не отвечает на главный вопрос — как устроен атом и каковы причины его необычной устойчивости. Нет ответа и на вопрос, каков механизм формирования устойчивых атомных образований, таких как молекулы. По сути, изучение электронного строения многоэлектронных атомов зашло в тупик. Несостоятельность вероятностного подхода к описанию атома видится в следующем:

- принятое в теории Хартри—Фока приближение усредненного поля не согласуется с имеющимися экспериментальными данными по потенциалам ионизации атомов и катионов и противоречит всесторонне апробированным законам электростатики;
- систематика, принятая в спектроскопии, механически перенесена на многоэлектронные атомы, когда описание энергетических уровней атома водорода в возбужденном состоянии стало концептуальным основанием для систематизации электронных оболочек атомов в основном состоянии; фактически произошло отождествление абстрактных форм атомных орбиталей с реальным распределением электронной плотности атомов;
- диффузный характер волновых функций многоэлектронных атомов не согласуется с экспериментальными данными по поляризуемостям и потенциалам ионизации, которые свидетельствуют о высокой жесткости электронных оболочек и твердых границах самих атомов;
- методология вероятностного описания электрона предполагает модель бесструктурного атома и тем самым исключает саму возможность изучения электронного строения атома.

Все это достаточно очевидные положения, хотя их не принято обсуждать на страницах академических журналов. Да и сама постановка вопроса в такой незавуалированной форме воспринимается в научном сообществе далеко не однозначно. Конечно, эти вопросы можно игнорировать, но обойти их нельзя. Сегодня проблема выходит наружу. Практика в лице нанотехнологии требует от науки конкретных результатов; в первую очередь необходимо создать теоретические основы нанотехнологии, которая могла бы обеспечить всю технологическую цепочку

производства наноизделий, включая стадии проектирования, конструирования и изготовления. Невозможно себе представить создание будущих нано-производств или нанофабрик в отсутствие научного и теоретического обеспечения механосинтеза. Сегодня в печатные издания, посвященные вопросам становления нанотехнологии, механически переносятся ставшие традиционными заклинания о том, что у квантовой механики есть определенные трудности, но они носят временный характер и рано или поздно будут преодолены. Тем самым создается ложное представление о действительном состоянии науки о веществе, которое уводит в сторону от решения одной из первоочередных задач нанотехнологии — создания ее теоретических основ.

Конечно же, попытки преодолеть создавшуюся ситуацию предпринимались на всем протяжении времени с момента создания квантовой теории многоэлектронного атома. Предложен ряд оригинальных моделей электронного строения атомов, заслуживающих внимательного к ним отношения и требующих всестороннего обсуждения. Важным шагом на этом пути стало введение в описание модели атома геометрического параметра (радиуса), что позволило вывести моделирование как научный метод исследования на принципиально новый, более высокий уровень — на уровень количественного описания.

Неоклассическое описание атома. В основе сегодняшнего понимания электромагнитной природы вещества лежит классическая теория Максвелла—Лорентца [5]. Современное описание вещества соответствует феноменологическому уровню и не выходит за рамки теорий типа *ad hoc*. В принципе они позволяют объяснить известные явления и эффекты, наблюдаемые в экспериментах с веществом. Однако они бессильны в решении кардинальной задачи, стоящей перед наукой о веществе, — задачи синтеза вещества с "наперед заданными свойствами". В этом отношении сегодняшнее состояние теории вещества не отвечает запросам практики в области создания искусственного вещества, включая нанотехнологию. Более того, приходится констатировать, что на данном этапе своего становления нанотехнология развивается стихийно, без четких методических и теоретических ориентиров [2—4].

Ситуация может измениться кардинальным образом в связи с появлением достоверных данных об основных характеристиках атома, полученных с помощью неразрушающих методов измерения. Речь идет об электронной *поляризуемости*, которая является фундаментальным свойством атомов и проявляется в способности их электронных оболочек к упругой деформации в электрических полях [5]. Поляризуемость относится к категории атомных констант и является отражением внутреннего устройства атома. В целях установления информативности поляризуемости в отношении электронного строения атомов обратимся к методу "черного ящика", с помощью ко-

торого осуществляется эмпирический метод познания вещества [9].

Исходной величиной для рассмотрения выступает так называемая *обобщенная восприимчивость* χ , являющаяся результатом экспериментального определения и равная $\chi = x/X$, где x — отклик исследуемой системы на внешнее воздействие X (представляющее одно из известных физических полей). Именно она выступает в качестве исходной величины для нахождения свойства отдельного атома, количественное описание которого достигается с помощью так называемой *обобщенной поляризуемости*. Она равна $\alpha = \chi/N$, где N — атомная плотность вещества при относительно низком давлении (при котором удовлетворяется условие малости межатомных взаимодействий). Анализ показывает, что наиболее приемлемой для нашего рассмотрения является *электрическая поляризуемость* [2, 5]. Именно она выступает в качестве источника первичной информации о внутриатомном строении: она является функцией его "состава" и "структуры". "Структура" — это электронная конфигурация, которая формируется в результате совместного действия сил кулоновского притяжения между ядром (остовом) и электронами и сил кулоновского отталкивания между собственно электронами. Под "составом" атома надо понимать число электронов, соответствующее порядковому номеру элемента Z в таблице Менделеева. Обычно в эксперименте атом идентифицирован и потому "состав" атома можно считать заданным априори. В результате поляризуемость оказывается однозначной функцией его "структуры". Вместе с тем, атомам присуща сферическая симметрия, поэтому в качестве единственного *структурного параметра* атома выступает радиус a .

Остается решить задачу по установлению связи между величиной свойства (поляризуемостью) и микроскопической величиной (радиусом атома) в виде соответствующего аналитического уравнения. Обобщенным результатом предшествующих исследований в этой области может служить уравнение $\alpha = k a_n^3$ (где k — коэффициент, зависящий от принимаемой модели), справедливое для водородоподобных систем. С учетом оболочечной структуры многоэлектронных атомов его радиус складывается из радиуса его остова $a_{\text{ост}}$ и расстояния d_n между внешними электронами и остовом атома, так что $a_n = d_n + a_{\text{ост}}$. В свою очередь радиус остова атома складывается из внутренних межоболочечных расстояний. Эффективное расстояние d_n непосредственно связано с поляризуемостью атома: эта связь имеет вид $\alpha = k d_n^3$ [10]. Статус поляризуемости как атомной константы предопределяет соответствующий статус радиуса атома a и межоболочечных расстояний d . Сам факт установления связи между поляризуемостью и геометрическими параметрами

атома (включая радиусы оболочек) чрезвычайно важен, поскольку он подтверждает принципиальную постижимость атома.

Вместе с тем, для выбора приемлемой модели атома в процессе исследований необходимо иметь некоторый количественный критерий. Для атомов с их сферической симметрией в качестве такого критерия может быть принят радиус и/или параметр, характеризующий энергетическое состояние атома. Такая возможность количественного сравнения атомов по данным их радиусов появилась относительно недавно — только после того, как была установлена возможность их экспериментального определения на основе измерения электрической поляризуемости. Систематические данные по поляризуемостям атомов появились лишь в конце 70-х годов прошлого столетия. А ключевая роль поляризуемости и радиуса атома в установлении связи его с электронным строением и сегодня до конца не осознана.

Следующий шаг в построении приемлемой модели атома видится в определении энергетического состояния атома. Этой цели служит универсальное соотношение $\epsilon = -e^2/d_n$ между энергией связи ϵ и расстоянием d_n между остовом атома и внешними электронами, имеющими заряд e [5, 10]. Данное соотношение отражает тот немаловажный факт, что валентные электроны находятся в поле центральных сил ядра (остова атома). Вместе с тем, энергия связи ϵ является результатом совокупного действия внутриатомных сил — сил кулоновского притяжения ϵ_{ne} электронов со стороны ядра (остова атома) и сил взаимного отталкивания ϵ_{ee} между электронами. Эти величины самым непосредственным образом определяют пространственное положение электронов относительно своего ядра. Данное обстоятельство предопределяет очередной шаг в моделировании атома; он заключается в анализе зависимости энергии связи от номера элемента таблицы Менделеева в логической цепи от простого (атом водорода) к сложному (многоэлектронные атомы) в целях определения составляющих энергии ϵ_{ne} и ϵ_{ee} . Можно предположить, что в силу сферической симметрии атома эти величины ответственны за формирование электронных оболочек и потому несут информацию об их строении. Выстраивается логическая цепь причинно обусловленных звеньев в направлении от макро к микро: $\chi \rightarrow \alpha \rightarrow a, d \rightarrow \epsilon \rightarrow \epsilon_{ne}, \epsilon_{ee} \rightarrow s$, которая раскрывает сущность эмпирического метода постижения атомного строения s .

Основные положения настоящей схемы апробированы в рамках *диполь-оболочечной* модели атома [6, 10]. Она является развитием основополагающей и концептуально апробированной оболочечной модели, в начальном варианте предложенной Н. Бором. Согласно данной модели атом представляет собой многослойную структуру вложенных друг в друга

электронных сферических оболочек. Устойчивость атомов достигается благодаря динамическому равновесию сил кулоновского притяжения электронов в центральном поле ядра и центробежных сил отталкивания вращающихся электронов. Однако ни модель Н. Бора, ни последующие модификации оболочечной модели атомов не смогли раскрыть электронную структуру атомов и объяснить механизм формирования электронных оболочек. Радикальный шаг в усовершенствовании оболочечной модели атомов был сделан в результате того, что в описание модели были введены количественные характеристики: энергия связи ϵ и геометрические параметры a_e , $a_{\text{ост}}$ и d_n , полученные на основании данных измерения поляризуемости α этих атомов [5].

Концептуальной основой диполь-оболочечной модели является теорема Гаусса, согласно которой заряд на поверхности замкнутой полости равен сумме всех положительных и отрицательных зарядов внутри этой полости, а результирующий заряд эквивалентен точечному заряду. При заданном "составе" атома решаемая задача сводится к непосредственному установлению электронной конфигурации атома, т. е. к определению взаимного положения электронов по отношению друг к другу и к ядру. Тем самым удалось свести многочастичную (многоэлектронную) систему к двухчастичной (двухзарядовой) системе, состоящей из остова, имеющего положительный заряд $+eN_n$ (N_n — число электронов на внешней n -й оболочке), и заряда внешней оболочки как системы взаимосвязанных между собой N_n электронов. Согласно данной модели, устойчивость атома определяется чисто кулоновским взаимодействием между нижележащей оболочкой и каждым из электронов вышележащей по отношению к ней оболочки, т. е. энергия связи ϵ электронов внешней оболочки обусловлена действием сил кулоновского притяжения валентных электронов к остову атома и сил взаимного отталкивания электронов внешней оболочки [10].

Другим руководящим принципом, который положен в основу построения диполь-оболочечной модели, является принцип минимума потенциальной энергии электронов. Согласно данному принципу, электроны каждой из оболочек в результате взаимного отталкивания стремятся образовать правильную конфигурацию с равноудаленными электронами, так что: атомы I группы таблицы Менделеева приобретают точечную конфигурацию, атомы II группы — линейную (зеркально-симметричную относительно ядра), атомы III группы — тригональную, атомы IV группы — тетраэдрическую и т. д. вплоть до атомов VIII группы, которым соответствует гексаэдрическая (кубическая) конфигурация. Согласно данной модели, электроны локализованы в положении вершин перечисленных фигур. Электроны каждой отдельной оболочки тождественны, а их энергии вырождены. Для описания данной модели необ-

ходимо и достаточно иметь два параметра: n — число оболочек (или номер периода) и N_n — число электронов на n -й оболочке. Эти параметры однозначно характеризуют геометрию (радиус и межоболочечные расстояния) и энергетическое состояние (энергию или потенциал ионизации) атома. Данная модель атома в статике совместима с ее динамическим поведением в предположении, что каждый электрон вращается вокруг ядра (остова атома) по своей независимой эллиптической орбите, фокус которой совпадает с центром (ядром) данного атома. Характер вращательного движения электронов одинаков независимо от числа электронов на оболочке. При этом каждая электронная оболочка сохраняет свою правильную конфигурацию, как и в представлении статической модели атома. Это достигается за счет самосогласованного движения электронов в центральном поле ядра (остова) и в условиях их взаимного кулоновского отталкивания. Эллиптические орбиты образуют розетку с числом лепестков, равным числу валентных электронов. В результате у атома формируются выделенные направления с повышенной электронной плотностью, которые обеспечивают направленность связей в структуре молекул и плотных веществ.

Согласно диполь-оболочечной модели электроны в центральном поле остова атома стремятся занять пространственное положение, соответствующее одной из правильных геометрических фигур, вписанных в сферу с радиусом a . Это означает, что электроны находятся на одинаковых расстояниях d_n от ядра и на одинаковых расстояниях друг от друга. При условии баланса внутриатомных сил притяжения и отталкивания, имеющих кулоновское происхождение, электроны становятся энергетически неразличимыми, т. е. их энергии связи ϵ_n вырождены. Это важный результат, поскольку он вносит определенность в отношении потенциальной энергии ϵ_n электронов. Это означает, что многочастичная трудно решаемая задача может быть сведена к задаче о взаимодействии двух зарядов — положительного заряда $+eN_n$ остова атома и заряда каждого из электронов $-e$, так что $\epsilon_n = -\frac{e^2 N_n}{d_{1n}}$ [6]. В результате движение электронов может быть представлено с помощью одноэлектронного уравнения Гамильтона

$$\epsilon_n = \epsilon_k + \epsilon_n = \frac{L^2}{2ma_n^2} - \frac{e^2 N_n}{d_{1n}}.$$

Здесь ϵ_k и ϵ_n — кинетическая и потенциальная энергии соответственно; L — момент количества движения; m и e — масса и заряд электрона; a_n — радиус атома; d — расстояние между остовом атома и его валентным электроном; $a_n = d_n + a_{\text{ост}}$, где $a_{\text{ост}}$ — ра-

диус остова, который в свою очередь складывается из суммы внутренних межоболочечных расстояний; N_n — порядковый номер атома в n -м периоде. Настоящее уравнение может служить методическим основанием для построения неоклассической теории атома.

Электронная структура атома → свойство вещества. Все свойства вещества, такие как прочность, проводимость, теплоемкость и т. д., в конечном итоге предопределены электронным строением атомов; сегодня это утверждение представляется трюизмом. В электронной структуре атома заложена информация, закодированная на стадии формирования материи, и ее постижение и актуализация позволили бы вооружить практику рецептом создания искусственных атомно-молекулярных систем.

По определению свойство вещества — это способность вещества реагировать на внешнее воздействие, представляющее одно из возможных физических полей (из числа механического, электрического, магнитного, электромагнитного и теплового полей) [5, 9]. Все многообразие свойств вещества может быть сведено к главным и сопряженным свойствам; главные свойства классифицируются по признаку воздействующего поля — электрические, магнитные, электромагнитные, механические и тепловые. Все прочие свойства вещества являются производными от главных свойств [5]. Количественное описание свойств достигается с помощью обобщенной восприимчивости χ (см. выше).

Эволюция вещества — это последовательный переход от простейшей формы материи (атомов и молекул) к ее более сложным формам в виде вещества. Архитектура вещества определяется его надатомной и/или надмолекулярной структурой, которая, собственно, и предопределяет все наблюдаемые свойства вещества. Природа данного микро-макро перехода хорошо известна и является результатом и следствием электромагнитных взаимодействий [5, 9]. Отсюда следует, что проблема свойств вещества, в том числе искусственных атомно-молекулярных конструкций, — это проблема межатомных и межмолекулярных взаимодействий.

Одним из признанных методов исследования межатомных и межмолекулярных взаимодействий является метод вариации плотности вещества, согласно которому направленное увеличение плотности вещества приводит к соответствующему увеличению интенсивности взаимодействия между атомами или молекулами. Описание данной экспериментальной процедуры осуществляется с помощью так называемого метода вириального разложения, согласно которому равновесное свойство реального вещества, количественное описание которого дости-

гается с помощью обобщенной восприимчивости χ , может быть представлено в виде разложения по степеням плотности ρ [5, 9]

$$\chi = \chi_T + \chi_1 \rho + \chi_2 \rho^2 + \dots, \quad (1)$$

где $\chi_T = \lim_{\rho \rightarrow 0} \chi$ — величина свойства χ , соответствующего идеальному состоянию вещества (вещество в газовой фазе при относительно невысоком давлении); χ_1 и χ_2 — второй и третий вириальные коэффициенты, которыми учитываются отклонения от свойств идеального вещества в первом и втором приближении малости возмущения.

С учетом связи $\alpha = \chi/N$ разложение (1) можно привести к виду

$$\alpha(\rho) = \alpha_1 + \frac{\partial \alpha}{\partial \rho} \Delta \rho + \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \rho^2} (\Delta \rho)^2 + \dots, \quad (2)$$

где первый член данного разложения представляет атомную (молекулярную) константу как характеристику идеального состояния вещества, второй член — это поправка на неидеальное состояние вещества в линейном приближении; третий член — поправка на неидеальное состояние вещества в квадратичном приближении и т. д.

Теперь поляризуемость атомов выступает в качестве исходного пункта исследований в направлении от микро к макро, так что $\alpha \xrightarrow{\rho} \chi \rightarrow \Delta \chi \rightarrow U$, где обобщенная восприимчивость χ варьируется от идеального состояния вещества до состояния, соответствующего реальному веществу с плотностью ρ , а приращение $\Delta \chi$ соответствует переходу от идеального состояния к реальному и несет искомую информацию о межатомных (межмолекулярных) взаимодействиях U . В свою очередь энергия U предопределяет архитектуру надатомной или надмолекулярной структуры вещества и его свойства. Уравнение (1) служит концептуальным основанием для нахождения связи эмпирических величин свойства с энергией межатомного (и межмолекулярного) взаимодействия. Изменение поляризуемости атомов или молекул на $\Delta \alpha$ обуславливает соответствующее изменение макроскопической величины, например диэлектрической восприимчивости, на $\Delta \chi$. В соответствии с теорией диэлектрической поляризации [5]

$$\chi = N \alpha_g \left(1 + \frac{\Delta \alpha}{\alpha_g} \right) \text{ или } \frac{\Delta \chi}{\chi_g} = \frac{\Delta \alpha}{\alpha_g}, \quad (3)$$

где α_g — поляризуемость вещества, соответствующего идеальному состоянию χ_g ; N — атомная или молекулярная плотность.

В качестве примера можно привести выражение для энергии межатомного взаимодействия, определяемую через величины $\Delta\alpha$ (или $\Delta\chi$) [11]

$$U = \frac{4\varepsilon}{9} \left(\frac{\Delta\chi}{\chi} \right)^2 = \frac{4\varepsilon}{9} \left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right)^2, \quad (4)$$

где ε — энергия связи электронов внешней оболочки атома.

Уравнение (4) описывает связь между поляризуемостью атома и энергией межчастичных взаимодействий и вместе с этим раскрывает механизм формирования связи. Он заключается в увеличении электронной плотности на линии связи атомов (или молекул) за счет перераспределения общего электронного заряда участвующих во взаимодействии атомов или молекул. В результате часть их энергии связи $\Delta\varepsilon$ валентных электронов с ядром (остовом атома) передается на образование общей межатомной (межмолекулярной) связи, представляемой энергией парных взаимодействий $u(R)$; эта величина характеризует зависимость энергии межатомного или межмолекулярного взаимодействия от расстояния R между микрочастицами [12]. Оболочечная модель атома позволяет принципиально по-новому подойти к построению парных потенциальных функций [2]. Отличительной особенностью этих потенциалов является то, что их построение основано на понимании физических явлений, лежащих в основе взаимодействий между атомами. Существенным представляется то, что они являются результатом и следствием свойств и структуры самих атомов. Потенциалы $u(R)$ такого типа выступают связующим звеном между атомным уровнем и веществом. Именно с их помощью осуществляется расчет энергии U межатомных и/или межмолекулярных взаимодействий и соответственно энергии сцепления элементов наноустройств. Выстраивается цепь причинно обусловленных звеньев $(\alpha_1 + \alpha_2) \rightarrow \Delta\alpha \rightarrow \Delta\varepsilon \rightarrow u(R) \rightarrow U \rightarrow \chi$. Конечным звеном данной логической цепи является энергия связи (сцепления) U атомов или молекул, характеризующая физическое состояние вещества, его целостность и устойчивость, а также его свойства χ ; между собой они связаны известным соотношением $\chi \sim \partial^2 U / \partial X^2$.

Для Ван-дер-Ваальсовых систем (к ним относятся атомные, молекулярные, супрамолекулярные системы) доля энергии U/ε , делегируемой атомами (молекулами) на образование межатомной (межмолекулярной) связи, невелика и обычно не превышает более 10 %. У большинства атомов в результате их взаимодействия электронные оболочки перекрываются и образуют ковалентно-ионные связи. Энергия такой (химической) связи намного больше энергии связи Ван-дер-Ваальсовых систем и достигает 10 эВ. В принципиальном отношении потенциальная функция химически связанных атомов строится аналогичным образом, как и рассмотренные выше по-

тенциальные функции для Ван-дер-Ваальсовых систем. Но в этом случае энергия и устойчивость химической связи определяется балансом сил притяжения между положительно заряженным остовом атома и электронами "чужого" атома, с одной стороны, и взаимным отталкиванием валентных электронов разных атомов — с другой. Приведенная выше схема формирования свойств χ , очевидно, применима и к атомно-молекулярным системам с химическими связями. Поскольку химическое связывание определяется прямым взаимодействием электронов с зарядом остова атома, то его интенсивность U оказывается существенно большей по сравнению с энергией связи Ван-дер-Ваальсовых систем. Доля энергии ε связи атома, которая идет на образование химической связи, может достигать половины своего значения и более. Например, энергия связи атома азота $\varepsilon = 14,5$ эВ, а энергия химической связи молекулы азота равна $U \approx 10$ эВ. Надо отметить, что энергии химических связей большинства молекул известны с достаточно высокой точностью, и они успешно могут быть использованы в практике нанопроектирования, а присущая молекулам структурная устойчивость предполагает возможность использования молекул наравне с атомами в качестве строительных блоков при конструировании наносистем. Такие молекулы (с выраженными ковалентными связями) как азот, водород, кислород и т. д., обычно не способны образовывать прочные цепочки и более сложные структуры, и их применимость ограничена образованием молекулярных систем с физическим характером связывания. Исключением из этого правила выступают ионные и ковалентные кристаллические структуры.

Очевидно, что свойства той или иной наноконструкции (механические, геометрические, электрические, магнитные, "химические") генетически обусловлены свойствами собственно атомов и молекул, используемых для ее построения. Располагая знаниями о строении атомов и механизмах образования атомно-молекулярных систем, можно приступить к разработке стратегии наноконструирования. Схематически она может быть представлена в следующей логической последовательности: электронная конфигурация строительных атомов s и их энергии связи электронов $\varepsilon \rightarrow$ поляризуемости $\alpha \rightarrow$ парные потенциалы $u(R) \rightarrow$ структурная формула, соответствующая атомно-молекулярной наноконструкции $\rightarrow$ энергия сцепления конструкционных элементов $U(R_0) \rightarrow$ отдельные фрагменты $\rightarrow$ блоки $\rightarrow$ конструкция в целом $\rightarrow$ свойства χ и функции f разрабатываемой конструкции. Эту цепочку можно замкнуть саму на себя в целях корректировки соответствующих звеньев нанопроизводства путем итерации данной процедуры для достижения ожидаемых характеристик χ и f . Данную схему гипотетического нанопроизводства возглавляет атом как исходная и основополагающая структурная единица (строительный элемент)

наноконструкций. Очевидно, что постановка и практическое внедрение нанотехнологии невозможны без знания и понимания внутриатомного устройства.

Вместе с тем, на основании данных структуры z атомов и их поляризуемостей α в соответствии с их внутренней связью с энергией U межатомных или межмолекулярных взаимодействий появляется принципиальная возможность прогнозирования физико-химических свойств χ и функций f создаваемой конструкции. Например, для получения у атомно-молекулярных систем предельных свойств (определяющих предельные технические характеристики и эксплуатационные свойства проектируемых конструкций, таких как механическая, электрическая, оптическая прочность, устойчивость системы в целом) необходимо выбрать исходные атомы или молекулы, которые по своим параметрам s , α , ϵ могли бы обеспечить образование максимально достижимых энергий межатомных связей U (порядка 10 эВ). Небольшим энергиям связи U (порядка 0,01 эВ) соответствуют предельно низкие свойства, характерные для Ван-дер-Ваальсовых систем. Все многообразие физико-химических свойств заключено в этих границах. То же относится и к транспортным свойствам (проводимость, теплопроводность, вязкость, диффузия и т. д.), которые изначально определяются энергией, ограничивающей свободу движения электронов (ионов). Эта энергия является результатом и следствием взаимодействия несвязанных электронов (ионов) с его ближайшим окружением. Здесь диапазон возможных свойств лежит в пределах между нулевой энергией (соответствующей сверхпроводимости, сверхтекучести) и минимальной энергией связи электрона со своим ближайшим окружением, которая по порядку величин равна тепловой энергии $U \approx kT$.

Таким образом, проектирование наноустройств сводится к выполнению определенной последовательности процедур. Сначала устанавливается связь ожидаемых свойств (в единицах χ) или функций (как совокупности свойств) с энергией связи U с помощью уравнения типа (4). Эта величина U принимается для сравнения с энергией U , рассчитываемой по данным констант атомов или молекул, которые надо подобрать таким образом, чтобы обеспечить согласование рассчитываемой и прогнозируемой энергии U . Фактическим подтверждением правомерности данной схемы могут служить модельные системы естественного происхождения, такие как: молекулы типа BeH_2 , линейную конфигурацию которых предопределяет электронное строение атомов с зеркально-симметричной относительно ядра парой

электронов; молекулы, имеющие геометрию в виде трехлучевой звезды типа BH_3 вследствие тригональной электронной конфигурации атомов третьей группы; молекулы тетраэдрической симметрии типа CH_4 — атомов четвертой группы и т. д. Трансляционная симметрия кристаллов и тип кристаллической решетки также являются следствием электронного строения составляющих их атомов.

Выше было показано, каким образом данная схема работает в принципе. Для реализации данной схемы необходимо разработать действенную теорию вещества, которая могла бы раскрыть закономерные связи между атомно-молекулярным и макроскопическим уровнями. Создание такой теории сегодня стало вполне реальным в результате единого описания всех структурных уровней электронного строения вещества (см. выше), а также благодаря разработке действенной диполь-оболочечной модели [6, 10].

Основной вывод: атом — это альфа и омега современного этапа становления технологии и отношение нанонауки к атому как к объекту исследования должно быть соответствующим. Невозможно создать научные основания нанотехнологии, не имея физически обоснованной теории электронного строения атома.

Список литературы

1. **Нанотехнология** в ближайшем десятилетии // Под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса и П. Аливисатоса. М.: Мир, 2002.
2. **Потапов А. А.** Состояние и перспективы построения теоретических основ механосинтеза // Нанотехника. 2005. № 4. С. 32—46.
3. **Потапов А. А.** Концептуальные основы проектирования наносистем // Нано- и микросистемная техника. 2008, № 7, С. 2—7.
4. **Потапов А. А.** Принципы проектирования наносистем // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 3. С. 5—13.
5. **Потапов А. А.** Деформационная поляризация. Новосибирск: Наука, 2004.
6. **Потапов А. А.** Диполь-оболочечная модель атома и периодическая система элементов // Бутлеровские сообщения. 2006. Т. 10. № 7. С. 1—23.
7. **Бацанов С. С.** Экспериментальные основы структурной химии. М.: Изд-во стандартов, 1986.
8. **Степанов Н. Ф.** Квантовая механика и квантовая химия. М.: Мир, 2001.
9. **Потапов А. А.** Диэлектрический метод исследования вещества. Иркутск: Изд-во Иркут. ГТУ, 1990.
10. **Потапов А. А.** Оболочечная модель электронного строения атомов // Вестник Иркутского ГТУ. 2006. № 3. С. 109—115.
11. **Потапов А. А.** Способ измерения энергии межатомных и межмолекулярных взаимодействий и координационного числа атомных и молекулярных веществ. Патент на изобретение № 2287153. Бюл. № 31 от 10.11.2006.
12. **Каплан Н. Г.** Введение в теорию межмолекулярных взаимодействий. М.: Наука, 1982.

А. Н. Лугин, канд. техн. наук, нач. отдела,
ФГУП "Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов", г. Пенза

НАНОРАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА И МОЩНОСТИ РАССЕЯНИЯ В ТОНКОПЛЕНОЧНОМ КОНТАКТЕ

Показано, что в резистивном слое на границе контакта наблюдаются наноразмерные эффекты пространственной неоднородности тока и мощности рассеяния. Пиковые значения тока и мощности рассеяния выше в 3–10 раз на длине 0,01 мкм от границы контакта.

Ключевые слова: резистор, тонкопленочный контакт, сопротивление, плотность тока, мощность рассеяния, разность потенциалов, распределение, неоднородность, наноразмерный эффект.

Одним из основных узлов аналоговых микроэлектронных устройств — резисторов, резисторных преобразователей, датчиков силы, операционных усилителей, цифроаналоговых и аналого-цифровых преобразователей и т. п., является контакт между тонкими слоями проводника (металлизации) и резистивного элемента. Повышение надежности и поиск методов расчета его электрических параметров уже более сорока лет остается актуальной задачей [1–5]. При этом в большей степени внимание уделяется распределению плотности тока и мощности рассеяния.

Высокие значения плотности тока и мощности рассеяния вследствие Джоулевой теплоты приводят к электромиграции и электродиффузии [4, 6] и возможному катастрофическому отказу — перегоранию тонкого слоя или параметрическому отказу — изменению электрических параметров микроэлектронного устройства выше допустимого значения вследствие изменения сопротивления контакта. Тенденция к дальнейшей миниатюризации электронных компонентов ведет к дальнейшему увеличению плотности тока и мощности рассеяния в контактах. Поэтому актуальность разработки методов анализа, контакта и изучения процессов, характеризующих рабочее состояние контакта, возрастает в еще большей степени.

Имеющиеся методы расчета тонкопленочного контакта [7–8], в том числе с использованием Т- и П-образных электрических схем, не предполагают расчета плотности тока, мощности рассеяния и сопротивления отдельных слоев по объему тонкопле-

ночных слоев или хотя бы по их длине и толщине. В лучшем случае они допускают расчет распределения суммарного тока, суммарной мощности по длине слоев, а также эффективного сопротивления контакта в целом, т. е. рассматривается практически одномерная модель распределения тока в тонких слоях.

В существующих методах моделирования и расчета типовых тонкопленочных конфигураций, а также расчета резистивных параметров межсоединений сложных микроэлектронных структур [9] исходят из двух одно- и двухмерных физических моделей:

1) задается ток через резистор (участок межсоединения) и рассчитывается разность потенциалов между двумя контактами, при этом области контактов считаются эквипотенциальными;

2) задается разность потенциалов и вычисляется сила тока через резистор. По результатам определения разности потенциалов или тока находят сопротивление узла резистора.

Однако эти методы моделирования и расчета неприемлемы для определения сопротивления участков тонкопленочного контакта при рассмотрении контакта в 3D-измерении, так как распределение потенциала по границам слоев неравномерно. Неравномерно и распределение тока на этих границах. То есть, если даже представить возможным равенство потенциалов поверхности вхождения тока в резистор во всех точках, то поверхность выхода тока не будет равномерной. Соответственно, электрическое сопротивление отдельных слоев контакта известными методами определить невозможно. Методы расчета не предусматривают расчета в 3D-измерении и распределения мощности в контакте, необходимого для определения его наиболее нагруженных участков и принятия необходимых мер, особенно в конструкциях, содержащих области с большим (на несколько порядков) перепадом удельных поверхностных сопротивлений [9].

Необходимость создания тонкопленочных резисторов с допуском отклонением и нестабильностью сопротивления не более $\pm 0,001\%$ и температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) не более $\pm 1 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ выдвигает задачу определения как сопротивления участков контакта, особенно металлизации, поскольку материал слоя металлизации имеет ТКС $(3400\text{—}4700) \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ и может ограничивать получение низких значений сопротивления резисторов, так и определения распределения тока и мощности рассеяния в зоне контакта в целях выявления ненадежных с точки зрения надежности работы мест и принятия мер по снижению возможности параметрического и катастрофического отказов.

Для ее решения была использована методика [10], суть которой заключается в построении объемной физической модели в виде V-образной эквива-

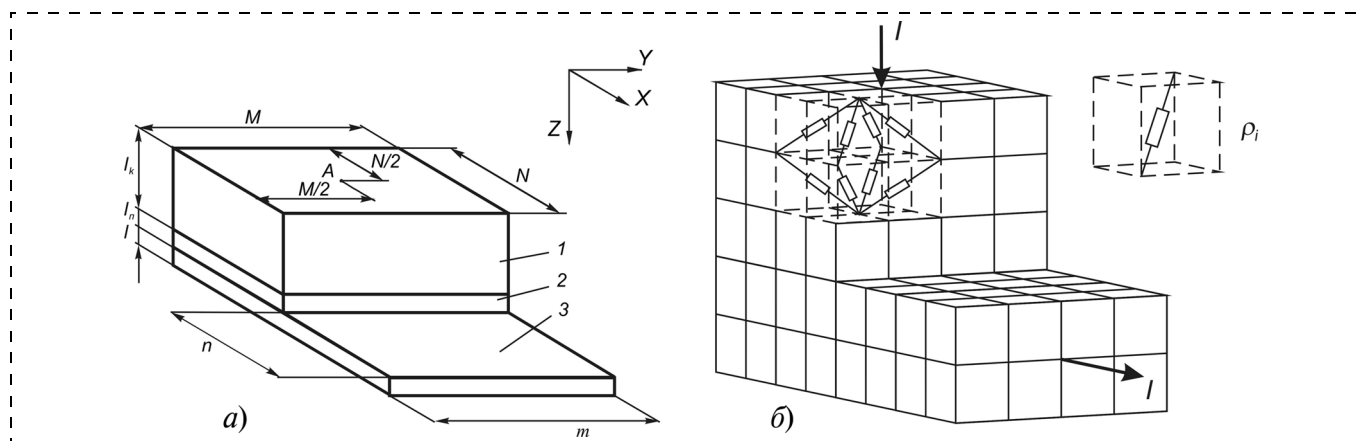


Рис. 1. Упрощенная конструкция тонкопленочного контакта (а) и объемная модель в виде эквивалентной электрической схемы замещения (б):

M, N, l_k, l_n, l — линейные размеры контактного узла; m, n — линейные размеры участка резистивной пленки, примыкающей к контакту; X, Y, Z — оси координат; A — точка присоединения соединительного проводника и вхождения тока; ρ_i — объемное удельное сопротивление i -го слоя контактного узла; I — входящий (выходящий) ток; 1—3 — номера слоев

лентной электрической схемы замещения контакта (рис. 1).

Для расчета сопротивления, токов и мощности рассеяния отдельных участков контакта использован метод узловых потенциалов [11], а для решения полученных и представленных в матричной форме уравнений — метод Гаусса [12].

Расчет параметров контакта проводился с учетом толщин металлизации и резистивного слоя, близких к реальным: толщина металлизации — до 2 мкм, резистивного слоя — до 0,1 мкм. Удельное поверхностное сопротивление принимали равным: для металлизации — 0,05 Ом/□, для резистивного слоя — 500 Ом/□.

На рис. 2—5 приведены в виде графиков результаты численного расчета.

На рис. 2 приведены графики распределения тока j по длине перехода из металлизации в резистивный слой в зависимости от длины контакта N при постоянных остальных геометрических размерах и удельном сопротивлении слоев.

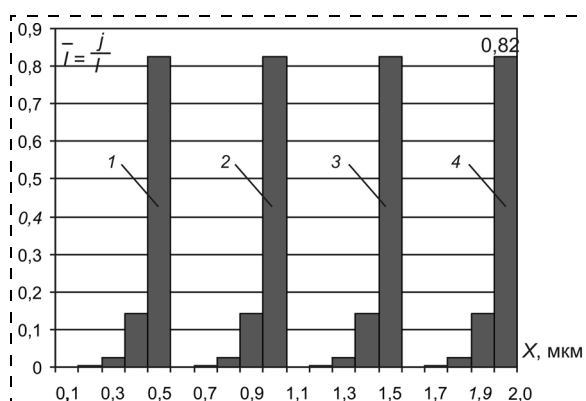
Как можно заключить (рис. 2, а), 82 % тока переходит в резистивный слой на длине конечного участка контакта, равной 0,1 мкм, независимо от длины контакта, причем 27 % его значения приходится на участок 0,01 мкм (рис. 2, б).

Длина участка перехода тока практически не изменяется при изменении геометрических размеров контакта и его слоев, удельного поверхностного сопротивления резистивного слоя в диапазоне 5...500 Ом/□.

На рис. 3 представлен график распределения потенциала. На рис. 4, 5 (см. вторую сторону обложки) даны графики тока и мощности рассеяния по резистивному слою в зоне контакта.

Результаты анализа приведенных расчетов позволили сделать следующие выводы.

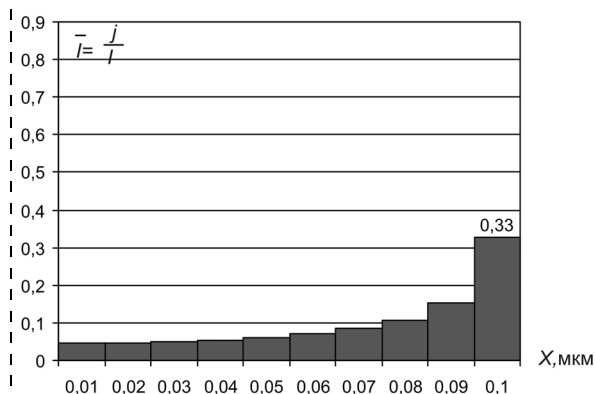
1. В резистивном слое тонкопленочного контакта наблюдаются нано-



а)

Исходные данные:

№ слоя	$\frac{N}{l} \rho$	$\frac{M}{l} \rho$	$\frac{l_n}{l} \rho$	$\frac{n}{l} \rho$	$\frac{\rho_i}{\rho_k}$
1	C	20	20	-	1
2	C	20	2	-	10
3	C	20	2	4	1000



б)

Исходные данные:

№ слоя	$\frac{N}{l} \rho$	$\frac{M}{l} \rho$	$\frac{l_n}{l} \rho$	$\frac{n}{l} \rho$	$\frac{\rho_i}{\rho_k}$
1	20	20	20	-	1
2	20	20	2	-	10
3	20	20	20	28	10000

Рис. 2. Распределение тока j по длине перехода N из подслоя в резистивный слой от длины N контакта:

а — $l = N = 0,5$ мкм; 2 — $N = 1,0$ мкм; 3 — $N = 1,5$ мкм; 4 — $N = 2,0$ мкм. Здесь $M = 1$ мкм; $l = 0,1$ мкм; $p = 2$ и $C = \frac{N}{l} p$; **б** — $N = M = 0,1$ мкм; $l = 0,1$ мкм; $p = 20$

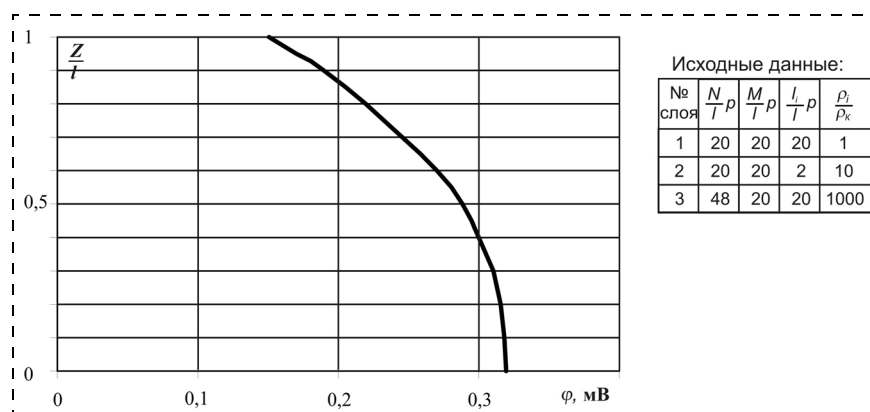


Рис. 3. Распределение потенциала ϕ по толщине l резистивного слоя при токе $I = 1$ мА, удельном поверхностном сопротивлении слоя $\rho = 500$ Ом/□, $\rho = 20$; Z — текущая координата по толщине резистивного слоя

размерные эффекты пространственной неоднородности распределения тока и мощности рассеяния, причем эти эффекты касаются и приконтактной области резистора.

2. Распределение тока в резистивном слое происходит неравномерно не только по длине, но и по его толщине, причем это распределение касается и приконтактной области резистора. Расчетный вдоль резистора ток в приграничной зоне контакта в верхнем слое резистивной пленки многократно (для приведенных расчетов более, чем в 2,4 раза на длине 0,01 мкм) превышает значение, необходимое для равномерного распределения. Пиковое значение переходного из металлизации в резистивный слой тока также многократно (для приведенных расчетов более чем в 3 раза на длине 0,01 мкм) превышает значение для равномерного распределения тока.

3. Распределение мощности рассеяния по толщине резистивной пленки неравномерно и в верхнем слое этой пленки многократно (для приведенных расчетов в приграничной зоне почти в 6 раз и более чем в 10 раз на длине 0,01 мкм от границы контакта) превышает значение, рассчитанное для мощности при равномерном распределении тока в резисторе. Распределение суммарной мощности рассеяния в резистивном слое контакта также неравномерно по длине контакта и на его границе превышает мощность, рассчитанную для равномерного распределения тока (для расчетных исходных данных в 2 раза).

4. Пространственная неоднородность тока и мощности рассеяния в приконтактной области распространяется на длину резистора, ориентировочно равную толщине резистивного слоя.

5. В тонкопленочном контакте с большим перепадом удельных поверхностных сопротивлений слоев 82 % тока переходит из слоя металлизации в резистивный слой на длине граничного участка контакта, равного толщине резистивного слоя.

6. Пространственная неоднородность распределения тока приводит к появлению некоторого добавочного сопротивления [6, с. 126], не учитываемого

предложенными ранее методами расчета.

7. В тонкопленочном контакте с большим перепадом удельных поверхностных сопротивлений слоев превышение мощности рассеяния в резистивном слое наблюдается на границе контакта с резистивным элементом на длине, ориентировочно равной толщине резистивного слоя.

8. Определение распределения тока и мощности по участкам контакта позволяет вычислить сопротивления этих участков. Для приведенных исходных данных они составили: для резистивного слоя под металлизацией —

220 Ом, для металлизации — 9 Ом. Дополнительное сопротивление приконтактного участка резистора составило 28 Ом. При переходе к контакту шириной 100 мкм эти значения равны 0,22 Ом, 0,009 Ом, 0,028 Ом соответственно, что ограничивает создание тонкопленочных резисторов с малыми значениями электрического сопротивления и ТКС при высоком удельном поверхностном сопротивлении.

Анализ допустимости распространения сделанных выводов на контакты больших размеров (до 25 мкм) показал, что расчетные данные отличаются от приведенных в пределах 15 %.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что в тонкопленочном контакте с большим перепадом удельных поверхностных сопротивлений слоев максимальное значение тока и мощности рассеяния сосредоточено на длине резистивного слоя, ориентировочно равной толщине резистивного слоя по обе стороны от границы контакта с резистивным слоем, а пиковое их значение наблюдается в верхней по толщине части резистивного слоя (для приведенных расчетов это зона границы контакта размером по длине 0,1 мкм и толщине 0,01 мкм).

Список литературы

1. Кайнов С. В., Алексеева Э. А. Исследование условий получения надежного пленочного контакта // Электронная техника. Сер. 9. Радиокомпоненты. 1967. Вып. 5. С. 120—124.
2. Кресин О. М., Харинский А. Л. Математический анализ тонкопленочного контакта // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Детали и компоненты аппаратуры. 1964. Вып. 5. С. 15—21.
3. Патент Польши (PL) 155937. Заявка № 272772. Пленочный резистор // Изобретения стран мира. 1992. № 3. С. 4.
4. А. с. 809411. М. Кл.³ H01 C 7/06. Белеков А. С., Головин В. И., Смирнов А. Б., Юсипов Н. Ю. Тонкопленочный резистор. Бюл. № 8 от 28.02.1981 г., заявлено 02.03.1979.
5. Гильмутдинов А. Х., Ермолаев Ю. П. Модели оценки сопротивления пленочных контактов и резисторов с распределенными параметрами. Казань: Новое знание, 2005. 76 с.

6. Смирнов В. И., Матга Ф. Ю. Теория конструкций контактов в электронной аппаратуре. М.: Сов. радио, 1974. 174 с.
7. Кресин О. М., Рогинский И. М., Харинский А. Л. Экспериментальное исследование пленочного контакта (на моделях). // Электронная техника. Сер. 6. Микроэлектроника. 1967. Вып. 5. С. 96—100.
8. Ермолаев Ю. П., Пономарев М. Д., Крюков Ю. Г. Конструкции и технология микросхем (ГИС БГИС). М.: Сов. радио, 1980. 254 с.
9. Авдеев Е. В., Зверев С. А., Яламов М. Ф. Расчет диффузионных резисторов с неоднородной проводимостью //

Микроэлектроника. Под ред. А. А. Васенкова. М.: Сов. радио, 1975. Вып. 9. С. 91—106.

10. Лугин А. Н., Оземша М. М. Моделирование контакта тонкопленочного резистора // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". Пенза, 2005. С. 289—293.
11. Сигорский В. П. Анализ электронных схем. Киев: Государственное издательство технической литературы УССР, 1964. 199 с.
12. Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченкова Н. В. Вычислительные методы для инженеров. — М.: Высшая школа, 1994. 544 с.

УДК 548.732

А. С. Маркелов, мл. науч. сотр.,
В. Н. Трушин, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
Е. В. Чупрунов, д-р физ.-мат. наук, проф.,
проректор по науч. работе,
Нижегородский государственный университет
им. Н. И. Лобачевского
E-mail: trushin@phys.unn.ru

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТРАСТА РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ДИФРАКЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ ОТ ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛОВ, ИМЕЮЩИХ КОЛОНЧАТУЮ СТРУКТУРУ

Исследуются особенности формирования контраста рентгеновских изображений при дифракции рентгеновских лучей от поверхности кристалла с измененной геометрией структуры его поверхности. Приведены данные моделирования формирования рентгеновских изображений, полученных при дифракции рентгеновских лучей от поверхности кристалла, имеющего колончатую структуру. Показано, что при использовании колончатой структуры разрешающая способность рентгеновских изображений повышается более чем в 10 раз, это позволяет формировать двумерные рентгеновские изображения.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, рентгеновское изображение, колончатая структура, разрешающая способность, температурное поле, контраст.

В работах [1—3] была показана возможность формирования пространственно неоднородных по интенсивности рентгеновских пучков, формирующихся за счет локального рассогласования брэгговских отражений, вызванных неоднородными температурными деформациями, распределение которых функционально связано с пространственной структурой проецируемого на поверхность кристалла оптического изображения. К числу недостатков данного способа формирования рентгеновских изображений (РИ) относится их малая разрешающая способность (РС), которая определяется теплопроводностью

кристаллов. Как показали расчеты [4], при толщине кристаллов от 20 до 2 мм, с коэффициентом теплопроводности (КТ) $\chi_{кр}$, равным $1,256 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ($\chi_{кр}$ соответствует КТ кристалла KN_2PO_4 (KDP)) и тепловых потоков порядка 2000 Вт/м^2 , РС составляла три пары линий на миллиметр (п. л./мм), что подтверждается экспериментально. При уменьшении толщины кристаллов (менее 2 мм) РС РИ растет, но уменьшение толщины может привести к увеличению температурного градиента по толщине кристалла, и, соответственно, к неконтролируемой деформации всей его поверхности. Некоторого увеличения РС РИ можно достичь за счет увеличения плотности теплового (светового) потока, однако в этом случае также возрастает влияние температурных градиентов, ухудшающих функциональное соответствие между тепловым потоком и РИ.

В данной работе на основе результатов моделирования исследуется возможность повышения РС РИ, получаемой от кристаллов, поверхность которых представляет сетку из колончатых структур (КС), которую можно получить травлением с использованием методов фото- и рентгенолитографии. Схематическое изображение КС показано на рис. 1.

Поверхность такой структуры можно представить в виде матрицы, светоприемника, состоящего из "пикселей-колонок" 1 с нанесенным на них поглощающим свет покрытием 2, на которое проецируется оптическое изображение. Оптическое изобра-

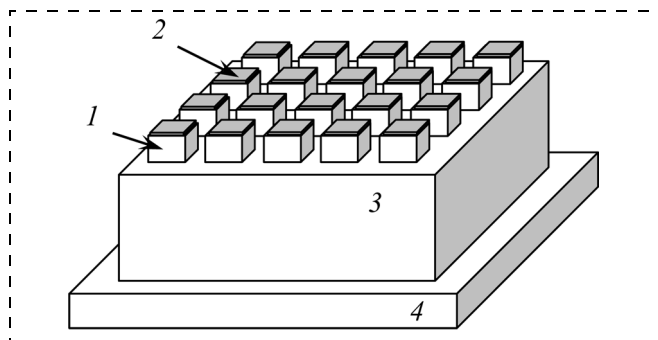


Рис. 1. Схематическое изображение колончатой структуры:

1 — элемент КС; 2 — поглощающее покрытие; 3 — основание; 4 — термостат

жение формирует в КС тепловое поле (ТП), структура которого функционально связана с оптическим изображением. В результате образуется неоднородный тепловой поток Q , направленный от поверхности КС к ее основанию 3. Для обеспечения стационарности ТП на поверхности КС, температура основания поддерживается постоянной с помощью термостата 4. По аналогии с тем, что при попадании квантов света на пиксель матрицы с зарядовой связью (ПЗС-матрицы) в нем образуется заряд, значение которого пропорционально числу упавших квантов, в случае КС повышается температура "пикселя-колонки", изменяющая параметры решетки кристалла. Считываемая информация с поверхности такой "матрицы" содержится в дифрагированном пучке в виде пространственно модулированного по интенсивности рентгеновского излучения.

Увеличение РС РИ, сформированного с помощью КС, связано с тем, что воздушная среда имеет малую теплопроводность $\chi_{\text{ср}}$ ($\sim 0,025$ Вт/м · К) по сравнению с кристаллом, поэтому уменьшает теплообмен между элементами КС ("пикселями-колонками") и тем самым снижает влияние теплопроводности кристалла на формирование РИ. К тому же $\chi_{\text{ср}}$ можно уменьшить, помещая КС в вакуум, что дополнительно улучшит функциональное соответствие между оптическим изображением и картой температурного поля, а следовательно, и РИ.

В этой связи представляет интерес исследование влияния высоты элементов КС на контраст и разрешающую способность РИ. Для этого проводился расчет температурного поля в элементах КС при облучении их тепловым потоком, достаточным для нагрева элементов ее поверхности до температуры 305 К. Расчет выполнялся для слоя КС на глубине 10 мкм от ее поверхности с коэффициентом теплопроводности среды $\chi_{\text{кр}}$, равным 1,256 Вт/м · К (соответствующий кристаллу KN_2PO_4). Ширина элементов КС 20 мкм, длина 1 мм.

Температура нижней части КС (основания), представляющей собой сплошную среду высотой 1 мм, задавалась постоянной (295 К). Область теплового воздействия на поверхности КС имела вид двух полос, формы и размеры которых соответствовали форме и размеру элементов КС. Расчет выполнялся для КТ среды (пространства между элементами КС) $\chi_{\text{ср}}$, равного 0,0125 Вт/м · К.

На рис. 2, а (см. третью сторону обложки) приведены данные расчета температурных полей (a_1, a_2, a_3) в КС, высота которых указана на рисунке (высота 0 мкм соответствовала сплошной среде).

Результаты расчета температурных полей в КС используются в качестве входных данных для моделирования формирования контраста РИ. На рис. 2, в приведены топограммы $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, соответствующие температурным полям a_1, a_2, a_3 , рассчитанным для рабочих точек, указанных на кривых качания $\theta_1, \theta_2, \theta_3$

(см. рис. 2, б). В расчетах исходное (без теплового воздействия) значение полуширины кривой качания было равно $10''$. На рис. 2, г приведена зависимость изменения температуры в КС вдоль штриховой линии, указанной на рис. 2, а.

Приведенные расчетные данные указывают на возможность увеличения контраста и разрешающей способности РИ при использовании КС в качестве дифракционной среды. Это достигается за счет увеличения минимальной температуры (ΔT_{min}) между освещаемыми и не освещаемыми световым (тепловым) потоком элементами КС структур, а также локализацией температуры в области воздействия. Поскольку теплообмен между элементами КС происходит через основание КС, пространство между колонками можно уменьшить за счет увеличения высоты КС и уменьшения толщины ее основания, а также, помещая КС в разреженную среду, т. е. в среду с меньшей теплопроводностью, чем воздух.

На рис. 3, а показаны расчетные зависимости 1, 2, 3 разности температур ΔT между КС 1 и 2 (рис. 3, б) от их высоты, полученные при различных значениях теплопроводности среды $\chi_{\text{ср}}$, равной 0,025, 0,0125 и 0,0025 Вт/м · К, соответственно.

Из рис. 3, а видно, что значение ΔT возрастает по линейному закону ($y = 0,056x$) при изменении высоты элементов КС от 0 до некоторого оптимального значения $h_{\text{опт}}$, при котором ΔT принимает максимальное значение ΔT_{max} , затем спадает по степенному закону ($y = 20 x^{-0,36}$) до значения ΔT_{min} . Значения ΔT_{min} , ΔT_{max} и $h_{\text{опт}}$ зависят от теплопроводностей КС и пространства между ее элементами, а также высоты основания КС. Для значений теплопроводности 0,025, 0,0125 и 0,0025 Вт/м · К и высоты основания КС, равной 1 мм, $h_{\text{опт}}$ составляет 80, 100 и 250 мкм, соответственно. При уменьшении

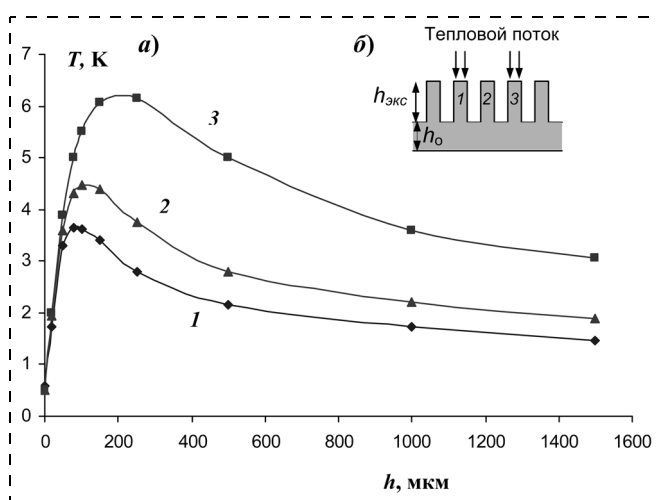


Рис. 3. Расчетные зависимости (а) разности температур ΔT между элементами 1 и 2 колончатой структуры (б) от их высоты, полученные при различных значениях $\chi_{\text{ср}}$, равных 0,025 (кривая 1), 0,0125 (кривая 2) и 0,0025 (кривая 3) Вт/м · К, соответственно (толщина основания $h_0 = 1$ мм)

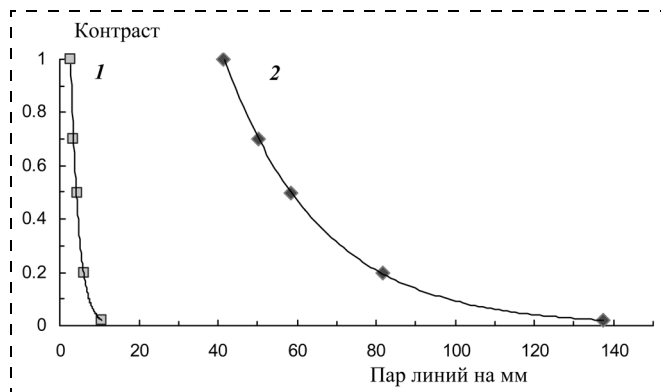


Рис. 4. Частотно-контрастная характеристика рентгеновских изображений, рассчитанная для сплошной (кривая 1) и колончатой структуры (кривая 2). Толщина основания $h_0 = 2$ мм, высота колонок $h_{\text{опт}} = 80$ мкм, поток равен 150000 Вт/м^2 ; $\chi_{\text{ср}} = 0,025 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$

$\chi_{\text{ср}}$ значение ΔT_{max} и ΔT_{min} увеличиваются, причем увеличение ΔT_{max} более выражено.

Разрешение оптических систем оценивают с помощью частотно-контрастной характеристики (ЧКХ), описывающей способность таких систем передавать глубину модуляции яркости объекта (контраст). На рис. 4 приведена ЧКХ рентгеновских изображений, рассчитанная для сплошной (кривая 1) и колончатой (кривая 2) структуры. На рис. 4 по вертикали отложены значения функции передачи контраста, т. е. относительные значения контраста изображения, которые снижаются от 1 до 0 по мере увеличения пространственной частоты, т. е. числа пар линий на миллиметр.

По приведенной зависимости (рис. 4, кривая 2) можно количественно оценить разрешающую способность РИ, значение которой указывает на возможность формирования двумерных РИ изображений. Для оценки такой возможности нами было проведено моделирование формирования РИ для случая теплового потока через КС, распределение в котором соответствует распределению градаций серого цвета картины (размером 100 на 100 точек (пикселей)), показанной на рис. 5, а.

Исходное изображение (рис. 5, а) переводилось в тепловой поток, для этого цвету каждого пикселя ставилось в соответствие значение теплового потока.

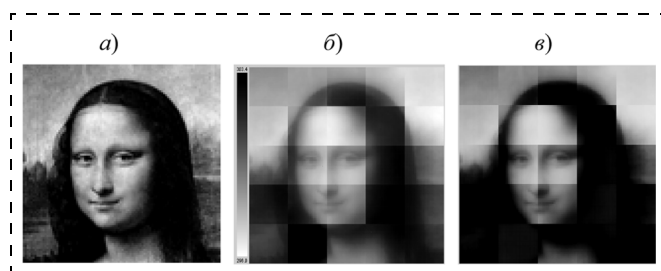


Рис. 5. Исходное изображение с размером 100 на 100 пикселей (а). Температурное поле, состоящее из отдельных областей, (б); расчетное рентгеновское изображение, полученное при использовании данного температурного поля (в)

Черному цвету соответствовал поток 10000 Вт/м^2 , белому цвету — отсутствие теплового потока. Полученное распределение теплового потока разбивалось на 25 областей с размерами 20×20 точек. Разбиение связано с тем, что расчет температурного поля для трехмерных структур с высоким разрешением по температуре и координате требует больших вычислительных ресурсов, поэтому в сложившейся ситуации мы были вынуждены рассчитывать тепловое поле для каждой из 25 областей КС.

Число колонок в КС соответствовало числу пикселей и равнялось 400. Размеры колонок — 200 на 200 мкм, расстояние между ними — 50 мкм, высота колонок — 100 мкм, высота основания КС — 2 мм.

Для каждого распределения теплового потока в отдельности рассчитывалось температурное поле на глубине 10 мкм от поверхности колончатой структуры.

Все полученные распределения температур, состыковывались в единое температурное поле (рис. 5, б). Различный уровень температур в разных областях обусловлен спецификой расчетов, при которых граничные условия задавались для каждой области в отдельности. Поэтому температуры на границах соседних областей отличаются от температур, рассчитанных для всей области картины.

Расчетное поле температур использовалось для расчета контраста РИ. Ширина исходной кривой дифракционного отражения (КДО) задавалась равной $20''$. Рабочая точка на расчетной КДО выбиралась из соображения оптимальности контраста в центральной области РИ. Полученное расчетное РИ представлено на рис. 5, в.

Проведенные расчеты показали, что разрешающая способность РИ при использовании КС фактически определяется геометрическими параметрами колонок и теоретически может составлять более 50 п. л./мм. Практически разрешающая способность ограничивается технологией получения таких структур и их совершенством. Поэтому использование КС позволяет формировать РИ со сложной пространственной структурой.

Список литературы

1. Трушин В. Н., Жолудев А. А., Фаддеев М. А. и др. Формирование рентгеновских изображений воздействием оптического изображения на дифрагирующий кристалл ниобата лития // Журнал Технической Физики. 1997. Т. 67. № 9. С. 76—79.
2. Трушин В. Н., Маркелов А. С., Жолудев А. А. и др. Экспериментальные методы термоиндуцированного управления параметрами рентгеновских дифракционных максимумов кристаллов // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 7. С. 2—8.
3. Трушин В. Н., Маркелов А. С., Чупрунов Е. В. и др. Формирование рентгеновских изображений с помощью теплового воздействия света на поверхность дифрагирующего кристалла // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2007. № 2. С. 44—48.
4. Маркелов А. С., Трушин В. Н., Ким Е. Л. Определение разрешающей способности рентгеновских изображений, формируемых с помощью теплового воздействия света на поверхность дифрагирующего кристалла // Вестник ННГУ. Сер. Физика твердого тела. 2006. Вып. 1 (9). С. 40—45.

О. Е. Глухова, канд. физ.-мат. наук, доцент,
Саратовский государственный университет
им. Н. Г. Чернышевского
glukhovaoe@info.sgu.ru

ЖЕСТКОСТЬ Y-ОБРАЗНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ПРИ ДЕФОРМАЦИИ РАСТЯЖЕНИЯ/СЖАТИЯ

На молекулярно-механической модели исследована жесткость Y-образных углеродных нанотрубок при деформации растяжения/сжатия. Установлено, что деформация остается упругой лишь в пределах от -3 до $+3$ % изменения длины Y-трубки вдоль оси симметрии. Коэффициент жесткости (по углу раствора) для Y-трубки в виде тубуса (6,6), раздвоенного с одного края с углом раствора $112,5^\circ$, равен $12,26$ нН/град. Таким образом, Y-трубки могут служить упрочняющим компонентом полимерных материалов, а также зондами высокой жесткости в атомных силовых микроскопах.

Ключевые слова: Y-образные углеродные нанотрубки, упругая деформация, молекулярно-механическая модель.

К настоящему времени синтезированы углеродные наноструктуры самых разных и причудливых морфологических форм, к которым относятся, в частности, так называемые мультитерминальные соединения из нанотрубок L-, X-, Y- и T-образных [1, 2]. Подобные структуры могут быть использованы, например, в качестве нанотранзисторов и нанодиодов [1].

Цель данной работы — теоретическое исследование упругости и жесткости Y-образных углеродных нанотрубок. В качестве математического аппарата исследования применяется молекулярно-механический метод.

1. Молекулярно-механическая модель в изучении упругости углеродных нанотрубок

Полная энергия в рамках молекулярно-механической модели определяется суммой многочленов с соответствующими весовыми коэффициентами K_r , K_θ , K_a , K_b :

$$E = \sum K_r (r - r_0)^2 + \sum K_\theta (\theta - \theta_0)^2 + \sum \left(\frac{K_a}{r^{12}} - \frac{K_b}{r^6} \right). \quad (1)$$

Первое слагаемое в сумме (1) — энергия изменения длин связей; второе слагаемое — энергия изменения углов между связями; третье слагаемое — энергия взаимодействия Ван-дер-Ваальса (потенциал Леннарда—Джонса); $r_0 = 1,42$ и $\theta_0 = 120^\circ$ — длина связи и угол между связями в графите. Весовые коэффициенты были найдены как решения мини-

максной задачи с ограничениями в следующей постановке:

$$\min \max S(A), \quad S(A) = \sum_{i=1}^3 |r_i - r_i^0|, \quad (2)$$

где $\{r_i\}$ — множество С—С длин связей; $\{r_i^0\}$ — множество известных (расчетных или экспериментальных) значений; $A = (K_r, K_\theta, K_a, K_b)$ — вектор варьируемых параметров. Для нахождения глобального минимума для каждого набора $(K_r, K_\theta, K_a, K_b)$ строилась поверхность целевой функции и соответственно ее профилю смещалась базисная точка. Множество $\{r_i\}$ находилось минимизацией полной энергии (1) нанотрубки по координатам всех атомов, минимизация осуществлялась в реальном времени. За квант времени принималась одна фемтосекунда. На каждом шаге вычислялась сила, действующая на каждый атом. Она рассчитывалась при условии, что энергетическая поверхность в окрестности атома меняется линейно и вычисляется из разницы значений энергии атома при его сдвиге из текущего положения вдоль координатных осей. Например, из разницы энергий $E\{..., x + \Delta x, ...\}$ и $E\{..., x - \Delta x, ...\}$ (Δx — сдвиг по оси X) вычислялась проекция силы на ось X:

$$F_x = \frac{E(x - \Delta x) - E(x + \Delta x)}{2\Delta x}. \quad (3)$$

Параметр Δx — достаточно мал по сравнению с характерным размером системы (для нанокластера характерным размером считаем 0,1 нм). Заметим, что значение Δx не должно выбираться слишком малым, поскольку в этом случае энергия системы меняется столь незначительно, что вследствие конечной разрядной сетки вычислительной техники точность вычислений снижается. Также нельзя выбирать параметр сдвига слишком большим, так как в этом случае точность расчетов также будет снижаться вследствие нелинейности энергетической поверхности. В результате тщательного исследования корреляции точности расчетов с параметром Δx нами принято значение сдвига 10^{-4} от характерного размера. Изменение конфигурации нанобъекта (под действием сил) на данном шаге определяется в результате решения уравнений Ньютона. На следующем шаге процесс повторяется.

В результате решения минимаксной задачи (2) получены следующие значения весовых коэффициентов:

$$K_r = 3,25 \cdot 10^2 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}; \quad K_\theta = 4,4 \cdot 10^{-19} \frac{\text{Дж}}{\text{рад}^2}; \quad (4)$$

$$K_a = 4,0 \cdot 10^{-139} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^{12}}; \quad K_b = 1,5 \cdot 10^{-80} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^6}.$$

Таблица 1

Диаметры нанотрубок, измеренные и рассчитанные, нм

Трубка	Графеновая модель	Эксперимент	МММ
(4,0)	0,313	0,33 [3]	0,336
(10,10)	1,356	1,36 [4]	1,360
(17,0)	1,331	1,35 [5]	1,337
(18,0)	1,409	1,43 [5]	1,422

Проведем тестирование молекулярно-механической модели на сравнении геометрических параметров углеродных нанотрубок и параметров упругости с экспериментально полученными.

В табл. 1 приведены диаметры некоторых нанотрубок, измеренные и рассчитанные. Для сравнения указаны значения диаметра, вычисленные по известной формуле радиуса модели нанотрубки

$r = r_0 \sqrt{3(n^2 + m^2 + nm)} / \pi$, полученной сворачиванием графена (будем называть такую модель нанотрубки *графеновой*), и рассчитанные на молекулярно-механической модели (МММ) с силовыми коэффициентами (4).

Из приведенных данных следует:

- МММ позволяет рассчитывать атомную структуру нанотрубки с погрешностью менее 2 %;
- диаметр нанотрубки больше рассчитанного по ее графеновой модели. Объяснить последнее можно нерегулярностью тубулярной наноструктуры, в частности (если отсутствуют деформации, дефекты), краевым эффектом.

Изучение упругости нанотрубок проводится по следующему алгоритму.

1. Рассчитывается конфигурация каркаса нанобъекта, соответствующая основному состоянию, и полная энергия.

2. Длина каркаса нанобъекта увеличивается/уменьшается на 1 % (упругая деформация), фиксируется и снова рассчитывается его атомная структура, соответствующая минимальному значению полной энергии (1).

3. Вычисляется модуль Юнга:

$$Y = \frac{F}{S} \cdot \frac{L}{\Delta L}, \quad (5)$$

здесь F — сила растяжения/сжатия нанокластера, которая вычисляется по величине энергии упругой деформации ΔE :

$$F = \frac{2\Delta E}{\Delta L}, \quad (6)$$

L — длина недеформированного каркаса; ΔL — удлинение каркаса; S — площадь поперечного сечения кольца шириной 0,34 нм (расстояние между слоями в графите), содержащего периметр остова.

В табл. 2 приведены результаты расчетов модуля Юнга для двух типов однослойных трубок: *zigzag* (14,0), (19,0) и *armchair* (8,8), (11,11). Типы трубок выбраны так, чтобы их длина и диаметр совпадали с соответствующими размерами однослойных индивидуальных нанотрубок, для которых известны экспериментальные значения модуля Юнга [6]. Других экспериментальных данных для однослойных индивидуальных трубок (с известными длиной и диаметром) на настоящий момент нет, поскольку в большинстве случаев модуль Юнга измеряется не для индивидуальных трубок, а для жгутов из них (в этом случае для модуля Юнга указывается интервал 0,3...1,4 ТПа) [5]. Привести аналогичные данные, полученные на других моделях, не представляется возможным: методы *ab initio* и полуэмпирические позволяют изучать только структуры с числом атомов до тысячи. Вычисления модуля Юнга на альтернативных эмпирических моделях дают следующие результаты: в работе [7] для трубки диаметром 1,1 нм — 1,3 ТПа; диаметром 1,5 нм — 1,0 ТПа (длина не учитывалась); в работе [8] независимо от киральности и диаметра трубки (трубки считаются протяженными) модуль Юнга равен 0,97 ТПа.

Результаты расчетов дают основание утверждать, что разработанная молекулярно-механическая модель может быть использована в исследованиях механических свойств нанотрубок с нерегулярной структурой. В основном значения модуля Юнга полностью совпадают с экспериментальными (с учетом погрешности самого эксперимента), только для трубки (11,11) погрешность составила 10 %. Послед-

Таблица 2

Модуль Юнга однослойных индивидуальных нанотрубок

Эксперимент			Расчет с помощью RING-MD			
Диаметр, нм	Длина, нм	Модуль Юнга [6], ТПа	Тип трубки — число атомов	Диаметр, нм	Длина, нм	Модуль Юнга, ТПа
1,12	23,4	1,02 ± 0,3	(8,8) — 3072 (14,0) — 3108	1,09 1,10	23,45 23,46	0,82 0,92
1,52	24,3	1,20 ± 0,2	(11,11) — 4378 (19,0) — 4308	1,50 1,50	24,3 24,34	0,90 1,0
1,50	36,8	1,33 ± 0,2	(11,11) — 6600 (19,0) — 6612	1,50 1,50	36,77 36,91	1,1 1,2

нее объясняется отсутствием сведений об атомной структуре трубок, используемых в эксперименте, в результате кивальность (11,11) могла быть выбрана ошибочно.

2. Деформация растяжения/сжатия Y-образных трубок

Для Y-образных трубок типично раздвоение тубуса (можно сказать "ствола") на две веточки, которые могут быть как симметричными относительно оси тубуса, так и несимметричными. В данной работе рассмотрена модель симметричной Y-трубки, образованной тремя короткими трубками типа (6,6): тубусом длиной 4,79 нм (ствол) и двумя фрагментами одинаковой длины 1,84 нм, которые образуют веточки. Число атомов в Y-трубке — 870, энтальпия образования равна 7,47 ккал/моль · атом. Малое значение энтальпии Y-трубки (один из самых стабильных нанокластеров фуллерен C_{60} характеризуется энтальпией 10 ккал/моль · атом) свидетельствует о физической стабильности этой структуры и отсутствии напряжений в атомном каркасе, которые могли бы привести к ее разрушению. Модель Y-трубки демонстрирует рис. 1.

Y-трубка характеризуется радиусом r основания ствола Y-трубки, длиной L структуры вдоль оси симметрии, углом раствора веточек α , расстоянием между концами веточек a и глубиной раздвоенности ствола — δ . Все эти параметры приведены в табл. 3 (вторая строка таблицы: при деформации $\Delta L/L$, равной нулю).

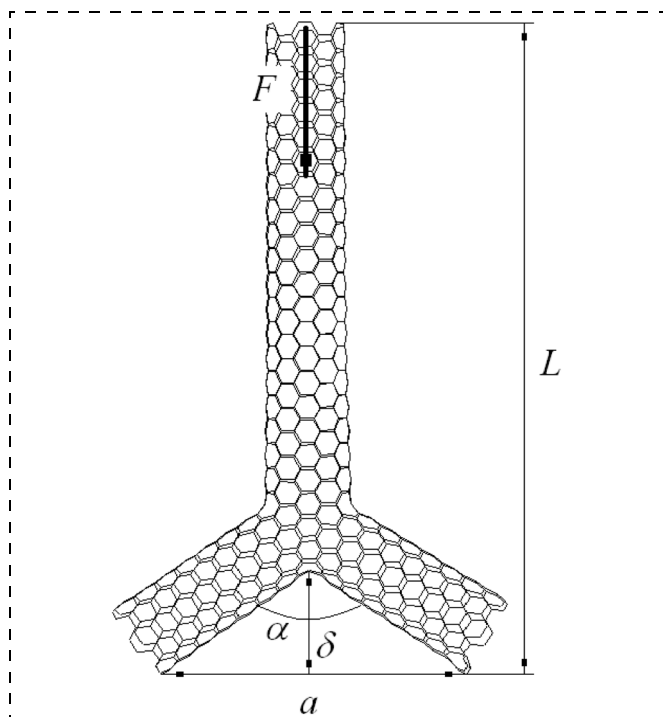


Рис. 1. Y-образная трубка на базе трех фрагментов трубочек (6,6)

Таблица 3
Геометрические характеристики деформированной Y-трубки и сила сжатия

$\Delta L/L$, %	r , нм	L , нм	δ , нм	a , нм	α , угл. градус	$\Delta\alpha/\alpha$, %	F , нН
0	0,412	6,501	1,032	3,087	112,46	0	0
1	0,413	6,436	1,022	3,095	113,12	0,58	5,32
3	0,416	6,307	1,002	3,110	114,41	1,74	15,97
5	0,424	6,176	9,789	3,143	116,16	3,29	57,29

Исследование растяжения/сжатия Y-трубки проводится по алгоритму, приведенному в разд. 1. Процесс сжатия, например, моделируется следующим образом. Веточки структуры опираются на подложку, а на верхний конец (ствол Y-трубки) действует сила F , как показано на рис. 1. Для расчета модуля Юнга структура подвергалась упругой деформации сжатия на 1 %. В качестве площади S в формуле (5) принята площадь поперечного сечения кольца шириной 0,34 нм — основания ствола структуры, на который действует сила. Расчеты модуля Юнга Y-трубки показали, что его значение, равное 0,61 ТПа, несколько меньше модуля Юнга неразветвленной трубки (6,6) — 0,75 ТПа. Это объясняется особенностью атомного строения структуры: разветвление трубки сопровождается, в частности, появлением в атомном остоле семиугольников. Таким образом, в отличие от неразветвленных трубок у Y-образных существует как бы две степени свободы при деформации сжатии вдоль оси: изменение диаметра и изменение угла раствора.

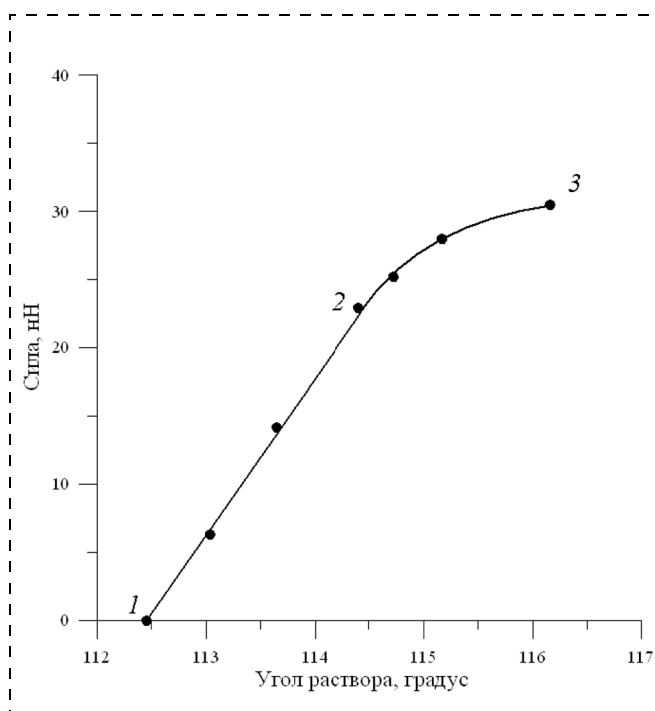


Рис. 2. Изменение силы, необходимой для сжатия Y-трубки, с увеличением угла раствора

Подвергнем модель Y-трубки дальнейшему сжатию до 0,95 % от первоначальной длины. На рис. 2 изображена кривая силы $F(\alpha)$, необходимой для сжатия Y-трубки. На каждом этапе длина Y-трубки уменьшается, и атомная структура оптимизируется минимизацией энергии (1) при фиксированных положениях плоскостей с атомами основания остова и нижних краев веточек.

Сила рассчитывается по формуле (6). На графике хорошо видно, что упругая деформация (линейный участок 1—2) сменяется пластической (участок 2—3), когда с увеличением силы угол раствора увеличивается заметно меньше. Упругая деформация наблюдается, таким образом, при сжатии до 0,97 %. В табл. 3 приведены геометрические параметры на некоторых этапах сжатия и значение деформирующей силы. Стоит отметить, что относительное уменьшение длины не совпадает с относительным увеличением угла раствора, а также параметров a и δ , что говорит о неоднородности деформации растяжения/сжатия Y-образных трубок.

Для характеристики жесткости Y-трубок при упругом растяжении/сжатии введем коэффициент

$$k_{\alpha} = \frac{F}{\alpha}, \quad (7)$$

имеющего размерность Н/град. Его значение будет индивидуальным для каждой Y-образной трубки. В данном случае $k = 12,26$ нН/град. Аналогов подобному расчету на данный момент нет, поэтому чтобы оценить жесткость Y-трубки вычислим коэффициент жесткости по известной формуле

$$k_{\delta} = \frac{F}{\delta}. \quad (8)$$

Он равен 793,4 Н/м. Для сравнения приведем жесткость (в случае деформации изгиба) полый нанотрубки (8,8) и трубки, заполненной фуллеренами: $k = 2,8$ Н/м и 3,4 Н/м, соответственно.

Заметим, что отклик атомной системы на внешние воздействия уже давно принято характеризовать по изменению длин связей и валентных углов (углов между линиями, соединяющими соседние взаимодействующие атомы), поэтому введение параметра k_{α} оправдано с физической точки зрения и k_{α} можно считать одним из форм-факторов Y-образных трубок.

Выводы

1. Метод молекулярной механики с энергией в виде многочлена (1) и весовыми коэффициентами (4) обеспечивает расчет атомной структуры углеродных нанотрубок с погрешностью менее 2 %, а модуля Юнга с погрешностью менее 10 %.

2. Деформация растяжения/сжатия Y-образных трубок является упругой только при изменении длины в пределах от –3 % до 3 %.

3. Для характеристики жесткости Y-образных трубок можно применить такой форм-фактор, как коэффициент жесткости по углу раствора. Когда упругая деформация сменяется пластической при сжатии Y-трубки, линейное увеличение угла раствора при увеличении деформирующей силы сменяется нелинейным и увеличение угла становится незначительным.

4. Y-трубки могут служить упрочняющим композитом полимерных материалов, а также зондами высокой жесткости в атомных силовых микроскопах.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН П-03 "Квантовая макрофизика" (Подпрограмма № 2 "Влияние атомно-кристаллической и электронной структуры на свойства конденсированных сред") и гранта РФФИ (проект № 07-02-00852а).

Список литературы

1. **Terrones M.** Science and technology of the twenty-first century: Synthesis, Properties, and Applications of Carbon Nanotubes // Annual Review of Materials Science. 2003. № 33. P. 419—501.
2. **Харрис П.** Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века. М.: Техносфера, 2003. 336 с.
3. **Sano N., Chhowalla M., Roy D., Amaratunga G. A. J.** Viability of sub-0.4-nm diameter carbon nanotubes // Physical Review B. 2002. V. 66. № 11. P. 113403 (4).
4. **Yu Min-Feng, Files Bradley S., Arepalli Sivaram, Ruoff Rodney S.** Tensile Loading of Ropes of SingleWall Carbon Nanotubes and their Mechanical Properties // Physical Review Letters. 2006. V. 84. № 24. P. 5552 (4).
5. **Hirahara K., Bandow S., Suenaga K., Kato H., Okazaki T., Shinohara H., Iijima S.** Electron diffraction study of one-dimensional crystals of fullerenes // Physical Review B. 2001. V. 64. № 11. P. 115420 (5).
6. **Krishnan A., Dujardin E., Ebbesen T. W., Yianilos P. N., J. Treacy M. M.** Young's modulus of single-walled nanotubes // Physical Review B. 1998. V. 58. № 20. P. 14013 (7).
7. **Shen Lianxi, Li Jackie.** Transversely isotropic elastic properties of singlewalled carbon nanotubes // Physical Review B. — 2004. V. 69. № 4. P. 045414 (10).
8. **Lu Jian Ping.** Elastic Properties of Carbon Nanotubes and Nanoropes // Physical Review Letters. 1997. V. 79. № 7. P. 1297 (4).

УДК 537.635

А. Б. Ринкевич¹, д-р физ.-мат. наук, зам. директора,

В. В. Устинов¹, акад. РАН, директор,

М. И. Самойлович², д-р физ.-мат. наук, проф., нач. лаб.,

С. М. Клещева², канд. геол.-минер. наук, ст. науч. сотр.,

Е. А. Кузнецов³, ст. препод.

¹ Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург, rin@imp.uran.ru

² ЦНИТИ "Техномаш", г. Москва, samoylovich@technomash.ru

³ Нижнетагильская государственная социально-педагогическая академия

МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В ОПАЛОВЫХ МАТРИЦАХ С 3D-СТРУКТУРОЙ, ОБРАЗОВАННОЙ НАНОЧАСТИЦАМИ НИКЕЛЬ- ЦИНКОВОГО И МАРГАНЕЦ- ЦИНКОВОГО ФЕРРИТА

Изучено взаимодействие электромагнитных волн с нанокompозитными материалами, полученными введением в межсферическое пространство опаловых матриц (правильных упаковок наносфер SiO_2 диаметром около 250 нм) наночастиц никель-цинкового или марганец-цинкового феррита (нанокompозит). Измерения выполнены в интервале частот 26–38 ГГц в магнитных полях напряженностью до 13 кЭ. Исследовано изменение во внешнем магнитном поле модуля коэффициента передачи моды TE_{10} в прямоугольном волноводе, содержащем опаловую матрицу. Проанализирована зависимость от напряженности внешнего магнитного поля коэффициентов прохождения и отражения электромагнитных волн. Выполнены измерения модуля коэффициента прохождения волн через прямоугольный резонатор с образцом нанокompозита. Установлено, что основной причиной микроволновых изменений является магнитный резонанс в нанокompозите. Выполнен анализ прохождения волн через образец нанокompозита и его зависимости от напряженности магнитного поля.

Ключевые слова: нанокompозиты, микрофотоника, опаловые матрицы, наночастицы ферритов, микроволновые измерения.

1. Опаловые матрицы и их применение в оптике и электронике

3D-наноструктуры на основе опаловых матриц — это материалы, нашедшие применение в микрофотонике [1]. Использование таких материалов в устройствах оптического диапазона возможно и достаточно эффективно вследствие существования запрещенной фотонной зоны. В межсферические пустоты опаловых матриц могут быть введены наночастицы магнитных материалов, что делает 3D-нанокompозитные материалы пригодными для использования в управляемых устройствах сверхвысокочастотной электроники. Представляет существенный интерес возможность использования никель-цинкового и марганец-цинкового ферритов в качестве материалов, которые могут быть внедрены в опаловую матрицу. Основанием служит удачное сочетание свойств, таких как высокое удельное электросопротивление, малые диэлектрические потери, высокая температура Кюри и химическая стабильность. Существующие перспективы применения опаловых матриц как магнитных материалов (метаматериалов) в устройствах нанoeлектроники сверхвысоких частот привлекает к указанным материалам все возрастающее внимание.

Высокочастотные и радиочастотные магнитные свойства ансамблей наночастиц имеют значительную специфику [2, 3]. Применение микроволновых методов исследования представляется перспективным, поскольку последние дают возможность сравнительно просто оценить динамические и релаксационные параметры таких материалов. Одновременно применяя волноводы и полые резонаторы, работающие на разных типах волн, можно осуществлять различную взаимную ориентацию микроволновых полей и внешнего магнитного поля и таким образом добиться условий наиболее эффективного взаимодействия наночастиц введенного вещества с полями. Опаловые матрицы считаются классом материалов, пригодных для создания сред с отрицательным показателем преломления. Осуществление так называемой "левой" среды с отрицательной действительной частью магнитной проницаемости реально в области магнитных резонансов. На возможность фокусировки пучка микроволнового излучения обращается внимание в работе [4]. Фокусировка осуществляется в ближнем поле излучения в металлизированной фотонной структуре в условиях отрицательного коэффициента преломления. Одним из наиболее эффективных способов исследования микроволновых

свойств является методика магнитного резонанса. Известно, что характеристики резонансной линии, такие как значение поля резонанса, ширина и форма линии зависят от размера наночастиц [5].

Для успешного применения магнитных наноконструкций на основе опаловых матриц в управляемых магнитным полем электронных приборах СВЧ-диапазона необходимо решить несколько проблем. Во-первых, добиться оптимальных условий взаимодействия волны с матрицей, чтобы обеспечить наибольший эффект. Во-вторых, выбрать схему включения элемента, содержащего полученную матрицу, в СВЧ-тракт. В-третьих, выбрать условия измерений таким образом, чтобы добиться управления с использованием магнитного поля возможно меньшего значения.

В настоящей работе исследованы микроволновые свойства опаловых матриц, содержащих в межсферических пустотах наночастицы марганец-цинкового и никель-цинкового ферритов. Микроволновые свойства измерены на частотах миллиметрового диапазона, причем использованы две схемы включения образца матрицы в СВЧ-тракт. По первой схеме образец помещается в полый резонатор и измерения проводятся на частотах вблизи резонансных частот резонатора. При таком включении достигаются наибольшие изменения СВЧ-сигнала при выполнении условий магнитного резонанса в исследуемой матрице. Однако в таком варианте измерения возможны только на дискретных частотах. В другой методике использовано прохождение микроволн через образец опаловой матрицы. Образец помещается в волновод, и возможно непрерывное изменение частоты волны в широких пределах. Изменения микроволнового сигнала, прошедшего через наноконструкцию, происходят, в основном, вследствие вариаций поверхностного импеданса наноконструкта в условиях магнитного резонанса и поглощения электромагнитной волны в нем. Осуществление эффективного взаимодействия микроволновых полей с наночастицами ферритов представляет интерес для нахождения условий существования отрицательной действительной части магнитной проницаемости.

2. Экспериментальные методы

Микроволновые измерения выполнены в частотном диапазоне 26–38 ГГц с использованием прямоугольных резонаторов и стандартных волноводов, работающих на моде TE_{10} . Для выполнения микроволновых измерений образец помещался в прямоугольный резонатор (рис. 1) или в волновод (рис. 2). При этом образец длинной стороной располагался вдоль оси СВЧ-тракта при размещении в резонаторе и поперек тракта при размещении в волноводе. Внешнее постоянное магнитное поле напряженности H , создаваемое электромагнитом, прикладывалось перпендикулярно волновому вектору q , если образец помещен в резонатор. В случае, когда образец находится в волноводе, внешнее магнитное поле

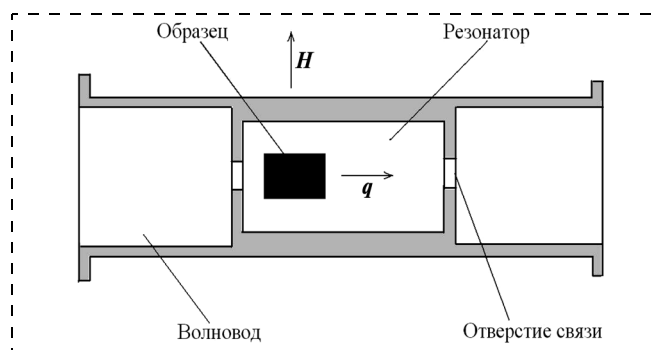


Рис. 1. Схема расположения образца в резонаторе

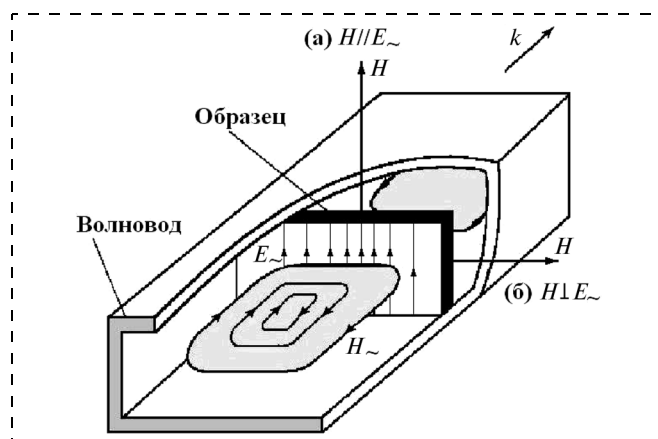


Рис. 2. Схема расположения образца в волноводе

лежит в плоскости образца либо параллельно, либо перпендикулярно вектору микроволнового электрического поля с напряженностью E . В микроволновых экспериментах измерялось относительное изменение во внешнем магнитном поле модуля коэффициента прохождения $d_m = [|D(H)| - |D(0)|]/|D(0)|$, где $|D(H)|$ — модуль коэффициента прохождения в магнитном поле и модуль коэффициента отражения $r_m = [|R(H)| - |R(0)|]/|R(0)|$, где $|R(H)|$ — модуль коэффициента отражения. Все микроволновые эксперименты выполнены при комнатной температуре.

Необходимость использования двух методик измерения микроволновых характеристик обусловлена следующими обстоятельствами. В резонаторе можно выполнить измерения на частотах вблизи резонансных частот резонатора, каждая из которых соответствует определенному типу электромагнитных колебаний. Резонатор включен в СВЧ-тракт каскадно. В условиях магнитного резонанса резко увеличивается поглощение электромагнитной энергии; полевая зависимость амплитуды принятого сигнала определяется резонансной зависимостью мнимой части магнитной проницаемости образца от напряженности внешнего постоянного магнитного поля. Для выяснения оптимальных условий использования опаловых матриц с наночастицами ферритов в электронных приборах СВЧ данная методика измерений имеет преимущество, а именно, в ней возможно дос-

тижение максимально возможных изменений микроволнового сигнала при изменении напряженности внешнего поля.

Вторая методика, в которой образец помещается в поперечное сечение волновода, имеет достоинство в том отношении, что частота волны может изменяться непрерывно во всем интервале, в котором распространяется волна TE_{10} и осуществляется одномодовый режим. Для волновода сечением $7,2 \times 3,6$ мм это частоты от 26 до 38 ГГц. Два варианта расположения вектора внешнего постоянного магнитного поля (варианты (а) и (б) на рис.2) дают возможность реализовать различную ориентацию полей и выявить разные типы резонансов.

Синтез образцов опаловых матриц с диаметрами наносфер SiO_2 от 200 до 280 нм описан в работе [6]. Наноконкомпозиты с внедренными наночастицами никель-цинкового и марганец-цинкового ферритов были получены методом пропитки с последующей термической обработкой. Рентгенофазовый анализ показал, что во внесенном веществе большинство рефлексов относятся к фазам типа $(Ni_xZn_{1-x})Fe_2O_4$ и $(Mn_xZn_{1-x})Fe_2O_4$, имеющих кристаллическую структуру шпинели. Частицы введенных фаз имеют неправильную форму и размеры от 5 до 70 нм. Объемная концентрация внесенных наночастиц не превышает 3–5 %. В дальнейшем будем называть полученный композитный материал как никель-цинковый феррит, несмотря на возможное присутствие в нем другой магнитной фазы. Сказанное относится и к наноконкомпозиту с марганец-цинковым ферритом. Результаты измерения магнитных свойств подробно проанализированы в работе [7]. При комнатной температуре можно считать, что магнитные фазы наноконкомпозита состоят из частиц ферромагнетика и суперпарамагнитных частиц.

3. Микроволновые измерения в резонаторе

Как отмечалось выше, измерения в резонаторе выполняются вблизи собственных частот резонатора. Целью проведенных измерений было установление спектра магнитного резонанса в магнитных наноконкомпозитах, а также создание условий для осуществления микроволновых изменений с наибольшим значением. С указанной целью в резонатор вносились образцы магнитных опаловых матриц, объем которых хотя и был существенно меньше объема резонатора, тем не менее образец существенно искажал поля в резонаторе и влиял на значения резонансных частот. Резонатор был включен в СВЧ-тракт каскадно, как показано на рис. 1.

В экспериментах было использовано несколько прямоугольных резонаторов, для всех них длина резонатора была 50 мм, высота 3,2 мм. Максимумы амплитуды прошедшего сигнала для резонатора шириной 5,2 мм, приходящиеся на частоты 35,8 и 34 ГГц, соответствуют модам TE_{101} и TE_{100} . При помещении образца в резонатор резонансные частоты уменьша-

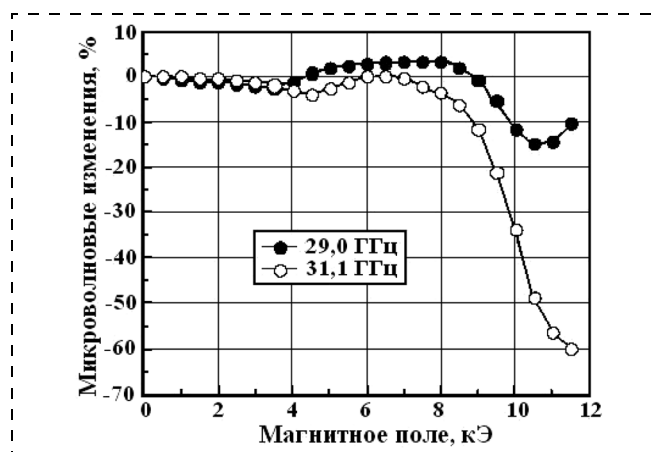


Рис. 3. Микроволновой магнитный резонанс в опаловой матрице, содержащей никель-цинковый феррит

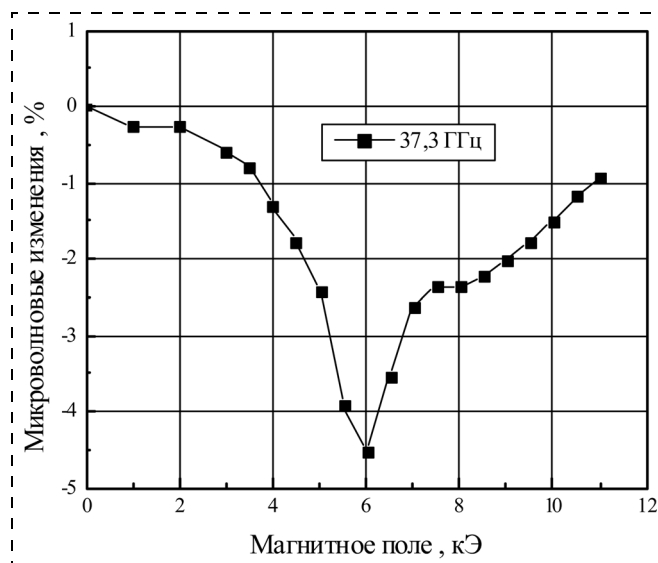


Рис. 4. Микроволновой магнитный резонанс в опаловой матрице, содержащей марганец-цинковый феррит

ются, ширина резонансной линии увеличивается вследствие микроволновых потерь в образце. Результаты измерения полевых зависимостей микроволнового сигнала показаны на рис. 3 и 4. Экспериментальные данные, представленные на рис. 3 и 4, показывают, что изменения микроволнового коэффициента передачи в магнитном поле обусловлены магнитным резонансом. По оси ординат на этих рисунках отложено изменение во внешнем магнитном поле модуля коэффициента передачи $d_m = [|D(H)| - |D(0)|]/|D(0)|$.

Измерения, выполненные на нескольких частотах в интервале 26–38 ГГц, показали, что положение резонансной особенности смещается в сторону сильных полей при увеличении частоты. По этим измерениям был восстановлен спектр магнитного резонанса, который будет проанализирован ниже. В образце, содержащем никель-цинковый феррит, изменения микроволнового сигнала превышают 60 %. Столь большие изменения, в принципе, могут найти применение в управляемых электронных при-

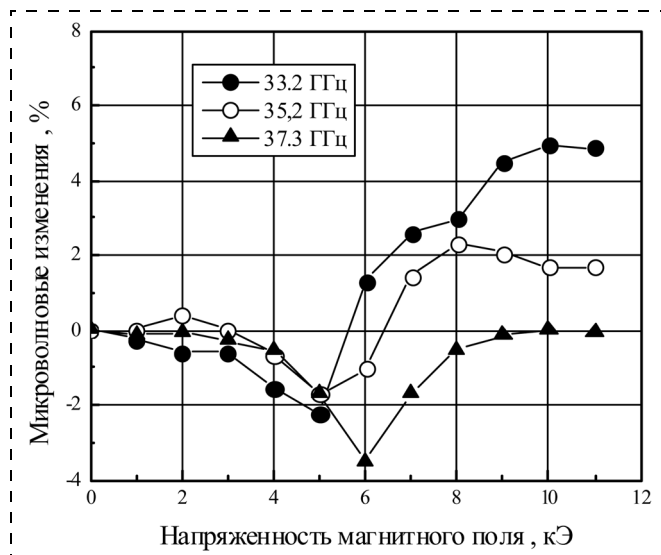


Рис. 5. Магнитный резонанс в опаловой матрице, содержащей марганец-цинковый феррит на нескольких частотах

борах миллиметрового диапазона. Результаты измерения полевой зависимости коэффициента прохождения, измеренной на нескольких частотах, показаны на рис. 5.

По мере увеличения частоты поле резонанса увеличивается. В данном случае с ростом частоты увеличивается амплитуда резонансной особенности.

4. Микроволновые измерения в волноводе

Измерения были выполнены по схеме, показанной на рис. 2. Влияние внешнего постоянного магнитного поля на коэффициент передачи оказалось различным при разной ориентации этого поля относительно микроволнового магнитного поля. В данной серии измерений помимо изменения во внешнем магнитном поле модуля коэффициента передачи $d_m = [|D(H)| - |D(0)|]/|D(0)|$ измерялось еще и от-

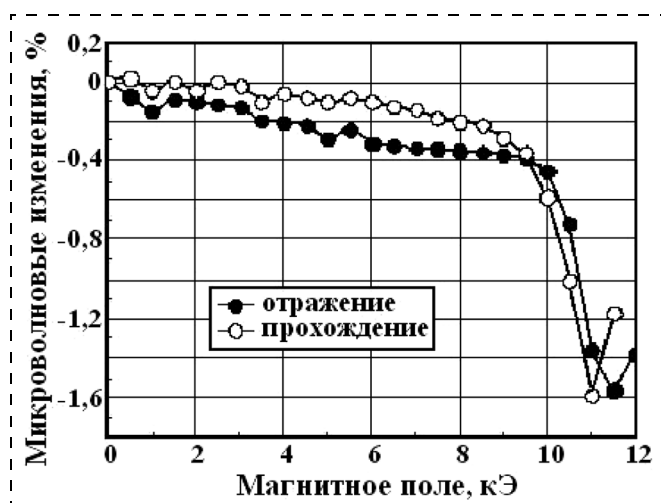


Рис. 6. Магнитный резонанс, измеренный по отражению и прохождению микроволн через образец нанокompозита, содержащего марганец-цинковый феррит, $H \perp H_0$

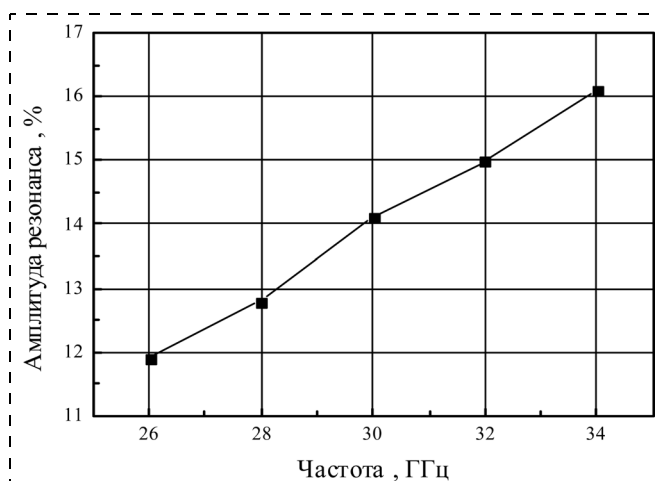


Рис. 7. Частотная зависимость амплитуды магнитного резонанса для прошедшего сигнала, $H \perp H_0$ (образец нанокompозита, содержащего никель-цинковый феррит)

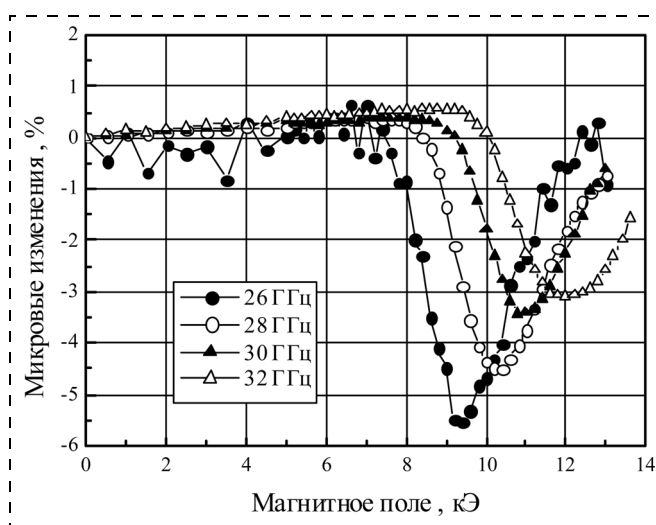


Рис. 8. Магнитный резонанс, измеренный по прохождению микроволн через образец нанокompозита, содержащего никель-цинковый феррит, $H // H_0$

носительное изменение модуля коэффициента отражения $r_m = [|R(H)| - |R(0)|]/|R(0)|$, где $R(H)$ — коэффициент отражения от образца, измеренный в поле H . Сопоставление результатов измерения полевой зависимости коэффициентов прохождения и отражения для нанокompозита, содержащего марганец-цинковый феррит, при $H \perp H_0$ проведено на рис. 6. Полученные зависимости оказались похожи друг на друга как по значению изменений, так и по форме зависимости.

По мере увеличения частоты положение резонансной особенности приходится на более сильные поля; амплитуда резонанса с ростом частоты увеличивается (рис. 7). Несколько иная картина наблюдается при $H // H_0$. Как видно на рис. 8, резонансная особенность коэффициента прохождения присутствует и в этом случае. По мере увеличения частоты положение резонанса смещается в сторону сильных

полей. Однако с ростом частоты амплитуда резонанса в данном случае уменьшается. Существование резонанса при $\mathbf{H}/\mathbf{H}_\perp$ возможно, если направление магнитного поля внутри частиц введенного вещества отличается от направления $\mathbf{H}$, так что внутри частиц существует компонента постоянного магнитного поля, перпендикулярная $\mathbf{H}_\perp$. Последнее вполне возможно, поскольку форма частиц введенного вещества сложная, и частицы ориентированы к внешнему магнитному полю случайным образом. По мере роста частоты резонанс приходится на более сильные поля. При приближении поля к состоянию технического насыщения области неоднородного поля в частицах уменьшаются, а направление вектора внутреннего постоянного магнитного поля в целом приближается к направлению внешнего. Поэтому в данной конфигурации полей с ростом частоты амплитуда резонанса уменьшается.

Измерения, выполненные на образце опаловой матрицы, содержащей наночастицы никель-цинкового феррита на нескольких частотах при $\mathbf{H} \perp \mathbf{H}_\perp$ показали, что с ростом частоты амплитуда резонансной особенности возрастает, как и для матрицы с марганец-цинковым ферритом. В ориентации полей $\mathbf{H}/\mathbf{H}_\perp$ частотная зависимость амплитуды резонансов для нанокомпозита, содержащего марганец-цинковый феррит, имеет более сложный характер — присутствуют резонансы, которые можно отнести к двум различным ветвям спектра магнитного резонанса, как это будет показано ниже. Для резонансов, принадлежащих 1-й ветви, с ростом частоты амплитуда резонансов в целом возрастает.

В интервале 26—38 ГГц была измерена частотная зависимость коэффициентов прохождения и отражения по мощности для образцов опаловой матрицы, содержащих наночастицы никель-цинкового и марганец-цинкового ферритов. Такие измерения выполнены без приложения постоянного магнитного поля. В целом в рассматриваемом частном диапазоне коэффициент прохождения возрастает, а коэффициент отражения убывает с ростом частоты. Значения коэффициентов отражения и прохождения сопоставимы и изменяются от 0,3 до 0,65.

Для объяснения наблюдающихся особенностей рассмотрим прохождение и отражение волн от непроводящего или слабопроводящего магнитного образца, помещенного в прямоугольный волновод. Будем считать, что в волноводе может распространяться только мода TE_{10} . Длина образца вдоль оси волновода равна d , поперечные размеры волновода a и b , $a > b$. Образец полностью занимает поперечное сечение волновода, как показано на рис. 2. Участки волновода имеют различное эквивалентное сопротивление: заполненные образцом — Z_2 , а незаполненные — Z_1 . Обозначим через β_2 комплексную постоянную распространения, $\beta_2 = \beta'_2 + i\beta''_2$. Согласно

[8], комплексные коэффициенты прохождения D и отражения R выражаются следующими формулами:

$$D = \frac{1}{\text{ch}\beta_2 d + \frac{1}{2}(\xi + \xi^{-1})\text{sh}\beta_2 d}; \quad (1)$$

$$R = \frac{\frac{1}{2}(\xi - \xi^{-1})\text{sh}\beta_2 d}{\text{ch}\beta_2 d + \frac{1}{2}(\xi + \xi^{-1})\text{sh}\beta_2 d}, \quad (2)$$

где $\xi = Z_2/Z_1$ — отношение эквивалентных сопротивлений заполненного и незаполненного участков волновода. Эквивалентные сопротивления можно выразить через волновые сопротивления W_1 и W_2 . Для моды TE_{10} запишем, следуя [9]

$$Z_1 = \frac{\pi}{2} \frac{b}{a} W_1; \quad Z_2 = \frac{\pi}{2} \frac{b}{a} W_2;$$

$$W_1 = \frac{120\pi}{\sqrt{1 - \left(\frac{c}{2af}\right)^2}};$$

$$W_2 = \frac{120\pi}{\sqrt{1 - \left(\frac{c\sqrt{\epsilon_{eff}\mu_{eff}}}{2af}\right)^2}}.$$

Здесь ϵ_{eff} , μ_{eff} — некоторые эффективные диэлектрическая и магнитная проницаемости, которые выражаются формулами, составленными из компонент тензоров материальных постоянных диэлектрической $\hat{\epsilon}$ и магнитной проницаемости $\hat{\mu}$. Ниже будет указан вид таких проницаемостей для выбранной ориентации полей при распространении волны типа TE_{10} . Постоянная распространения β_2 , эквивалентные сопротивления Z_1 и Z_2 , и их отношение ξ зависят от напряженности внешнего магнитного поля. При $\mathbf{H} \perp \mathbf{H}_\perp$ постоянная распространения на участке волновода с образцом рассчитывается по формуле [10]

$$\beta_2 = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \epsilon_{//}\mu_\perp - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}, \quad (3)$$

где $\epsilon_{//}$ — это компонента ϵ_{33} тензора диэлектрической проницаемости, а $\mu_\perp$ выражается через диагональную μ и недиагональную μ_a компоненты тензора $\hat{\mu}$ следующим образом:

$$\mu_\perp = \mu - \frac{\mu_a^2}{\mu}.$$

В приведенном выше выражении волнового сопротивления W_2 для моды TE_{10} при $\mathbf{H} \perp \mathbf{H}_\perp$ $\epsilon_{eff} = \epsilon_{//}$, а $\mu_{eff} = \mu_\perp$. Для постоянной β_1 на участке волновода без образца в формуле (3) нужно положить $\epsilon_{//} = 1$,

$\mu_{\perp} = 1$. Во внешнем магнитном поле $\mathbf{H}$ изменяется магнитная проницаемость $\mu_{\perp}$, а вследствие этого постоянная распространения $\beta_2(H)$ и отношение $\xi(H)$ получают добавки: $\beta_2(H) = \beta_2(0) + \Delta\beta_2$; $\xi(H) = \xi(0) + \Delta\xi$. Рассчитаем, какое изменение будет в магнитном поле у коэффициентов прохождения и отражения. Обозначим относительное изменение коэффициента прохождения через d_m , а относительное изменение коэффициента отражения через r_m :

$$d_m = [D(H) - D(0)]/D(0);$$

$$r_m = [R(H) - R(0)]/R(0).$$

Подставив в формулы (1) и (2) постоянную распространения и отношение эквивалентных сопротивлений, получивших добавки в магнитном поле, и считая добавки малыми, $|\Delta\beta d| \ll 1$, $|\frac{\Delta\xi}{\xi(0)}| \ll 1$, можно записать следующие выражения для d_m и r_m :

$$d_m = -\left[\text{sh}\beta_2(0)d + \frac{1}{2}\text{ch}\beta_2(0)d(\xi + \xi^{-1})\right]\Delta\beta_2d - \frac{1}{2}\text{sh}\beta_2(0)d(\xi - \xi^{-1})\frac{\Delta\xi}{\xi(0)}; \quad (4)$$

$$r_m = -D(0)\left[\text{sh}\beta_2(0)d + \frac{1}{2}\text{ch}\beta_2(0)d(\xi + \xi^{-1})\right]\Delta\beta_2d - \frac{1}{2}D(0)\text{sh}\beta_2(0)d(\xi - \xi^{-1})\frac{\Delta\xi}{\xi(0)} + \frac{1}{2}\frac{D(0)}{R(0)} \times (\xi - \xi^{-1})\text{ch}\beta_2d\Delta\beta_2d + \frac{D(0)}{R(0)}\text{sh}\beta_2d(\xi + \xi^{-1})\frac{\Delta\xi}{\xi(0)}. \quad (5)$$

Сравнивая выражения (4) и (5), можно заметить, что в формулу для относительных изменений коэффициента отражения во все слагаемые в качестве множителя входит величина $D(0)$. Если в волновод помещена хорошо проводящая среда, то $|D(0)| \ll 1$ и из-за наличия этого множителя значение изменений коэффициента отражения должно быть намного меньше изменений коэффициента прохождения. Для опаловой матрицы, содержащей слабо проводящие ферриты, формулы (4) и (5) допускают, что изменения коэффициентов прохождения и отражения в магнитном поле будут подобны. В частности, формулу (5) можно переписать в следующем виде:

$$r_m = D(0)d_m + \frac{1}{2}\frac{D(0)}{R(0)}(\xi - \xi^{-1})\text{ch}\beta_2d\Delta\beta_2d + \frac{D(0)}{R(0)}\text{sh}\beta_2d(\xi + \xi^{-1})\frac{\Delta\xi}{\xi(0)}.$$

Проведенный анализ позволяет понять, почему экспериментально измеренные полевые зависимости коэффициентов отражения и прохождения имеют сходный вид. Такие результаты согласуются с тем экспериментальным фактом, что в рассмотренной области миллиметровых волн значения этих коэффициентов, измеренные без внешнего магнитного поля, имеют один порядок величины. Резонансный вид экспе-

риментально измеренных зависимостей $d_m(H)$ и $r_m(H)$ обусловлен тем, что компоненты тензора магнитной проницаемости μ и μ_a при выполнении условий магнитного резонанса получают добавки, резонансным образом зависящие от напряженности магнитного поля [10]. Соответственно, резонансные добавки получают постоянная распространения β_2 и отношение импедансов ξ . Поэтому, согласно формулам (4) и (5), резонансные добавки приобретают коэффициенты отражения и прохождения. Эти резонансные добавки вызваны поглощением волны в условиях магнитного резонанса, поэтому на полевых зависимостях коэффициентов прохождения и отражения наблюдается минимум.

5. Спектры магнитного резонанса

Спектры магнитного резонанса были получены измерениями резонансных полей на разных частотах. Измерения выполнены как в волновом, так и в резонаторах с различной шириной. Результаты для нанокompозита, содержащего наночастицы марганец-цинкового феррита, показаны на рис. 9. Поля резонанса, полученные при использовании волноводной методики и относящиеся к акустической ветви резонансного спектра, показаны на рис. 9 круглыми символами. Значения резонансных полей этой ветви спектра, измеренные при ориентации магнитных полей $\mathbf{H} \perp \mathbf{H}_z$ и $\mathbf{H} // \mathbf{H}_z$, близки друг к другу. Символом "заполненная звездочка" на рис. 9 показаны поля резонанса, также зафиксированные волноводной методикой, но лежащие вне акустической ветви.

В принципе, существуют два возможных объяснения существования резонансов, не принадлежащих указанной ветви спектра. Первое объяснение заключается в том, что введенное вещество содержит две магнитные фазы, причем резонансы, обозначенные звездочками, относятся к фазе с большим значением намагниченности, чем резонансы, обозначенные круглыми символами. Второе объяснение свя-

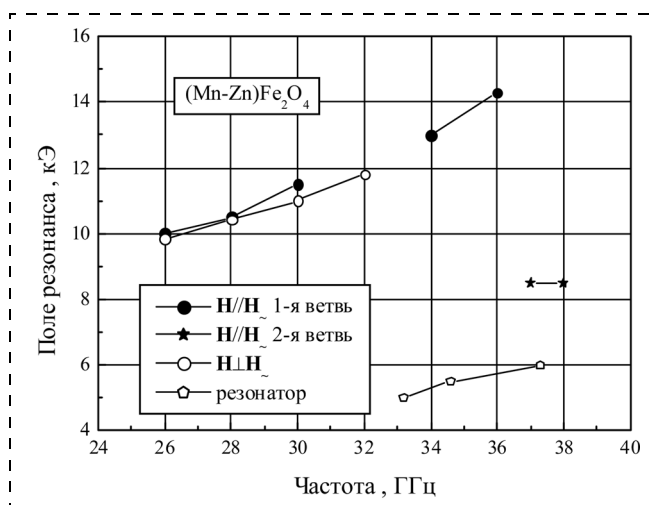


Рис. 9. Спектр магнитного резонанса для образца нанокompозита, содержащего марганец-цинковый феррит

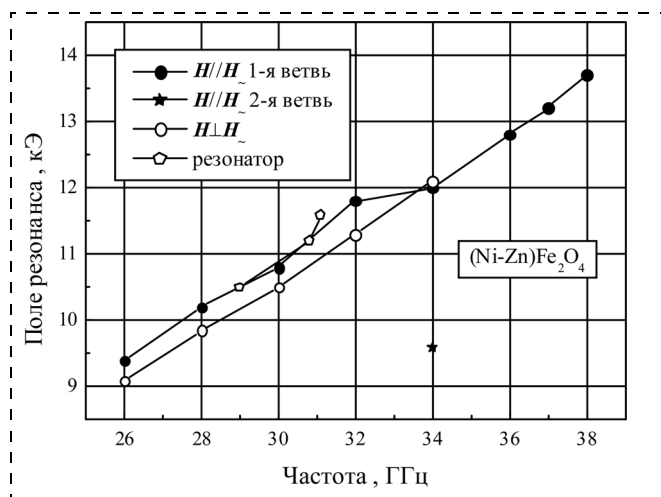


Рис. 10. Спектр магнитного резонанса для образца нанокompозита, содержащего никель-цинковый феррит

зано с тем, что в рассматриваемом нанокompозите помимо акустической ветви возможны другие типы резонансов. По имеющимся в настоящее время данным, нет возможности сделать выбор между приведенными объяснениями. Резонансные поля, полученные в резонаторе, имеют еще меньшие значения.

Результаты, полученные при исследовании нанокompозита, содержащего никель-цинковый феррит, показаны на рис. 10. Большая часть измеренных резонансных полей укладывается на акустическую ветвь спектра. К этой ветви относятся данные, полученные как в волноводе, так и в резонаторе. Только на частоте $f = 34$ ГГц был зафиксирован резонанс, поле которого значительно меньше, чем поле резонанса акустической ветви на данной частоте. Такой резонанс также может быть вызван одной из причин, обсуждавшихся выше.

Заключение

Экспериментально продемонстрировано эффективное взаимодействие электромагнитных волн миллиметрового диапазона с 3D-нанокompозитами, состоящими из опаловых матриц, содержащих наночастицы никель-цинкового и марганец-цинкового феррита. Зависимость коэффициента передачи микроволн от напряженности магнитного поля определяется магнитным резонансом в магнитных нанокompозитах. Установлено, что спектры магнитного резонанса содержат акустическую ветвь, а также зафиксированы отдельные резонансы вне указанной ветви. Подробно изучено взаимодействие электромагнитных волн миллиметрового диапазона в прямоугольных резонаторах и в волноводе, действующем на моде TE_{10} , с указанными опаловыми матрицами. Доказано, что изменения микроволнового сигнала, прошедшего резонатор с образцом матрицы, содержащей никель-цинковый феррит, достигают 60 %.

Измерена частотная зависимость микроволновых изменений. Для ориентации полей $H \perp H_z$ наблюда-

лась обычная частотная зависимость амплитуды резонансного пика, когда амплитуда возрастает с ростом частоты. Для ориентации $H // H_z$ в матрице, содержащей никель-цинковый феррит, наблюдалось аномальное уменьшение амплитуды резонанса с ростом частоты волны.

Проведено сопоставление изменений микроволнового сигнала при прохождении волной образца магнитной матрицы и при отражении от нее. Установлено, что значение изменений и форма полевой зависимости коэффициентов прохождения и отражения близки друг к другу. Проведен теоретический анализ изменений коэффициентов прохождения и отражения в магнитном поле. Показано, что изменения коэффициента прохождения и коэффициента отражения выражаются сходными формулами через добавки, которые получают во внешнем магнитном поле постоянная распространения в образце и его волновое сопротивление.

Полученные результаты создают предпосылки для разработки управляемых магнитным полем высокочастотных устройств, работа которых будет основана на использовании микроволнового магнитного резонанса в магнитных нанокompозитах на основе опаловых матриц. Такие устройства конструктивно достаточно просты и могут быть весьма эффективны. В работе установлено, что для получения наибольших изменений микроволнового сигнала следует осуществлять ориентацию полей $H \perp H_z$. Рассматриваемые материалы могут найти применение при создании управляемых аттенуаторов, фазовращателей и других устройств миллиметрового диапазона.

Работа выполнена по плану РАН (тема № 01.2.006 13391) при частичной поддержке программы "Квантовая макрофизика" и гранта НШ-3257.2008.2.

Список литературы

1. Photonic glasses / Ed. Fuxi Gan, Lei Xu. Imperial College Press, 2006. 460 p.
2. Stancu A., Spinu L., O'Connor C. J. // J. Magn. Mater. 2002. Pt. 2. P. 242–245.
3. Spinu L., Srikanth H., Carpenter E. E., O'Connor C. J. // J. Appl. Phys. 2000. V. 87. N 9. Pt. 2. P. 5490–5492.
4. Monzon C., Loschialpo P., Smith D., Rachford F., Moore P., Forester D. W. // Phys. Rev. Letters. 2006. V. 96. P. 207402.
5. Usadel K. D. // Phys. Rev. 2006. V. B73. P. 212405.
6. Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Юрасов Н. И., Клещева С. М., Цветков М. Ю., Ганышина Е. А., Перов Н. С., Агафонов С. С., Глазков В. П., Саненков В. А., Черепанов В. М. Металломатные диэлектрические нанокompозиты на основе опаловых матриц // Труды XII Международной научно-технической конференции "Высокие технологии в промышленности России (Материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники)". М., 2006. С. 32–39.
7. Наноматериалы. III. Фотонные кристаллы и нанокompозиты на основе опаловых матриц / Под ред. М. И. Самойловича. М.: Изд. ОАО ЦНИИ "Техномаш", 2007. 303 с.
8. Семенов Н. А. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1973. 480 с.
9. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. Т. 1. М.: Высшая школа, 1970. 440 с.
10. Гуревич А. Г., Мелков Г. А. Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994. 464 с.

Г. А. Мустафаев, д-р техн. наук, проф.,

А. Г. Мустафаев¹, канд. техн. наук, ст. преподаватель

ГОУ ВПО "Кабардино-Балкарский государственный университет"

¹ ГОУ ВПО "Дагестанский государственный технический университет"

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ГЛУБОКОЙ ИЗОЛЯЦИИ СТРУКТУР КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ

Рассмотрены вопросы глубокого анизотропного травления структур кремний на изоляторе. Приведены параметры процесса формирования канавок анизотропным травлением в плазмохимическом реакторе при НЧ смещении на подложку.

Ключевые слова: канавка; анизотропное травление; плазмохимическое травление.

Введение

Одним из перспективных направлений развития современной микро- и нанoeлектроники является создание приборов и структур по технологии кремний на изоляторе (КНИ). Расширение сферы применения КНИ-приборов связано с их преимуществами перед приборами на объемном кремнии: отсутствие эффекта защелкивания, малые токи утечки, высокое быстродействие и низкое энергопотребление. КНИ-структуры являются основой при изготовлении различных микроэлектромеханических систем (МЭМС), таких как сенсоры, акселерометры и др.

Для достижения полной диэлектрической изоляции мощных высоковольтных приборов необходимо создание глубоких канавок анизотропным травлением с высоким аспектным соотношением. При изготовлении МЭМС часто применяется травление кремния до глубины залегания скрытого изолирующего оксида (до 500 мкм). Даже формирование сравнительно неглубоких канавок (глубина 30 мкм, ширина 1 мкм) требует травления с аспектным соотношением 30:1.

Процесс формирования глубоких канавок осуществляется в реакторе с ВЧ индукционным источником $\text{SF}_6 + \text{C}_4\text{F}_8$ или $\text{SF}_6 + \text{O}_2$ плазмы. На первой стадии процесса происходит быстрое травление кремния, на второй — пассивация боковой поверхности канавок. При этом нужно соблюдать баланс между процессами пассивации и травления, иначе возникают различные эффекты, которые затрудняют создание структур с необходимой геометрией. С увеличением глубины канавки изменяются условия доставки химически активных реагентов на дно и стенки канавки, что ведет к замедлению во времени

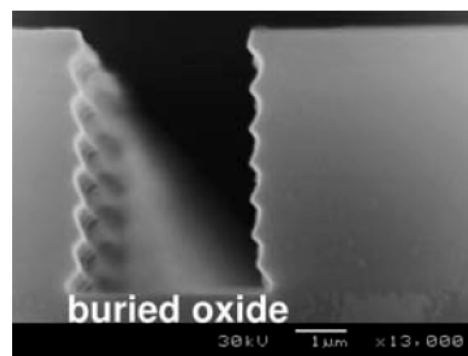


Рис. 1. Канавка с гребенчатыми стенками

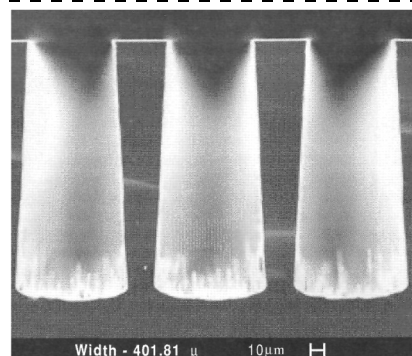


Рис. 2. Профиль канавки с отрицательным углом наклона стенки [2]

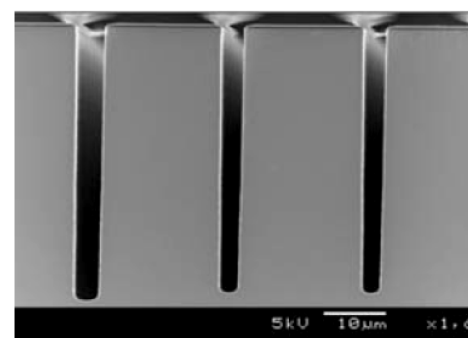


Рис. 3. Анизотропные канавки в объемном кремнии [3]

скорости травления, возникновению различного рода нарушений анизотропности травления (рис. 1). Например, при травлении с аспектным соотношением >30 с определенной глубины может возникать отрицательный угол наклона стенки, что свидетельствует о недостаточной пассивации стенок (рис. 2) [1, 2]. Для подавления подобных негативных явлений необходимо регулировать параметры процесса глубокого травления так, чтобы условия травления были оптимальными.

Цель данной работы — разработка процесса формирования глубоких канавок для полной диэлектрической изоляции высоковольтных КНИ-приборов.

В работе [3] предложен процесс формирования глубоких канавок в объемном кремнии с аспектным соотношением 50:1, в $\text{SF}_6 + \text{C}_4\text{F}_8$ плазме (рис. 3).

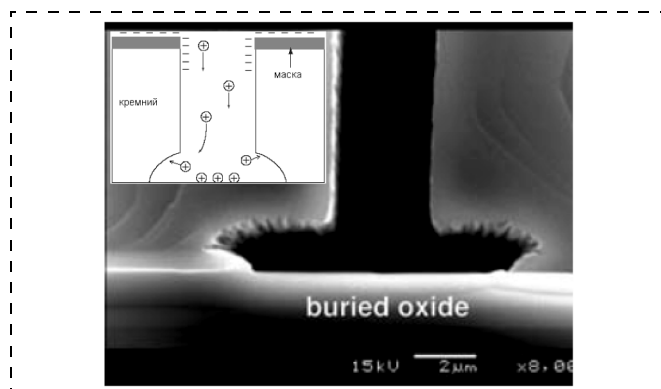


Рис. 4. Боковое подтравливание на границе кремний — скрытый оксид

Недостатком является то, что данный процесс не может быть использован при глубоком травлении КНИ-структур, так как на границе Si—SiO₂ в результате подтравливания слоя кремния образуется выемка (рис. 4). Показано что выемка является следствием встраивания электрического заряда в процессе травления [4]. Вследствие различного распределения ионов и электронов в плазме ионы накапливаются на дне канавки, в скрытом оксиде, а электроны на вершине. Результирующее электрическое поле достаточно для изменения траекторий падающих ионов и как следствие образования подтравы (см. вставку на рис. 4). Подобный эффект отсутствует в объемном кремнии, так как кремниевая подложка обладает достаточной проводимостью, чтобы предотвратить накопление заряда. Эффект подтравы более заметен в высокоплотной плазме, так как плотность ионов, а, соответственно, и зарядовый эффект в ней выше.

Эксперимент и результаты

Образцами служили КНИ-пластины (111), полученные по SIMOX-технологии, с приборным слоем кремния 50 мкм и скрытым слоем оксида 2 мкм, диаметром 100 мм.

В двухстадийном циклическом процессе травления Si в плазме SF₆ + C₄F₈, когда попеременно состав плазмы изменяется от SF₆ до C₄F₈, травление в направлении, перпендикулярном поверхности, происходит вследствие того, что на стадии пассивации осуществляется блокирование травления Si в боковом направлении из-за осаждения фторуглеродной пленки на стенки канавки. На следующей стадии происходит быстрое стимулированное ионами травление фторуглеродной пленки и Si в плазме SF₆ только со дна канавки.

Схематически плазмохимический реактор показан на рис. 5. Плазменное поле создается индуктивным ВЧ разрядом, возбуждаемым с помощью генератора (13,56 МГц, 1 кВт), реакционная камера находилась в магнитном поле. Реактивные ионы экстрагируются из плазменного поля НЧ смещением

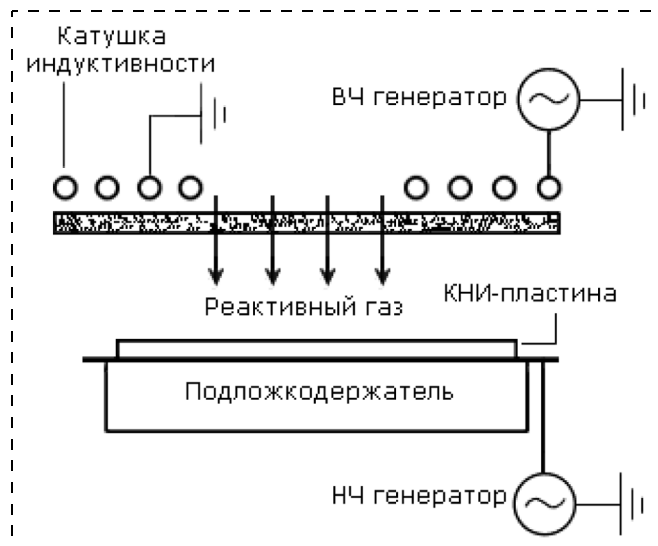


Рис. 5. Схема плазмохимического реактора

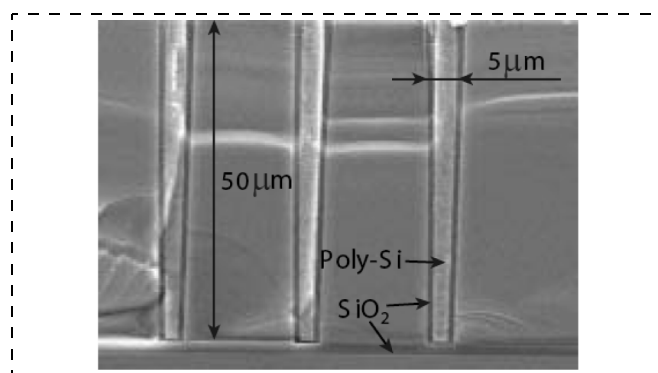


Рис. 6. Канавки, заполненные окислом кремния (0,8 мкм) и поликремнием (3,4 мкм)

подложкодержателя с КНИ-пластиной. Частота НЧ генератора наряду с амплитудой напряжения определяет энергию ионов, падающих на обрабатываемую пластину. Таким образом, возможно раздельное управление плотностью плазмы и энергией реактивных ионов. Травление проводили в смеси SF₆ + C₄F₈. Расход SF₆ и C₄F₈ изменялся от 10 до 20 см³/мин. Длительность стадии пассивации варьировалась в диапазоне 4...7 с, а время травления 8...12 с.

На характеристики процесса травления, такие как скорость, анизотропность и селективность травления, влияют следующие параметры стадии пассивации: длительность; мощность смещения; расходы SF₆ и C₄F₈ и их отношение [5, 6]. Эти параметры должны быть такими, чтобы на стадии пассивации фторуглеродная полимерная пленка росла преимущественно на боковой стенке канавки, а не на дне. Для уменьшения скорости образования полимерной пленки на дне канавки на подложку надо подавать определенную мощность смещения. В результате этого повышается энергия бомбардируемых ионов, и полимерная пленка на дне канавки и на поверхности маски не будет образовываться.

Для предотвращения образования потравы кремния на границе со скрытым изолирующим слоем на подложку подавалось смещение с НЧ генератора (380 кГц, 500 Вт).

На рис. 6 показаны канавки, полученные в результате двухстадийного травления. Конусообразная форма канавок позволяет проводить заполнение без пустот.

Было проведено окисление канавок и их последующее заполнение поликремнием. Измеренное пробивное напряжение структуры составило 500 В.

Список литературы

1. **Laermer F., Urban A.** Challenges, development, and applications of silicon deep reactive ion etching // *Microelectron. Eng.* 2003. Vol. 67—68. P. 349—355.
2. **Амиров И. И., Морозов О. В., Изюмов М. О.** и др. Плазменные процессы глубинного травления Si и SiO₂ для целей микротехнологии // *Тр. ФТИАН*. Т. 18, 2005. С. 173—186.
3. **Larmer F.** Method of Anisotropically Etching Silicon. US Patent, № 5501893, 1996.
4. **Handbook** of advanced plasma processing techniques / Ed.: Shul R. J., Pearton S. J. — Berlin et al.: Springer, 2000. 653 p.
5. **Rauf S., Dauksher W., Clemens S.** and etc. Model for a multiple-step deep Si etch process // *J. Vac. Sci. Technol.* 2002. Vol. 20. P. 1177—1179.
6. **Cowen C.** Deep trench isolation in bonded wafer SOI ICs using high density ICP etcher // *El. Chem. Soc. Proc.* Vol. 96-3. P. 364.

УДК 539.23

П. А. Шияев, канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель,
Д. А. Павлов, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф.,
Е. В. Коротков, аспирант,
М. В. Треушников, аспирант,
Н. О. Кривулин, магистрант,
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ И ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ СУБМИКРОННЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ НА САПФИРЕ

Методом микроскопии латеральных сил в режиме Z-модуляции исследовались свойства субмикронных слоев (30—1000 нм) кремния на сапфире, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Показано, что контраст силы трения между кремнием и сапфиром существует независимо от толщины осажденного слоя кремния, а разница в упругих свойствах кремния и сапфира проявляется только на толстых (толщиной более 100 нм) слоях кремния.

Ключевые слова: кремний на сапфире (КНС), молекулярно-лучевое осаждение (МЛО), атомно-силовая микроскопия (АСМ), микроскопия материальных сил (МЛС), режим Z-модуляции.

Введение

Развивающееся в последнее время направление нанотехнологии по разработке микро- и нанoeлектромеханических систем (МЭМС, НЕМС) [1—2] требует изучения механических свойств материалов (коэффициент трения, микротвердость и т. д.) на нанометровых масштабах. Микроэлектромеханические устройства очень чувствительны к изменению тончайшего слоя материала на поверхности. Отношение площади поверхности к объему детали, размеры которой несколько нанометров, — много боль-

ше, чем у обычных объектов. Поэтому роль поверхностных явлений становится значительной, повышая роль силы трения над силой инерции. Зачастую наблюдается сильное различие коэффициентов трения материалов, измеренных на атомарном и макроскопическом уровне [3]. Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) позволяет изучать не только геометрию поверхности, но и многие физические характеристики поверхности, в том числе трение и микротвердость на масштабах вплоть до атомарных.

Применение стандартных методик атомно-силовой микроскопии (АСМ), таких как микроскопия латеральных сил (*Lateral Force Measurement — LFM*) и режим Z-модуляции (*Z-Modulation mode*) позволяет исследовать силу трения между зондом и образцом, а также оценивать локальную упругость материала на нанометровых масштабах [2].

В данной статье исследуются субмикронные (толщиной от 30 до 1000 нм) слои кремния на сапфире (КНС), выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Технология кремний на сапфире (КНС) имеет ряд преимуществ над технологией изготовления интегральных схем (ИС) на объемном кремнии. Использование изолирующей подложки (в данном случае сапфира) позволяет значительно увеличить радиационную и температурную стойкость приборов на основе КНО-технологии, что имеет большое значение, в первую очередь, для космической отрасли, атомной энергетики, а также для военного применения [4].

Методика эксперимента

Эпитаксиальные слои кремния выращивались с помощью метода сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии, описанного в [5].

С помощью СЗМ исследовалась топография полученных слоев КНС и определялась толщина слоя. Одновременно с топограммами в режиме латеральных сил и режиме Z-модуляции регистрировались

карты распределения сигналов, отображающих контраст сил трения и упругих свойств на границе между кремнием и сапфиром. Для этого после процесса осаждения с части поверхности каждого образца слой кремния удалялся химическим травлением. Это позволило сформировать четкую границу кремний/сапфир. Использование маски во время напыления оказалось для этих целей неэффективным: вследствие эффекта подпыления в процессе роста получалась сильно размытая ступенька, размеры которой превышали размеры области сканирования зондового микроскопа. Для исключения топографической составляющей в качестве карты распределения силы трения бралась полуразность карт распределения латеральных сил, снятых при разных направлениях сканирования [6–8].

Результаты эксперимента и их обсуждение

По результатам сканирования области ступеньки кремний—сапфир (рис. 1, *а*, см. третью сторону обложки) точно определялась толщина выращенного слоя. Гистограмма высот данной области (рис. 1, *б*, см. третью сторону обложки), содержит два пика: слева — пик кремния и справа — пик сапфира. Расстояние между максимумами пиков соответствует толщине слоя кремния. При этом ширина каждого пика отражает распределение высот по поверхности кремния или сапфира и пропорциональна шероховатости данного участка поверхности.

На образцах КНС с толщиной эпитаксиального слоя больше 100 нм наблюдалось различие сигнала *Z*-модуляции между областями кремния и сапфира (рис. 2, *а*, см. четвертую сторону обложки), что свидетельствует о различии их механических свойств. Анализ гистограмм распределения сигнала *Z*-модуляции показал, что на образцах КНС с толщиной кремниевого слоя до 100 нм присутствует только один пик, который практически симметричен (рис. 2, *б*, см. четвертую сторону обложки). Это означает, что среднее значение амплитуды сигнала на участке слоя кремния равно среднему значению амплитуды сигнала на сапфировой подложке. Но размах амплитуды исследуемого сигнала на кремнии в несколько раз превышает размах амплитуды на сапфире.

Рост эпитаксиального слоя кремния на сапфире при МЛЭ идет путем образования и последующей коалесценции островков [5]. Именно образование таких островков на тонких слоях кремния (рис. 3, *а*, см. четвертую сторону обложки) и оказывает влияние на размах амплитуды сигнала *Z*-модуляции. Большой размах амплитуды сигнала *Z*-модуляции на поверхности кремния может быть связан с различием упругих свойств между островками и межостровковым пространством.

Мы предполагаем, что различные дефекты, неизбежно возникающие во время роста, такие как дислокации и микродвойники могут изменять твердость и упругие свойства материала. Образование таких

дефектов происходит в процессе роста преимущественно вблизи гетерограницы кремний/сапфир в результате рассогласования решеток, а также вследствие различия коэффициентов теплового расширения кремния и сапфира. Тонкие слои содержат большое число дислокаций и микродвойников, что приводит к изменению упругих свойств слоя кремния. Плотность дефектов уменьшается пропорционально расстоянию до границы кремний/сапфир, т. е. с увеличением толщины слоя кремния, что приводит к появлению контраста *Z*-модуляции именно на довольно толстых слоях КНС (более 100 нм).

Контраст же латеральных сил регистрируется при любых толщинах слоя кремния (рис. 4, *а*, см. четвертую сторону обложки).

Левый пик на гистограмме (рис. 4, *б*, см. четвертую сторону обложки) соответствует распределению сигнала по поверхности сапфира, а правый — по поверхности кремния. Пики эти почти не перекрываются. Таким образом, в режиме латеральных сил наблюдаются существенные различия сигналов в областях кремния и сапфира. Разность сигналов от кремния и сапфира в данном режиме присутствует на образцах с любой толщиной слоя кремния в интервале 30–1000 нм и почти не зависит от толщины слоя кремния. При этом шероховатость поверхности кремния на различных образцах в наших экспериментах существенно различалась (от 5 до 16 нм на скане размером 5×5 мкм). Очевидно, в нашем случае влияние шероховатости на сигнал LFM пренебрежимо мало. Анализ карты распределения латеральных сил от тонких слоев КНС (рис. 3, *б*, см. четвертую сторону обложки) показывает, что эпитаксиальный слой кремния с островками является однородным по своим трибологическим свойствам. Более того, однородность LFM-сигнала наблюдается на слоях кремния на сапфире во всем диапазоне исследуемых толщин.

На картах распределения сигнала *Z*-модуляции (рис. 3, *в*, см. четвертую сторону обложки) существует контраст сигнала между островками и межостровковым пространством, что свидетельствует о различии их упругих свойств. Однако сигнал *Z*-модуляции может быть связан не только с влиянием механических свойств, но и рельефа поверхности.

При наличии островков в структуре слоя кремния сигнал *Z*-модуляции может быть связан не только с влиянием механических свойств, но и с влиянием рельефа поверхности. На рис. 5 показаны профили распределения высоты и сигнала *Z*-модуляции для одной той же области сканирования.

Очевидно, что сигнал *Z*-модуляции не повторяет рельеф поверхности, и определяющим фактором возникновения контраста между зернами и межзеренными областями в режиме *Z*-модуляции является именно различие их упругих свойств. Большой сигнал (область между островками) соответствует более упругой области. На механические свойства в данном случае также могут влиять дефекты. Однако де-

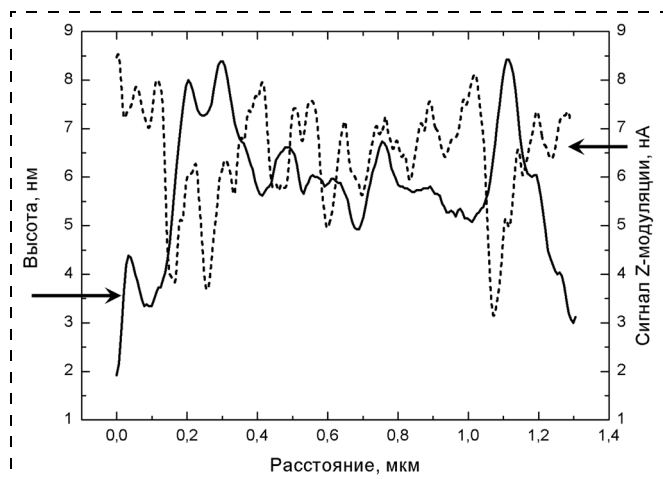


Рис. 5. Профиль распределения высот и сигнала Z-модуляции для слоя кремния на сапфире

лать выводы о дефектности материала затруднительно, так как дефекты в зависимости от их концентрации могут как увеличивать, так и уменьшать твердость, и нельзя однозначно сказать какая область более дефектна.

Заключение

В статье исследованы упругие и фрикционные свойства эпитаксиальных слоев кремния на сапфире. Показано, что коэффициент трения между зондом и слоем кремния на сапфире не зависит от толщины осажденного кремниевого слоя, при этом сигнал из канала регистрации латеральных сил однороден на поверхности кремния. В режиме Z-модуляции АСМ, который выявляет различие в упругих свойствах участка поверхности, обнаружен контраст между областями кремния и сапфира при тол-

щинах эпитаксиального слоя больше 100 нм. При толщинах кремниевого слоя меньше 100 нм средние значения сигналов Z-модуляции на кремнии и сапфире совпадают. Но сигнал Z-модуляции на кремнии является крайне не однородным: островки и межостровковое пространство различаются по своим упругим свойствам вследствие наличия дефектов, возникающих в процессе роста.

Работа была выполнена при поддержке грантов Рособразования РНП. 2.2.2.3.10004, CRDF Post-Doctoral Fellowship Supplemental Award Y4-P-01-07 и гранта Президента РФ для молодых кандидатов наук МК-3893.2007.2.

Список литературы

1. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2004. 328 с.
2. Springer Handbook of Nanotechnology / Ed. Bharat Bhushan // Springer. 2004. 1222 p.
3. Ruan J., Bhashan B. Atomic-scale friction measurements using friction force microscopy: part I — general principles and new measurement techniques // ASME J. Tribol. 1994. V. 116. P. 378—388.
4. Адонин А. С. Новые возможности технологии БИС со структурой "кремний на сапфире" // Электронные компоненты. 2000. № 3. С. 2—6.
5. Шиляев П. А., Павлов Д. А., Короткое Е. В., Треушников М. В. Молекулярно-лучевое осаждение сверхтонких слоев кремния на сапфире // Материалы электронной техники. 2008. № 2. С. 62—66.
6. Colchero J., Bielefeldt H., Ruf A. and oth. Scanning Force and Friction Microscopy // Phys. Stat. Sol. (a). 1992. V. 131. P. 73—75.
7. Magonov S. N., Whangbo M.-H. Surface analysis with STM and AFM // VCH. Weinheim. 1996. 323 p.
8. Overney R. M., Meyer E., Frommer J., Brodbeck P. and oth. Friction measurements on phase-separated thin films with a modified atomic force microscope // Nature. 1992. V. 359. P. 133—134.

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

УДК 621.382

Д. Ю. Адамов, канд. техн. наук., зам. директора,
О. С. Матвеев, инженер,
ООО "Юник Ай Сиз", г. Москва

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА НАНОМЕТРОВЫХ КМОП-МИКРОСХЕМ

Рассмотрены факторы, ограничивающие быстродействие логических элементов микросхемы, а также освещены проблемы экономии мощности и способы их решения.

Ключевые слова: логические элементы, КМОП, экономия мощности, элементная база, быстродействие.

Статические параметры нанометровых МОП-транзисторов

Наиболее важные статические параметры — это максимальный ток стока, максимальное напряжение на затворе и стоке, пороговое напряжение, токи утечки сток—исток и затвор—исток. Изменение основных параметров с уменьшением размеров определяется правилами масштабирования физической структуры транзисторов. При использовании правил пропорциональной миниатюризации пороговое напряжение и максимальные напряжения на затворе и стоке уменьшаются пропорционально длине затвора L . Крутизна проходной вольт-амперной характеристики (ВАХ) увеличивается обратно пропорционально L .

Таблица 1

Максимальное напряжение для МОП-транзисторов с разной длиной затвора

Длина затвора, нм	65	45	32	25
Максимальное напряжение, В	1,1	1,0	0,9	0,8

Максимальный ток стока при максимальных напряжениях на затворе и стоке не зависит от длины затвора [1]. Типовое значение максимального тока стока nМОП-транзисторов 600—650 мкА/мкм, рМОП — 220—250 мкА/мкм.

Максимальные напряжения ограничены, в первую очередь, требованиями надежности. В технологии нанометровых микросхем используются двухслойные или многокомпонентные подзатворные диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью. В этом случае крутизна проходной ВАХ и максимальное напряжение зависят от свойств диэлектрика. Программа развития технологии ITRS-2007 (Международная технологическая дорожная карта для полупроводников) определяет рубежи для максимального напряжения КМОП-транзисторов [2]. Транзисторы с длиной затвора 65 нм должны выдерживать напряжения до 1,1 В. Дальнейшее уменьшение размеров сопровождается снижением максимального напряжения до 0,8 В при длине затвора 25 нм (табл. 1).

Слабая зависимость максимального напряжения от длины затвора приводит к увеличению максимального тока транзистора.

Крутизна проходной ВАХ нанометровых МОП-транзисторов увеличивается в меньшей степени, чем уменьшается длина затвора. Рост крутизны ограничен сопротивлением истока и снижением подвижности носителей в канале.

Утечки в МОП-транзисторах имеют три основных составляющих: ток утечки подзатворного диэлектрика, термоэмиссионный ток сток—исток, туннельный ток сток—исток. Основной механизм переноса тока в подзатворном диэлектрике — туннелирование неосновных носителей из поверхностного слоя в материал затвора. Потенциальный барьер для дырок (4,5 эВ) больше, чем для электронов (3,1 эВ) [3]. Туннельный ток в сильной степени зависит от толщины диэлектрика и уменьшается примерно в 10 раз при увеличении толщины на 20 %. Туннельный ток очень слабо зависит от температуры.

Термоэмиссионный ток протекает в области пространственного заряда в подложке. В литературе часто встречается термин "подпороговый ток". Этот ток сильно зависит от температуры, напряжений затвор—исток и сток—исток:

$$I_{\text{т.ст}} = I_0 \exp\left(\frac{-\varphi_{\text{в}}}{\varphi_{\text{т}}}\right), \quad (1)$$

где I_0 — масштабный ток; $\varphi_{\text{в}}$ — потенциальный барьер в истоке; $\varphi_{\text{т}}$ — температурный потенциал.

Зависимость тока утечки от температуры определяется температурным потенциалом. Зависимости потенциального барьера от напряжений на затворе и стоке определяются соотношением емкостей затвор—исток, сток—исток.

Подложка или изолированный "карман" — это еще один управляющий электрод в МОП-транзисторе. В нанометровых транзисторах увеличивается отношение емкости затвора к емкости подложки за счет использования новых диэлектриков. Влияние подложки при этом ослабевает. Крутизна управления по подложке составляет 3—5 % от крутизны управления по затвору.

Туннельный ток через потенциальный барьер исток—канал можно не учитывать в транзисторах с длиной затвора 45 нм и более. Однако уже для следующего технологического поколения (32 нм) туннельный ток может стать серьезной проблемой [4].

Вариации статических параметров

Вариации параметров имеют коррелированные и случайные составляющие. Основной причиной случайных составляющих являются термодинамические неоднородности параметров физической структуры. Коррелированные вариации связаны с взаимным влиянием элементов структуры, неровностями подложки и слоя резиста. Причем коррелированные вариации размеров на фотошаблоне переносятся на пластины. Характеризация вариаций требует измерения тестовых кристаллов на множестве пластин.

Влияние вариаций параметров структуры на выходные характеристики электронной схемы можно оценить только в том случае, если число варьируемых параметров невелико [5].

Исследования систематических вариаций показали, что их корреляционная длина меняется в достаточно узком диапазоне 1—5 мм и в значительной степени определяется процессами переноса изображения на пластину [6].

Исследования систематических вариаций проще и удобнее проводить, измеряя утечки во фрагментах схемы или специальных тестовых блоках. Утечки очень хорошо коррелируют с пороговым напряжением и толщиной подзатворного диэлектрика. Исследования показали, что на пластине обычно имеются достаточно большие площади без значительных отклонений от ожидаемых величин. Области с отклонениями параметров включают тесты как с увеличенными, так и с уменьшенными значениями измеряемых величин [7]. По измерениям утечек можно оценить вариации порогового напряжения и максимального тока стока. Например, изменение подпорогового тока в 3 раза соответствует изменению порогового напряжения на 40 мВ и максимального тока на 10 %.

Факторы, ограничивающие быстродействие логических элементов

Качественные оценки мощности и быстродействия логических элементов (ЛЭ) можно сделать на основе простейших формул:

энергия переключения вентиля

$$E = \frac{C_n V_{\text{пит}}^2}{2}; \quad (2)$$

время переключения

$$t = \frac{2 C_n V_{\text{пит}}}{I_{\text{max}}}; \quad (3)$$

максимальная мощность

$$P = \frac{E}{t} = \frac{V_{\text{пит}} I_{\text{max}}}{4}, \quad (4)$$

где C_n — емкость нагрузки вентиля; $V_{\text{пит}}$ — напряжение питания; I_{max} — максимальный выходной ток. Площадь вентиля пропорциональна квадрату минимального размера

$$S \sim L^2. \quad (5)$$

Если уменьшение размеров элементов выполнено в соответствии с принципом пропорциональной миниатюризации, то напряжение питания и максимальный выходной ток уменьшаются пропорционально минимальному размеру, а плотность мощности (P/S) не изменится. При селективном масштабировании нанометровых транзисторных структур напряжение питания и выходной ток слабо зависят от минимальных размеров. В пределе плотность мощности возрастает обратно пропорционально квадрату минимального размера. Оценка предельной мощности для пропорционально масштабируемых структур составляет 30 Вт/мм², для нанометровых структур это значение возрастает в несколько раз и превышает 100 Вт/мм². Допустимое значение плотности мощности ограничено возможностями воздушного охлаждения микросхем в портативной аппаратуре и составляет 0,6 Вт/мм² [2]. Средняя плотность заполнения площади блока логическими элементами 20—30 %. Следовательно, средняя частота переключения логических элементов в схеме должна быть меньше максимальной в 10—15 раз. Уменьшение размеров элементов в нанометровом диапазоне требует увеличения этого соотношения до 40—50.

Энергия переключения нанометровых ЛЭ в пределе может быть меньше 10⁻¹⁵ Дж, а задержка сигнала — несколько пикосекунд. В реальных схемах энергия переключения и задержка определяются емкостями сигнальных проводников. Суммарная емкость сигнальных проводников во много раз превышает суммарную входную емкость логических элементов. Среднее быстродействие ЛЭ ограничено емкостями

и сопротивлениями проводников, допустимой плотностью мощности, напряжением питания. Собственное быстродействие ЛЭ возрастает с увеличением напряжения питания, так как выходной ток увеличивается быстрее, чем логический перепад. В условиях ограничения плотности мощности увеличение тока достигается увеличением размеров выходных транзисторов при снижении напряжения питания. Среднее быстродействие ЛЭ возрастает при снижении напряжения питания.

Простые схемы с микрометровыми и субмикрометровыми размерами строились на основе универсальных ЛЭ. В условиях ограничения мощности требуется минимум две группы ЛЭ: быстродействующие и энергосберегающие.

Когда задержка сигнала в ЛЭ становится меньше 10 пс, быстродействие ограничивается сопротивлением и емкостью соединительных проводников. С уменьшением размеров элементов проявляется новый вид ограничений на допустимую плотность тока в сигнальных проводниках. Сделаем оценку задержки для линии связи с сопротивлением $R_{\text{пр}}$ и емкостью $C_{\text{пр}}$. В линии связи используются k инверторов — повторителей сигнала. Инверторы характеризуются выходным сопротивлением $R_{\text{инв}}$ и емкостью $C_{\text{инв}}$. Если инвертор с минимальными размерами транзисторов имеет выходное сопротивление R_0 и емкость C_0 , то

$$R_{\text{инв}} = \frac{R_0}{h}; \quad C_{\text{инв}} = h C_0, \quad (6)$$

где h — масштабный коэффициент.

Задержка сигнала в линии связи

$$t_3 = k \left[0,7 \frac{R_0}{h} \left(\frac{C_{\text{пр}}}{k} + h C_0 \right) + \frac{R_{\text{пр}}}{k} \left(0,4 \frac{C_{\text{пр}}}{k} + 0,7 h C_0 \right) \right]. \quad (7)$$

Минимальное значение задержки сигнала

$$t_{3\text{min}} = 2,5 \sqrt{R_0 C_0 R_{\text{пр}} C_{\text{пр}}}, \quad (8)$$

которое достигается при

$$k_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{0,4 R_{\text{пр}} C_{\text{пр}}}{0,7 R_0 C_0}}, \quad h_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{R_0 C_{\text{пр}}}{R_{\text{пр}} C_0}}. \quad (9)$$

Плотность тока в проводнике оценивается величиной

$$j_{\text{пр}} = \frac{1}{S_{\text{пр}}} \frac{C_{\text{пр}} V_{\text{пит}}}{R_{\text{опт}}} f_{\text{max}}, \quad (10)$$

где $S_{\text{пр}}$ — сечение проводника; f_{max} — максимальная частота сигнала в проводнике: $f_{\text{max}} = 1/t_{3\text{min}}$. Если считать, что используются проводники минималь-

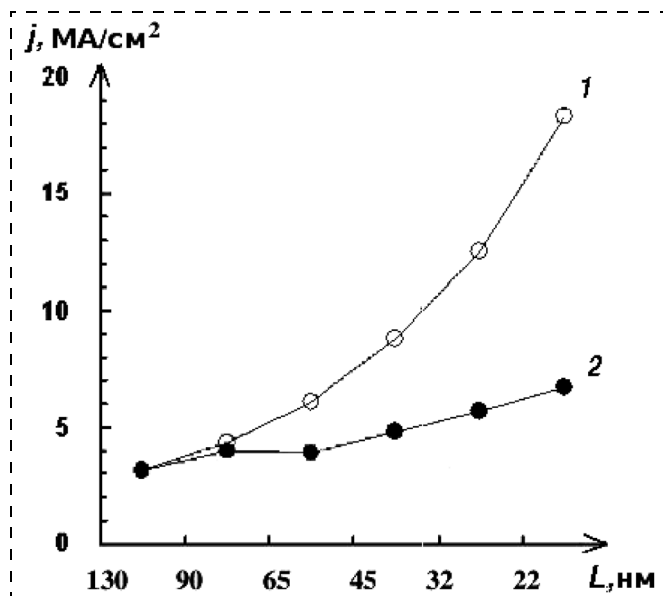


Рис. 1. Зависимость плотности тока в проводнике длиной 1 мкм от минимальных размеров структуры: 1 — без масштабирования напряжения питания; 2 — с масштабированием напряжения питания

ной ширины, а их длина уменьшается пропорционально ширине, то с уменьшением проектных норм плотность тока будет возрастать. На рис. 1 приведены расчетные зависимости плотности тока j в проводниках минимальной ширины для нескольких технологических поколений. Во всех случаях требуемая плотность тока превышает $2,5 \cdot 10^6$ А/см² [8]. Значение $2,5 \cdot 10^6$ А/см² — это предельная оценка плотности тока в пленочных проводниках. Для примера, максимальная плотность тока в алюминиевых пленках $2 \cdot 10^5$ А/см², а в золотых пленках — $2 \cdot 10^6$ А/см². Снижение плотности тока может быть достигнуто или уменьшением длины проводника между ЛЭ, или уменьшением выходного тока с увеличением задержки сигнала t_3 . Ограничение задержки плотностью тока примерно вдвое увеличивает ее значение по сравнению с минимальным значением. Для технологии с минимальным размером 65 нм длина проводника минимальной ширины, не ограниченная плотностью тока, составляет 20 мкм.

Развитие технологии в направлении уменьшения ширины проводников и увеличения допустимой плотности тока сопровождается увеличением удельного сопротивления металлических пленок. Рассеяние электронов на примесях и границах пленки увеличивает сопротивление. Нельзя значительно увеличить и ширину проводников. Увеличение ширины снижает плотность заполнения кристалла ЛЭ, увеличивает среднюю длину проводников, их емкость и мощность схемы.

Управление быстродействием и надежностью системы сигнальных связей осуществляется в основном конструктивными и схемотехническими средствами. Снижение логического перепада ослабляет

требования к допустимой плотности тока в проводнике. Уменьшение задержки в линии связи достигается оптимальным выбором числа и размеров повторителей сигнала. Рабочая частота выбирается с учетом ограничений на мощность и допустимую плотность тока.

Быстродействующие логические элементы

Быстродействие ЛЭ в условиях ограничений на мощность и нагрузочную емкость определяется напряжением питания и пороговыми напряжениями МОП-транзисторов. Увеличение быстродействия достигается увеличением напряжения питания и снижением пороговых напряжений. Снижение мощности, наоборот, требует снижения напряжения питания и увеличения пороговых напряжений. Оптимальные решения достигаются использованием МОП-транзисторов с разными пороговыми напряжениями и нескольких источников электропитания.

Первая задача экономии мощности требует снижения сквозных токов ЛЭ, нагруженных на длинные линии связи. Если напряжение питания больше суммы пороговых напряжений nМОП- и pМОП-транзисторов, то в процессе переключения ЛЭ ток течет не только в нагрузку, но и прямо между шинами питания. Для пологих фронтов входных сигналов заряд сквозного тока будет больше заряда нагрузочной емкости. Для снижения сквозных токов используются двух-, трехкаскадные ЛЭ (рис. 2). Входной каскад строится на транзисторах минимальных размеров и служит для выполнения логических функций и уменьшения фронта сигнала. Далее стоит каскад расщепления сигнала и мощный выходной каскад. Раздельное управление транзисторами выходного каскада обеспечивает режим, при котором эти транзисторы никогда не открываются одновременно. Если в ЛЭ

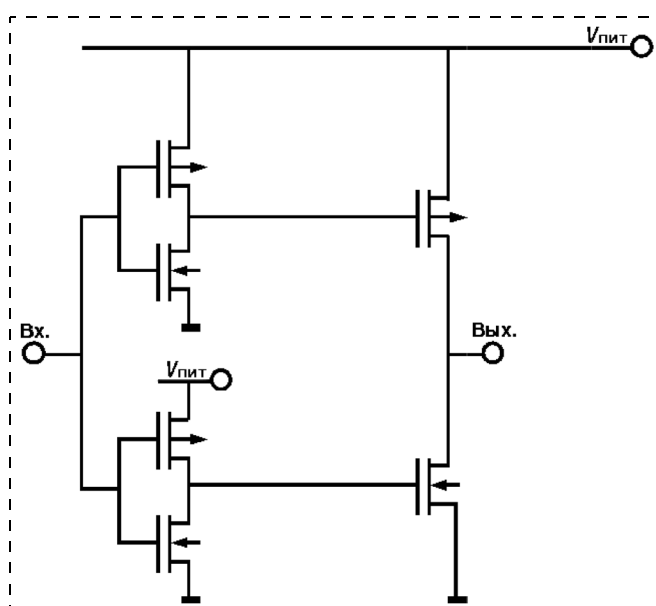


Рис. 2. Драйвер-повторитель без сквозного тока в выходном каскаде

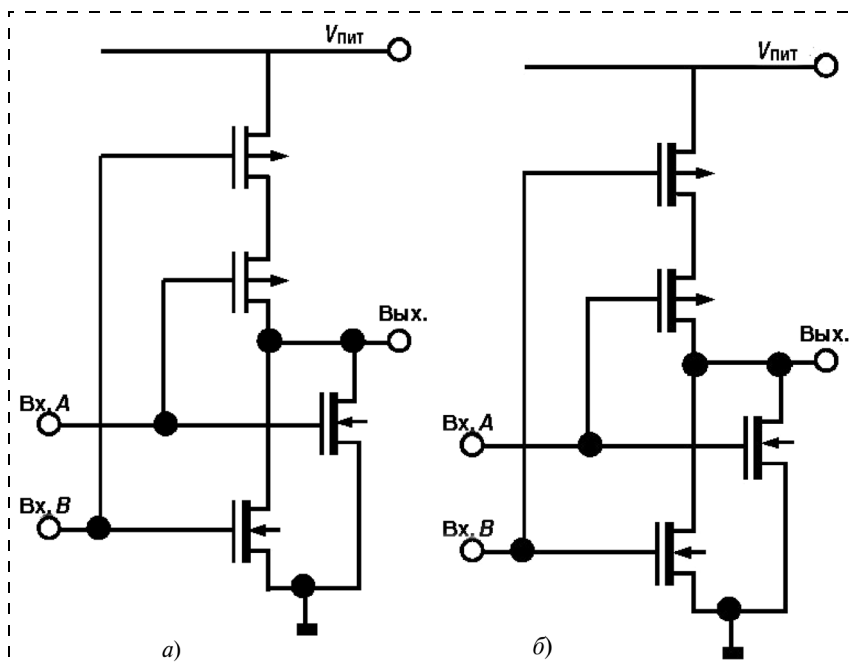


Рис. 3. Варианты двухвходового логического элемента ИЛИ/НЕ с применением транзисторов с высоким порогом:

a — высокий порог в nМОП-транзисторах уменьшает утечки в 14 раз и увеличивает задержку на 30 %; *б* — высокий порог во всех транзисторах уменьшает утечки в 20 раз и увеличивает задержку на 70 %

не требуется логическая инверсия сигнала, то первый и второй каскады могут быть совмещены [9].

Вторая задача экономии мощности требует снижения токов утечки. Токи утечки протекают в подзатворном диэлектрике и в канале МОП-транзистора.

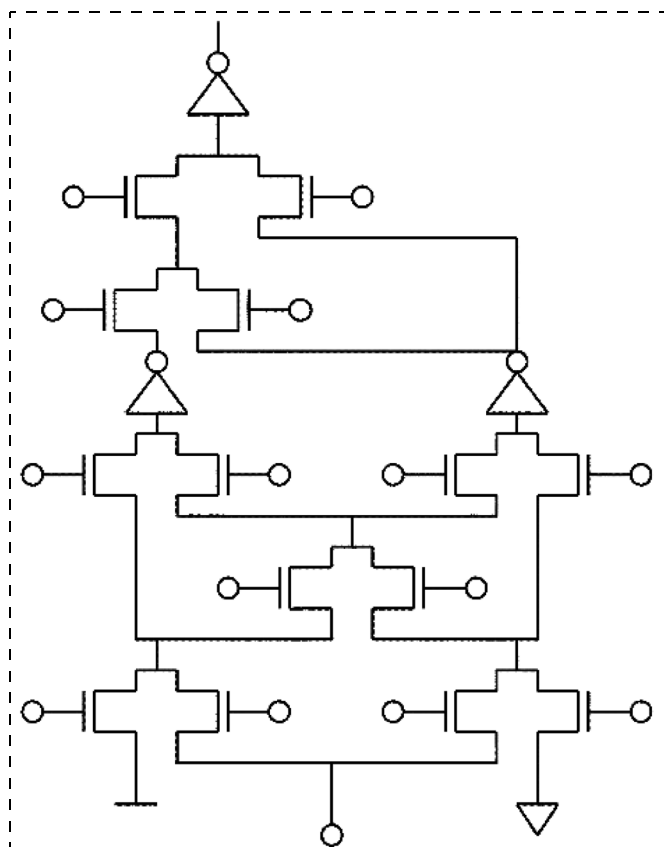


Рис. 4. Блок переноса для трехразрядного сумматора

Утечки в канале можно уменьшить в несколько раз, используя транзисторы с разными пороговыми напряжениями. На рис. 3 приведены электрические схемы нескольких типов логических элементов с уменьшенными утечками [10]. Утечки в ЛЭ уменьшаются в 2—3 раза при увеличении задержки сигнала на 10—15 %. Уменьшить утечки в подзатворном диэлектрике без увеличения его толщины схемотехническими средствами пока не удается.

Третья задача экономии мощности — это уменьшение числа транзисторов, к которым приложено полное напряжение питания. С этой целью эффективно используются логические элементы на проходных ключах (рис. 4) [11]. Для уменьшения площади и входной емкости ЛЭ проходные ключи реализуются только на nМОП-транзисторах. Инвертор-усилитель имеет цепь положительной обратной связи на рМОП-транзисторе (триггер Шмитта). Элемент сохраняет логическое состояние, когда

все проходные ключи закрыты, и формирует короткие фронты выходного сигнала при медленном изменении входных сигналов. Несложно организовать раздельное управление выходными транзисторами ЛЭ и обеспечить отсутствие сквозного тока между шинами питания. Логические элементы на проходных ключах эффективно работают на длинные линии связи, обеспечивают построение комбинационных схем с большой логической глубиной и небольшим числом инверторов-усилителей.

Энергия переключения логических элементов на проходных ключах меньше энергии переключения типовых КМОП ЛЭ. Чем сложнее логическая функция вентиля, тем больше преимущество ЛЭ на проходных ключах (рис. 5). Для реализации сложных логических функций требуется меньшее число транзисторов. Площадь блока получается меньше. Сравнение вариантов реализации сложных функциональных блоков на основе КМОП-технологии с минимальными размерами 130 нм показало, что при равной площади блоков быстродействие варианта на проходных ключах на 30 % выше, чем для варианта на типовых статических вентилях. Преимущество достигается за счет увеличения выходного тока ЛЭ при снижении сквозного тока. Для варианта с энергосбережением площадь блока на проходных ключах в 3 раза меньше, чем для типовой схемотехники, при отставании в быстродействии 25 % [11]. Преимущество в площади достигается за счет меньшего числа рМОП-транзисторов. В структуре ЛЭ на проходных ключах используются только одинаковые nМОП-транзисторы в логических цепях и два—три типа инверторов-усилителей, различающихся размерами выходных транзисторов.

Мощность инвертора при задержке 3,4 нс

Минимальный размер, нм	Напряжение питания, мВ	Средняя мощность, мкВт
250	500	0,37
180	420	0,3
90	280	0,2
50	200	0,14

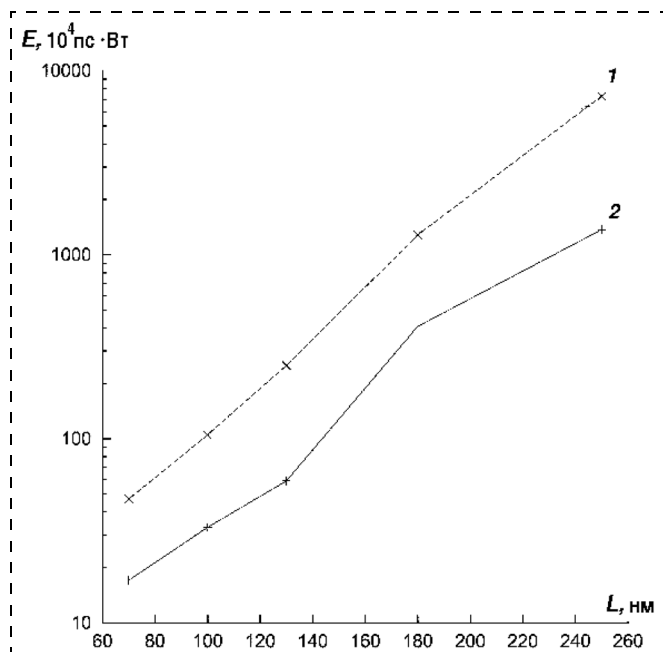


Рис. 5. Зависимость энергии переключения трехвходного логического элемента "исключающее ИЛИ" от технологических размеров транзисторов:

1 — для КМОП ЛЭ; 2 — для ЛЭ на проходных ключах

В условиях действия конструктивных ограничений на длину проводников и плотность тока снижение площади логического блока дает значительный выигрыш и по числу необходимых повторителей в линиях связи, и по общей площади кристалла микросхемы.

Энергосберегающие логические элементы

Наиболее эффективный метод снижения энергопотребления — это уменьшение напряжения питания и логического перепада. В основе метода лежит известный факт, что соотношение задержек КМОП ЛЭ при снижении напряжения питания изменяется не более, чем на 10–15 % [12]. Причем возможно снижение напряжения питания ниже порогового напряжения МОП-транзисторов. В этом случае выходные токи транзисторов — это подпороговые токи утечки. Быстродействие схемы сильно снижается, но сохранение состояний в режиме ожидания достигается при очень малом токе потребления. Теоретический предел для подпорогового режима работы ограничен минимальной величиной

$$V_{dd_{min}} = 2\phi_T \approx 52 \text{ мВ.} \quad (11)$$

Практически используются напряжения в несколько раз больше.

Очень часто встречаются случаи, когда не требуется сверхвысокое быстродействие микросхемы. Главное требование — это высокая энергетическая эффективность при относительно низком быстродействии. Получены оценки энергетической эффективности логических элементов при низких напряжениях питания для нескольких технологических поколений [13]. В табл. 2 приведены значения по-

требляемой мощности кольцевых генераторов, построенных на инверторах с разными минимальными размерами. Напряжение питания устанавливалось таким, чтобы задержка сигнала в каждом инверторе равнялась 3,4 нс [13].

Следует отметить, что для приборов с размерами 250 и 180 нм напряжение питания практически равно пороговому напряжению. Реально подпороговый режим реализован для приборов с размерами 90 и 50 нм. Эти приборы имеют резерв повышения быстродействия в подпороговом режиме.

Если микросхемы заранее проектируются для работы в подпороговом режиме, то возможно значительное улучшение их основных технических параметров. При проектировании подпороговой логики необходимо учитывать следующее.

Во-первых, зависимость тока стока от управляющего напряжения на затворе — экспоненциальная с коэффициентом неидеальности 1,5 и менее. Коэффициент усиления возрастает не менее, чем вдвое.

Во-вторых, в нанометровых пМОП-транзисторах в подпороговом режиме наблюдается обратный короткоканальный эффект [14]. Эффект объясняется смыканием под каналом областей p -типа, которые создаются под n^+ областями истока и стока. При смыкании p -областей средняя концентрация акцепторной примеси в подложке и пороговое напряжение возрастают с уменьшением длины канала. В рМОП-транзисторах этот эффект проявляется меньше, так как донорная примесь (мышьяк) имеет меньший коэффициент диффузии. Соотношение токов n - и p -канальных транзисторов меняется. При равной ширине ток пМОП больше тока рМОП в 1,25–1,3 раза [14].

В-третьих, в блоках с высокой переключающей активностью (более 10 %) эффективно использование логических элементов с источником постоянного тока в нагрузке (рис. 6).

В-четвертых, возможно применение МОП-транзисторов с меньшей входной емкостью. В транзисторах, работающих с максимальными токами, сопротивления истока и стока должны быть минимальными. Для этого в структуре МОП-транзистора между контактной областью и затвором формируются слаболегированные области расширения истока и стока. Если такие области не формировать, то сопротивления истока и стока возрастут в несколько раз, а емкость затвора уменьшится примерно вдвое. При работе МОП-транзисторов в подпороговом режиме сопротивления истока и стока не оказывают суще-

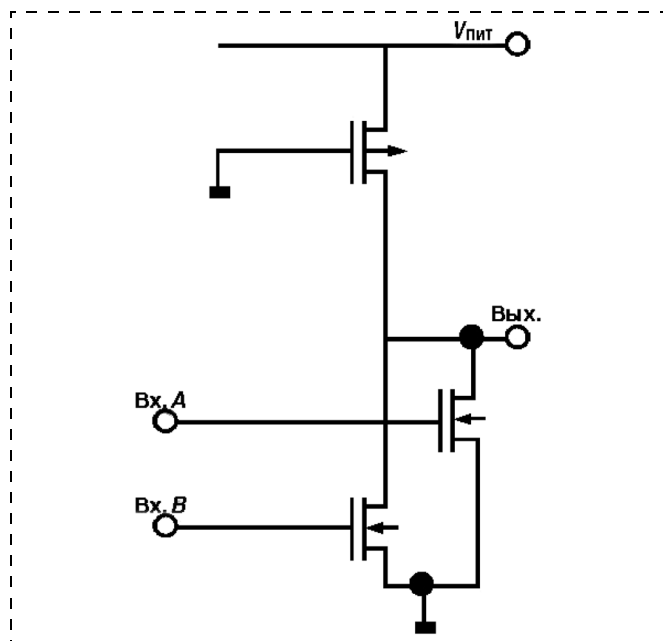


Рис. 6. Двухвходовый логический квазилМОП-элемент с функцией ИЛИ/НЕ для применения в подпороговом режиме

ственного влияния на вольт-амперные характеристики [15].

Оптимизированные логические элементы имеют в 2–4 раза меньшую задержку при одинаковом напряжении питания в сравнении с типовыми КМОП-элементами. Более показательна вычислительная производительность сложного блока (8-разрядного арифметического устройства) при заданной мощности. Схема на основе оптимизированной логики демонстрирует в подпороговом режиме в 3–4 раза более высокую производительность в сравнении с вариантом на основе типовых КМОП-элементов [13].

Вариации динамических параметров логических элементов

Вариации динамических параметров логических элементов проявляются в двух формах. Первая — это непредсказуемое, но постоянное отклонение задержки сигнала от расчетного (среднего) значения. Вторая форма — это непредсказуемое кратковременное изменение задержки сигнала без изменения условий работы ЛЭ (джиттер). Цифровые микросхемы работают в условиях, когда все динамические процессы в логических элементах можно описать как перезарядку емкостей управляемыми источниками тока. Модель для описания динамических процессов использует статические вольт-амперные характеристики транзисторов и емкости, не зависящие от рабочей частоты. В реальных схемах присутствуют внешние воздействия и помехи от соседних элементов, также влияющие на динамические параметры. Однако сейчас мы рассматриваем только вариации задержек, связанные с характеристиками самих логических элементов.

Постоянные отклонения задержек ЛЭ определяются выходным током и неопределенностью нагрузочной емкости. Как и другие статические параметры, вариации выходного тока имеют случайные и коррелированные составляющие. Коррелированные составляющие вариаций могут быть компенсированы электронными средствами, случайные составляющие необходимо учитывать в расчетах быстродействия блока. Вариации нагрузочной емкости ЛЭ связаны, в первую очередь, с отклонениями размеров проводников. Наибольший вклад в вариации дают длинные проводники. Вариации размеров проводников также коррелированы. Однако область корреляции обычно меньше максимальной длины проводников в блоке. Поэтому отклонение удельной емкости проводников от среднего значения обычно считают случайным. Для технологии с минимальным размером 130 нм среднее квадратичное отклонение емкости проводников от ожидаемого (среднего) значения составляет около 1,5 %.

Кратковременные изменения задержки в комбинационных цепях связаны с неуправляемым изменением зарядовых состояний в подложке и подзатворном оксиде. В структурах "кремний на диэлектрике" изолированный "карман" заряжается токами утечки. "Плавающий" потенциал "кармана" управляет током стока через емкость изолирующего $p-n$ -перехода. При низкочастотных измерениях вольт-амперных характеристик МОП-транзисторов наблюдается гистерезис, связанный с "плавающим" потенциалом "кармана". При работе ЛЭ на высокой частоте потенциал "кармана" не успевает существенно измениться за период тактового сигнала. Однако, если в работе блока имеются значительные перерывы, то после включения тактового сигнала задержка ЛЭ будет отличаться от среднего установившегося значения на несколько процентов. В структурах на объемном кремнии явление гистерезиса ВАХ проявляется значительно слабее. Измеренные кратковременные отклонения задержки в комбинационных цепях без воздействия помех составляют 0,1–0,2 %.

В триггерных элементах непредсказуемые вариации задержки имеют значительно большее значение. Если на входы триггера поступают сигналы данных и синхронизации, различающиеся по времени незначительно, то велика вероятность того, что в момент переключения триггера в режим хранения выходной информационный сигнал еще не сформировался. В дальнейшем выходной сигнал формируется под воздействием положительной обратной связи. На выходе триггера может установиться как высокий логический уровень, так и низкий. "Точкой баланса" называется интервал времени между установлением сигнала данных и синхросигнала, при котором действуют равные вероятности появления на выходе триггера как высокого, так и низкого логических уровней. Задержка сигнала в "точке баланса" теоретически ничем не ограничена [16]. Такое состояние триггера называется метастабиль-

ным. На практике триггер переключается в какое-либо состояние под воздействием помех и шумов в схеме. Задержка сигнала в триггере может возрасти до 15 раз [16]. Вероятность точного попадания в "точку баланса" очень мала. Однако задержка будет увеличиваться всегда, когда выходной сигнал триггера в момент переключения в режим хранения не достиг логического уровня. Это означает, что зона нестабильных задержек зависит не только от входных сигналов, но и от задержек, и от длительности фронта выходного сигнала, замкнутого в цепь обратной связи.

Экспериментальные исследования, проведенные для КМОП-элементов, изготовленных по технологии с минимальными размерами 65 нм, показали, что нестабильность в 100 пс между фронтами сигналов данных и синхронизации вблизи точки баланса приводит к нестабильности задержек выходного сигнала триггера 3–3,5 нс.

Появление в схеме метастабильных состояний — это почти всегда нарушение функционирования блока. Для снижения вероятности возникновения таких состояний следует использовать триггеры с буферами на выходе и входе данных. Временная диаграмма работы цифрового устройства формируется с учетом вариаций задержек сигналов данных и синхронизации.

При расчете защитных временных интервалов для сигналов данных и синхронизации необходимо учитывать еще и внутреннюю задержку триггера.

Заключение

Вычислительная производительность нанометровых микросхем определяется не быстродействием логических элементов, а конструктивными ограничениями физического характера: допустимой плотностью мощности, допустимой плотностью тока в проводниках, допустимым уровнем утечек в подзатворном диэлектрике и в канале МОП-транзисторов. Причем среднее быстродействие ЛЭ в условиях действия ограничений возрастает с уменьшением напряжения питания.

Повышение быстродействия и энергетической эффективности логических элементов в составе микросхемы достигается за счет более эффективного использования ограниченных ресурсов: потребляемой мощности, площади на кристалле, минимально допустимого напряжения питания. В нанометровых микросхемах используется новая ресурсосберегающая схемотехника.

Один из наиболее эффективных вариантов — это подпороговая логика. Подпороговые логические элементы характеризуются энергией переключения порядка 10^{-15} Дж, потребляемой мощностью 10^{-7} Вт,

быстродействием на уровне десятков и сотен мегагерц. Пока еще не определены конструктивные и системные принципы применения схем на основе подпороговой логики, но новые решения уже находят практическое применение.

Список литературы

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. Ч. I. М.: Техносфера, 2002. С. 95—128.
2. ITRS-2007. С. 83.
3. Liu Z., Kursun V. PMOS — Only Sleep Switch Dual-Threshold Voltage Domino Logic in Sub-65 nm CMOS Technologies // IEEE Transactions on VLSI Systems. 2007. V. 15. N12. P. 1311—1319.
4. Roy A. S. et al. Source-Drain Partitioning in MOSFET // IEEE Transactions on Electron Devices. 2007. V. 54. № 6. P. 1384—1393.
5. Денисенко В. Проблемы схемотехнического моделирования КМОП СБИС // Компоненты и технологии. 2002. № 3. С. 74—78. (Часть I); 2002. № 4. С. 100—104 (Часть II).
6. Dadgour H. F. et al. A Statistical Framework for Estimation of Full-Chip Leakage-Power Distribution Under Parameter Variations // IEEE Transactions on Electron Devices. 2007. V. 54. № 12. P. 2930—2945.
7. Sabade S. S., Walker D. M. Estimation of Fault-Free Leakage Current Using Water-Lever Spatial Information // IEEE Transactions on VLSI Systems. 2006. V. 14. N 1. P. 91—94.
8. Inohara M., Toyoshima Y. Process and Design Tradeoffs Between Minimum RC Signal Propagation Delay and Interconnect Current Density and Resistance for Deep Submicrometer ICs // IEEE Transactions on Electron Devices. 2005. V. 52. № 12. P. 2634—2638.
9. Rao R., Deogun H., Blaauw D., Sylvester D. Bus Encoding for Total Power Reduction Using a Leakage-Aware Buffer Configuration // IEEE Transactions on VLSI Systems. 2005. V. 13. № 12. P. 1376—1383.
10. Jayakumar N. et al. A Predictably Low-Leakage ASIC Design Style // IEEE Transactions on VLSI Systems. 2007. V. 15. № 3. P. 276—285.
11. Shelar R., Sapatnekar S. BDD Decomposition for Delay Oriented Pass Transistor Logic Synthesis // IEEE Transactions on VLSI Systems. 2005. V. 13. № 8. P. 957—970.
12. Zhai B., Blaauw D., Sylvester D., Flautner K. The Limit of Dynamic Voltage Scaling and Intrinsic Dynamic Voltage Scaling // IEEE Transactions on VLSI Systems. 2005. V. 13. № 11. P. 1239—1252.
13. Raychowdhury A., Paul B., Bhunia S., Roy K. Computing with Subthreshold Leakage: Device/Circuit/Architecture Co-Design for Ultra-Low-Power, Subthreshold Operation // IEEE Transactions on VLSI Systems. 2005. V. 13. № 11. P. 1213—1224.
14. Kim T., Keane J., Eom H., Kim C. Utilizing Reverse Short-Channel Effect for Optimal Subthreshold Circuit Design // IEEE Transactions on VLSI Systems. 2007. V. 15. № 7. P. 821—829.
15. Paul B., Bansal A., Roy K. Underlap DGMOS for Digital-Subthreshold Operation // IEEE Transactions on VLSI Systems. 2006. V. 53. № 4. P. 910—913.
16. Kinniment D., Dike C., Heron K., Russell G., Jakovlev A. Measuring Deep Metastability and its Effect on Synchronizes Performance // IEEE Transactions on VLSI Systems. 2007. V. 15. № 9. P. 1028—1039.

УДК 621.3.049.77.002.5; 681.787

В. С. Соболев, д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр.,
Э. Г. Косцов, д-р. физ.-мат. наук, зав. лаб.,
А. М. Щербаченко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Е. Н. Уткин, вед. инж.,
А. М. Харин, инж.
Институт автоматики и электрометрии
Сибирского отделения РАН

МИКРОВИБРАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ КАПИТАЛЬНЫХ СТРОЕНИЙ КАК ИСТОЧНИК ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ МЭМС-ГЕНЕРАТОРОВ

Представлены результаты исследований микровибраций элементов конструкции капитального здания как источников возобновляемой энергии. Измерения выполнены с помощью новой бесконтактной лазерной аппаратуры, основанной на явлениях оптической обратной связи и частотной модуляции излучения полупроводниковых лазеров. Определены средние квадратичные значения и спектральные плотности виброперемещений, виброскоростей и виброускорений для стен, потолков и оконных стекол здания. Проведены оценки энергии и мощности микровибраций.

Ключевые слова: микровибрации конструкций, энергоемкость, лазерный доплеровский виброметр, виброскорость, виброперемещение.

Введение

Одной из важнейших проблем науки и техники в настоящее время является разработка нетрадиционных, возобновляемых, экологически "чистых" источников энергии. Отдельным направлением этой проблемы является разработка микромощных электрогенераторов. Эта задача становится все более актуальной в связи с интенсивным развитием сетей автономных беспроводных датчиков с передачей полученной от них информации в точки сбора или управления. Эти сети уже широко используются для контроля температуры, освещенности, влажности, определения концентрации химически вредных веществ, контроля за формированием трещин усталости, например в самолетах, для определения местоположений людей в зданиях и т. д. Важной задачей практической реализации этого направления является автономное бесперебойное обеспечение указанных датчиков энергией. Для обеспечения работоспособности беспроводных сетей датчиков мощ-

ность должна лежать в пределах 1...100 мкВт на элемент узла сети.

Анализ показывает, что только солнечная энергия и энергия механических микроколебаний различных конструкций с амплитудой 0,1...10 мкм могут решить эту задачу. Источниками микровибраций являются разнообразные машины, технологическое оборудование и транспортные средства, ветер, микросейсмические колебания почвы и т. п. Микровибрациям подвержены конструкции производственных и жилых помещений — окна, стены, полы и потолки.

Использование излучения Солнца практически исключает возможность выработки энергии в закрытых помещениях и в любое время суток, поэтому более универсальным решением вопроса является использование энергии микровибраций. Такой подход, в котором беспроводный узел сети датчиков производил бы собственную энергию из окружающей среды, ранее практически не исследовался, и только в последние годы появились первые публикации, посвященные генерации электрической энергии с помощью микроэлектромеханических (МЭМС) элементов, создаваемых в едином технологическом цикле с изготовлением базовой микросхемы узла сети [1—7]. Исследования новых принципов построения микромеханических устройств, в том числе для создания микроэлектромеханических генераторов энергии, включены в приоритетные научные программы США, Японии и ряда стран ЕС.

Из сказанного следует, что при разработке различных конструкций микрогенераторов энергии необходима достоверная информация об основных параметрах указанных выше микровибраций: амплитуде виброперемещений и их производных — виброскорости и виброускорения. Важной задачей является также оценка распределений этих величин по частотам — спектральных плотностей.

Целью настоящей работы является исследование совокупности параметров микровибраций элементов конструкции крупных капитальных строений и определение энергоемкости этих элементов в целях решения задач получения электрической энергии для питания сети беспроводных датчиков контроля и управления.

В настоящее время для измерения параметров вибраций наибольшее применение находят пьезоэлектрические датчики, но они не удобны в применении, так как требуют специального жесткого закрепления на исследуемом объекте, изменяют

его динамические характеристики и требуют предварительной калибровки.

Ранее [8, 9] нами была разработана эффективная бесконтактная методика и аппаратура (виброметры) для исследования динамических свойств объектов, основанная на анализе доплеровского смещения частоты лазерного излучения, рассеянного их поверхностью. В отличие от стандартных, достаточно сложных и дорогих приборов аналогичного назначения, например фирмы "Политек", рассматриваемые виброметры просты по конструкции, имеют сверхвысокую чувствительность к рассеянному излучению и дают возможность работать практически с любыми диффузно отражающими объектами. Кроме того, эта аппаратура способна получать информацию от малых участков поверхности, до 10 мкм^2 .

Принцип работы лазерного виброметра с оптической обратной связью и частотной модуляцией

Новый виброметр основан на явлениях оптической обратной связи и частотной модуляции излучения полупроводникового лазера. Если ток, питающий лазер, периодически изменяется по линейному закону, то соответственно этому меняется его мощность и, главное, частота, как показано на рис. 1.

Модулированный таким образом пучок лазерного излучения направляется на исследуемый объект. Слабый рассеянный им свет поступает обратно в активную среду лазера, где многократно усиливается и интерферирует с исходным излучением. Вследствие конечного значения скорости света рассеянное излучение приходит в лазер с некоторой задержкой, поэтому на выходе встроенного в лазер контрольного

фотодиода возникает периодический электрический сигнал, частота которого оказывается пропорциональной расстоянию до объекта и доплеровскому смещению частоты рассеянного излучения, несущего информацию о параметрах движения.

С помощью системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) сигнал демодулируется, в результате чего на выходе системы ФАПЧ получается напряжение, пропорциональное виброскорости. Этот сигнал через аналого-цифровой преобразователь попадает в компьютер, содержащий набор программ для получения необходимых статистических характеристик вибраций. Компьютер в режиме *on-line* выдает реализацию виброскорости, ее среднее квадратичное значение, а также спектральные плотности виброскорости, вибро смещений и виброускорений. Функциональная схема виброметра показана на рис. 2.

Методика и результаты измерения параметров вибраций элементов производственных помещений

В качестве объекта исследований были выбраны элементы типового трехэтажного сооружения, собранного из крупных блоков и расположенного на перекрестке улиц с интенсивным автомобильным движением. Исследовались параметры вибраций оконных стекол, стен и потолков на трех этажах здания. Методика измерений состояла в том, что виброметр закрепляли на массивном штативе, который устанавливали на подоконнике при исследовании вибраций стекол и

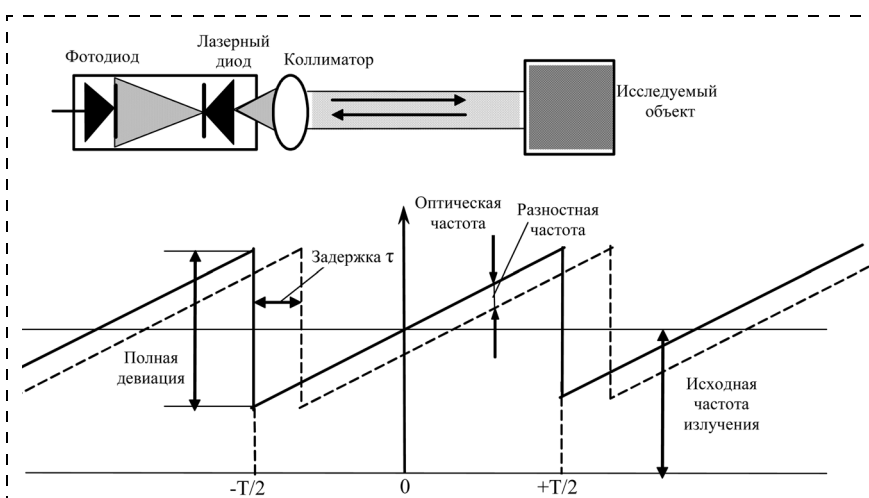


Рис. 1. Принцип работы лазерного виброметра с оптической обратной связью

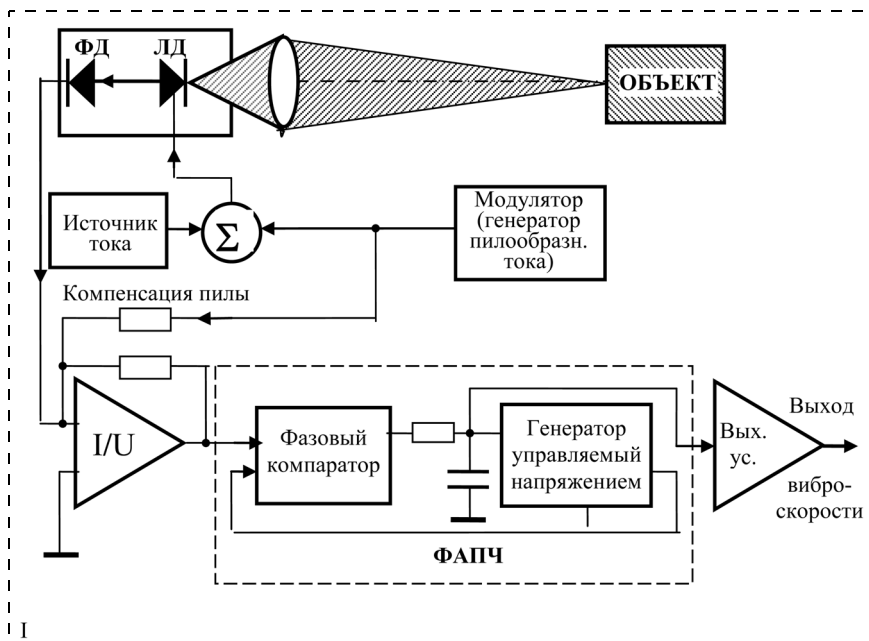


Рис. 2. Функциональная схема виброметра



Рис. 3. Измерительная установка

на полу при исследовании стен и потолков, как показано на рис. 3. Расстояние между виброметром и объектом выбиралось около 0,5 м, а лазерный пучок фокусировался на его поверхности. Период квантования сигнала составлял 1 мс, а объем выборки — 16 384 точек. Спектральные плотности вычислялись с помощью стандартных программ БПФ по 4096 точкам с разрешением 0,25 Гц. Результаты измерений сведены в таблицу, а соответствующие спектры амплитуд виброскорости, вибросмещения и виброускорения представлены на рис. 4, 5, 6.

Типичная реализация виброскорости стены при передвижении вблизи нее человека показана на

рис. 7, а виброскорости потолка третьего этажа здания при включенной (вверху) и выключенной (внизу) системе вентиляции здания, расположенной на чердаке, показаны на рис. 8. Из рисунка наглядно видно, что амплитуды колебаний при включенной системе вентиляции в несколько раз превышают последние при выключенной вентиляции.

Обсуждение результатов

1. Средние квадратичные значения виброскорости окон растут при подъеме с этажа на этаж (60,6; 106,7; 167,5 мкм/с), при этом каждое окно имеет свои индивидуальные резонансные частоты. Спектры виброско-

рости перекрывают диапазон часто от нулевых до 60...80 Гц. Наибольшее значение амплитуды виброскорости имеют на частотах 10 и 20 Гц.

2. Амплитуды вибрации стен в 3—10 раз меньше, чем окон, и практически одинаковы на всех этажах. Однако спектры амплитуд существенно отличаются. Если на первом этаже вибрации имеют сплошной спектр в диапазоне 0...100 Гц, то на втором этаже — это уже узкополосный шум в области частоты 25 Гц, а на третьем этаже — это еще более узкополосный шум на частоте 15 Гц. Заметен сильный рост вибраций, когда на полу вблизи стены перемещаются люди.

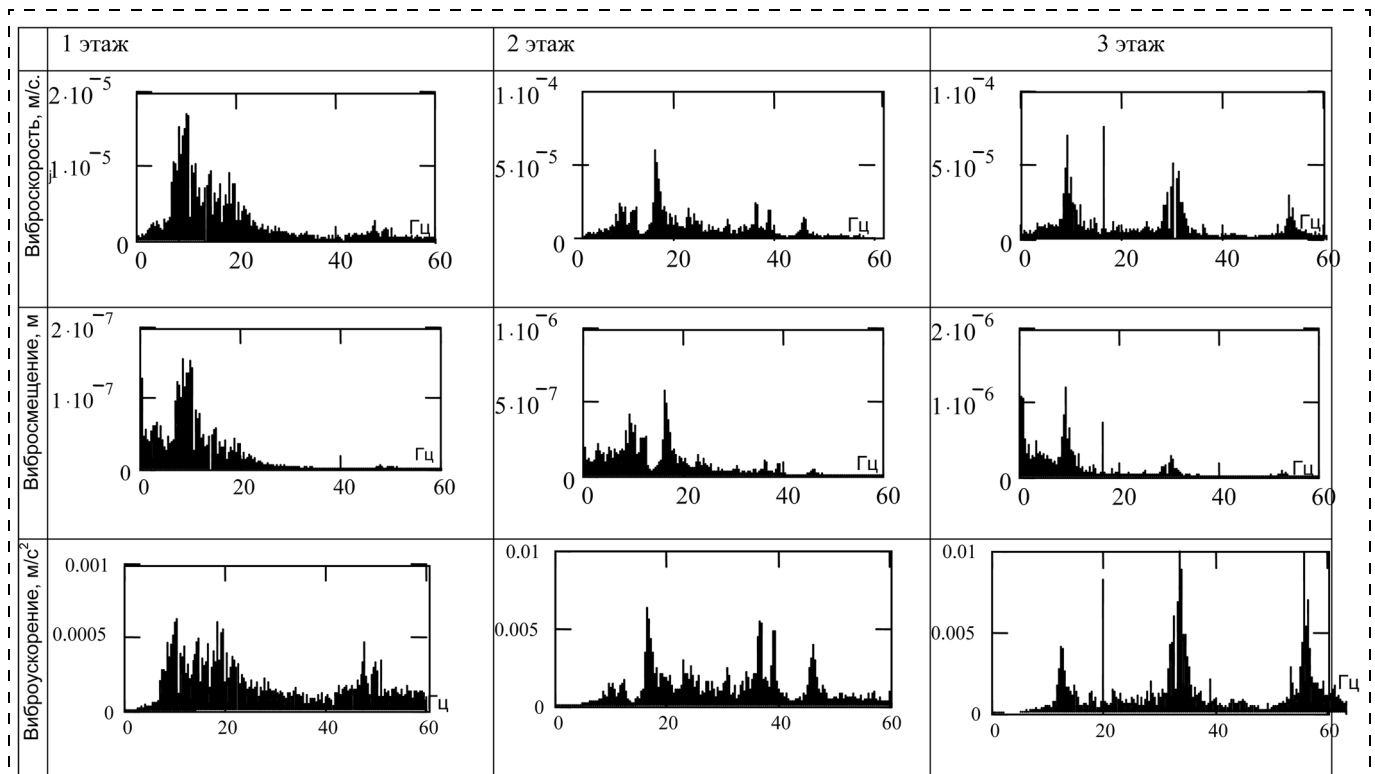


Рис. 4. Вибрации окон — спектры амплитуд виброскорости, вибросмещений и виброускорений

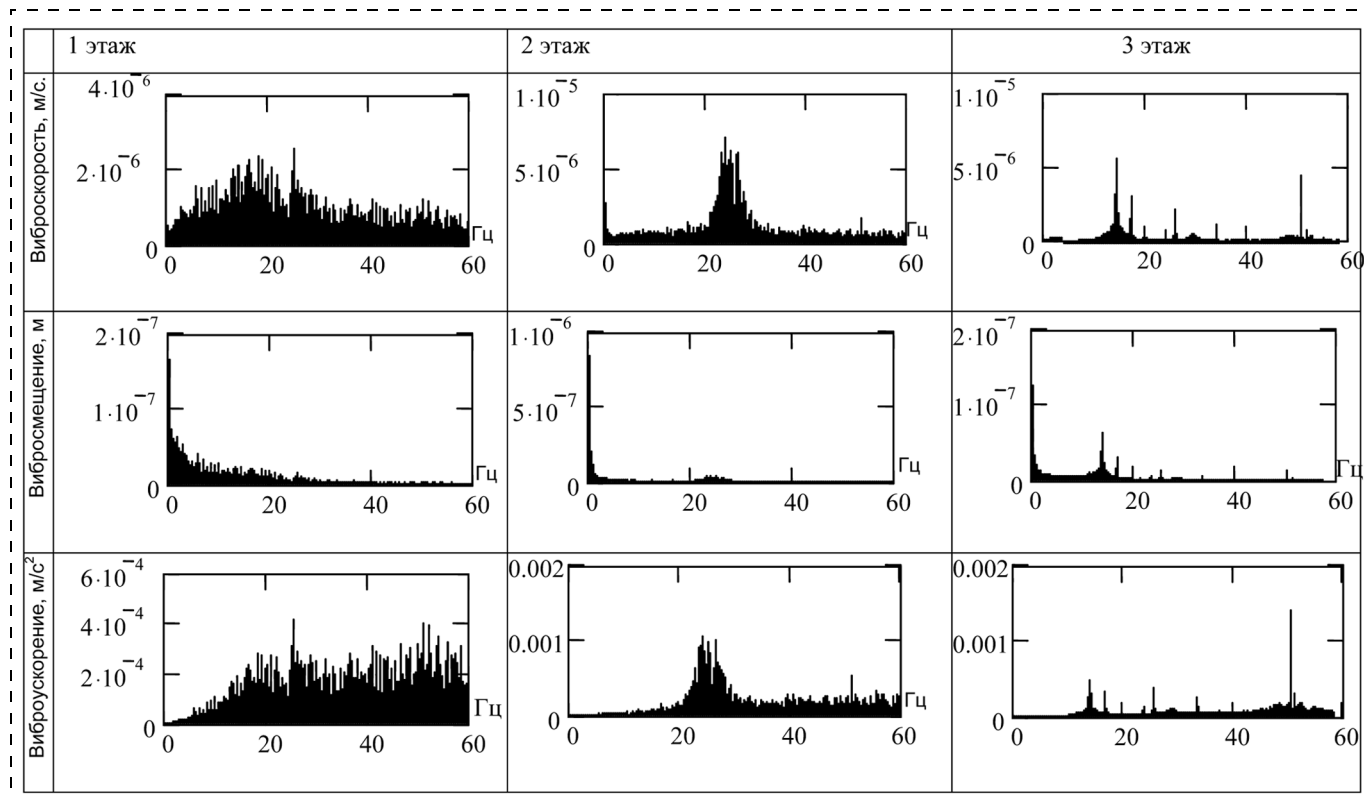


Рис. 5. Вибрации стен — спектры амплитуд виброскорости, вибросмещений и виброускорений

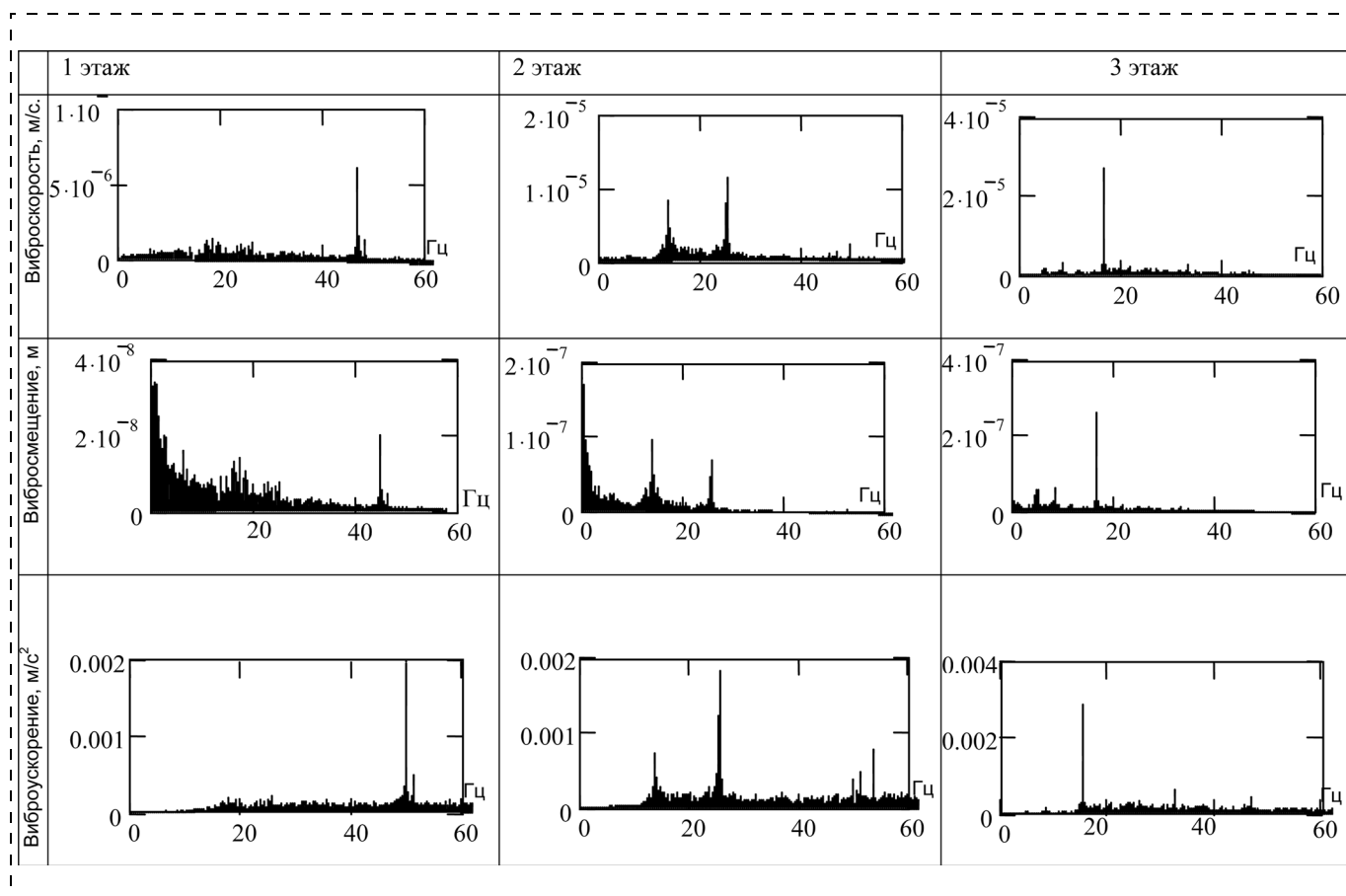


Рис. 6. Вибрации потолков — спектры амплитуд виброскорости, вибросмещений и виброускорений

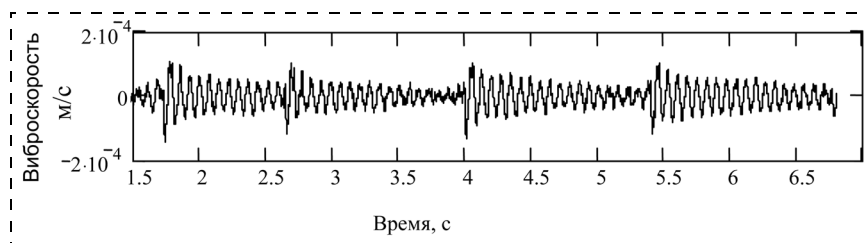


Рис. 7. Реализация виброскорости стены при движении человека

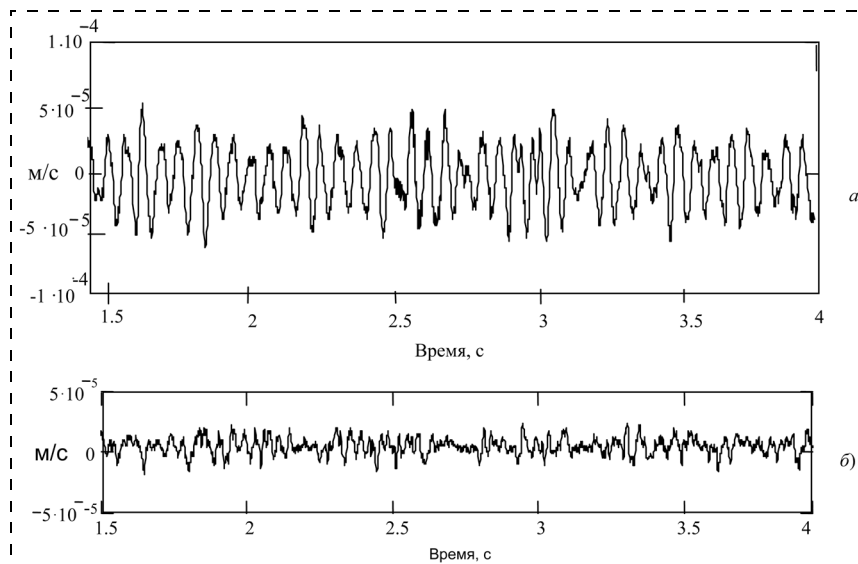


Рис. 8. Виброскорость потолка как функция времени:
а — с включенным вентилятором; б — с выключенным

3. Параметры микровибрации потолков близки к параметрам вибрации стен. Спектральные характеристики так же, как и для стен, сужаются с ростом этажности.

4. Исследования микровибраций в течение семи часов при измерении через каждый час показали, что средние квадратичные значения виброскорости потолка в течение дня изменяются от 17,2 до 63 мкм/с с осредненным значением, равным 30,1 мкм/с. Основная энергия виброскорости лежит в диапазоне 10...40 Гц, вибросмещения — от 0...30 Гц и виброускорения — 10...500 Гц. Средние квадратичные значения вибраций оконного стекла изменяются от 24 до 105 мкм/с, а усредненное значение равно 48,6 мкм/с. Основная энергия виброскорости сосредоточена в диапазоне 0...20 Гц, вибросмещения — 0...15 Гц, а виброускорения — 0...300 Гц. Наблюдаются сильные микровибрации стекол от проезжающих грузовых машин.

Ориентировочная оценка энергоемкости вибрирующих элементов конструкции зданий

Энергоемкость стен. В качестве примера приведем результаты расчета энергоемкости стены второго этажа. Из таблицы и рис. 5 следует, что среднее квадратичное значение виброскорости стены составляет 18,8 мкм/с, а частота вибраций лежит в диапазоне 25 Гц. Амплитуда вибросмещений в данном случае равна 0,17 мкм. Будем считать, что энергия

снимается с части стены площадью в 1 м^2 , имеющей массу 3000 кг. Известно [10], что полная энергия механических колебаний тела с массой m определяется как

$$\langle E_k \rangle = \frac{m S_0^2 \omega^2}{2},$$

где S_0 — амплитуда вибросмещения, а ω — частота вибраций.

Можно полагать, что устройство съема энергии отбирает лишь малую часть общей энергии микровибраций, например 5 %. В этом случае режим колебаний практически не будет нарушен, и для оценки получаемой энергии можно пользоваться формулой для E_k с множителем 0,05. Подставляя в нее исходные значения массы, частоты и амплитуды вибросмещения получим для одной из фиксированных частот значение энергии за один период колебаний, равное $52 \cdot 10^{-9}$ Дж, и соответственно, полезную мощность 1,3 мВт.

Аналогичные вычисления для потолка третьего этажа, когда среднее квадратичное значение виброскорости равно 22 мкм/с и частота вибраций составляет 18 Гц дают энергию

колебаний $71,8 \cdot 10^{-9}$ Дж, а мощность 1,29 мВт.

Для окна третьего этажа со средним квадратичным значением виброскорости 167,5 мкм/с и частотой 35 Гц энергия равна $0,061 \cdot 10^{-9}$ Дж, а мощность 0,02 мВт. При этом предполагалось, что масса 1 м^2 стекла составляет 5 кг.

Анализируя результаты этих вычислений и принимая во внимание известные данные [1—7] относительно энергетической эффективности известных или создаваемых микрогенераторов энергии, напри-

Диапазон средних квадратичных значений вибростойкости, измеренных в течение часа, и осредненные значения (мкм/с)

Этаж	Стекла окон	Стены	Потолок
1	53,3...67,8 $\sigma_{\text{оср}} = 60,6$ (пластиковые рамы)	14,3...19,2 $\sigma_{\text{оср}} = 17,3$	8,2...11,8 $\sigma_{\text{оср}} = 9,6$
2	59...191 $\sigma_{\text{оср}} = 106,7$ (пластиковые рамы)	12,3...22,4 $\sigma_{\text{оср}} = 18,8$	10,7...15,1 $\sigma_{\text{оср}} = 16,5$
3	126,9...221,7 $\sigma_{\text{оср}} = 167,5$ (деревянные рамы)	12,9...14,8 $\sigma_{\text{оср}} = 13,6$	*а) 7,3...8,6 $\sigma_{\text{оср}} = 7,7$ *б) 19,7...24,1 $\sigma_{\text{оср}} = 22$

* Примечание. На чердаке 3-го этажа установлена мощная вентиляционная система, работа которой существенно влияет на вибрации потолка 3-го этажа. Значения σ даны: а) при выключенной системе вентиляции, б) при включенной.

мер электростатических, можно полагать, что от каждого из них можно получать энергию с мощностью порядка 1 мкВт, а при использовании всего спектра частот микроколебаний до 10 мкВт и более.

Можно отметить, что энергия микровибраций оконных стекол вследствие их малой массы значительно меньше, чем у стен и потолков, хотя амплитуды вибраций стекол оказались на порядок выше.

Заключение

Результаты исследований характеристик микровибраций элементов типичного капитального здания показали, что вибрации, как функции времени, представляют собой нестационарные случайные широкополосные процессы. Их средние квадратичные значения в течение коротких промежутков времени изменяются в несколько раз. Спектры амплитуд вибросмещений занимают область частот от 0 до 20 Гц, виброскоростей — от 10 до 25 Гц, а виброускорений — от 10 до 300 Гц. Максимальные значения вибросмещений достигают десятков микрометров, виброскоростей — сотен микрометров в секунду и виброускорений — 10^4 мкм/с².

Оценка энергоемкости элементов конструкций здания показала, что при рациональном построении электрогенераторов, способных отбирать до 5 % энергии микровибраций стен и потолков, можно получить от них энергию с мощностью порядка 1...10 мкВт.

Список литературы

1. Багинский И. Л., Косцов Э. Г. Анализ возможности создания микроэлектронного электростатического генератора энергии // Автометрия. — 2002. Т. 38. — № 1. — С. 107—122.
2. Багинский И. Л., Косцов Э. Г. Микроэлектронные высокоэнергоемкие генераторы энергии // Микросистемная техника. 2002. № 6. С. 24—28.
3. Jeon Y. B., Sood R., Jeong J.-H., Kim S.-G. MEMS power generator with transverse mode thin film PZT // Sensors and Actuators A. 2005. N 122. P. 16—22.
4. Lefeuve E., Badel A., Richard C. et al. A comparison between several vibrationpowered piezoelectric generators for standalone systems // Sensors and Actuators A. 2006. N 126. P. 405—416.
5. Meninger S., Mur-Miranda J. O., Amirtharajah R. et al. Vibration-to-electric energy conversion // IEEE Trans. VLSI Syst. 2001. V. 9. P. 64—76.
6. Sterken T., Fiorini P., Puers R. Motion-based generators for industrial applications // Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MRMS & MOEMS. 2006. 26—28 April, Stresa, Italy.
7. Драгунов В. П., Косцов Э. Г. МЭМ электростатический генератор энергии // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 11. С. 47—53.
8. Соболев В. С., Кашеева Г. А., Харин А. М. Доплеровский скоростемер-дальномер-виброметр на основе частотной модуляции лазерного излучения в режиме оптической обратной связи // Труды IX Международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков" (ОМИП-2007) (Москва, 26—29 июня 2007) — С. 80—85.
9. Соболев В. С., Кашеева Г. А. Активная лазерная интерферометрия с частотной модуляцией // Автометрия. 2008. Т. 44. № 6. С. 14—21.
10. Карлов Н. В., Кириченко Н. А. Колебания, волны, структуры. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 496 с.

УДК 623.544

ВОЗМОЖНОСТИ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ*

Пер. с англ. Е. А. Вopilкина,
Институт физики микроструктур РАН,
Н. Новгород

Рассмотрены возможности использования НЭМС/МЭМС акселерометров и наногироскопов для различных применений в МО США. Проанализированы преимущества, которые даст применение таких устройств в высокоточных боеприпасах, системах стабилизации платформ в авиации и в персональных/бортовых системах навигации для пехоты и машин.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы, наногироскоп, акселерометр.

1. Высокоточные боеприпасы

Интегрирование инерционных измерительных МЭМС-устройств в обычные боеприпасы для уменьшения рассеяния снарядов по точечным целям.

* Текст взят из брошюры "Microelectromechanical Systems Opportunities" (nn. 1—3).

Большинство американских систем оружия (артиллерия, минометы, танки) используют неуправляемые боеприпасы. В результате для уничтожения цели требуется множество снарядов. Это приводит к высокому темпу потребления боеприпасов и большой логистической нагрузке на службы снабжения. Используя инерционные МЭМС-системы управления в боеприпасах, американские войска будут требовать меньше снарядов для поражения цели. В сочетании со слежением с помощью системы глобального позиционирования (GPS) эта технология обеспечит возможность точного удара без дорогостоящего блока управления или целеуказателя, обеспечивая высокую защиту от промахов для различных систем доставки.

Использование технологии МЭМС-акселерометра с широким динамическим диапазоном. Инерциально управляемый снаряд имеет повышенную точность и по оценкам снижает потребность в снарядах в 10 раз.

Современный анализ показал, что типичное для неуправляемой артиллерии рассеяние в 250 м СЕР (circular error probable) требует 110 снарядов для достижения 50 %-ной вероятности попадания в цель (см. таблицу). Инерциально управляемые

Расход снарядов после корректировки

Тип снаряда	Вероятность попадания	
	50 %	90 %
Неуправляемые	110	364
Инерциально управляемые	9	30

снаряды с 64-метровым СЕР потребуют только девять выстрелов для реализации того же эффекта. Это десятикратное уменьшение артогня позволит американским войскам развить гораздо более высокую летальность в сочетании с более быстрым поражением целей и большей мобильностью и устойчивостью и меньшей нагрузкой на снабжение. Улучшенная точность также приведет к снижению побочных потерь и уменьшит риск дружественного огня.

Технологические решения. Испытания показали, что МЭМС-элементы инерциального управления могут выдерживать перегрузки в 30 000 g, испытываемые при выстреле обычным крупнокалиберным снарядом, и вплоть до уровня 100 000 g для бронебойных снарядов танковых пушек. Эта высокая устойчивость к ускорениям, сочетающаяся с малой потребляемой мощностью, малой массой и объемом, дает возможность использовать инерциальное управление для боеприпасов, гаубиц, минометов и реактивных систем, позво-

ляя осуществлять быструю модернизацию. Большинство существующих запасов артскладов можно быстро совершенствовать. Так как система управления является сильной модернизацией боеприпасов, существующая система взрывателей/предохранителей должна быть также переделана на меньшие объемы.

Оценка рынка МО США для "умных" боеприпасов составляет 16 млн шт. с ежегодной потребностью в мирное время в 250 000—500 000 шт.

2. Стабилизация платформы

Модернизация или замена на новую продукцию обычных акселерометров и гироскопов с использованием МЭМС-устройств на различных платформах МО США.

На всех платформах МО США необходимо согласование между различными подсистемами для оптимизации рабочих характеристик всей системы. В результате конструкторы пытаются максимизировать заряд/дальность, которые может обеспечить платформа. Любая масса и объем электроники/конструкции, которые могут быть уменьшены, позволяют конструкторам увеличить заряд или дальность. В тактической перспективе увеличенная дальность может привести к тому, что командиры скорее используют крылатую ракету по удаленной цели, чем будут рисковать самолетом с экипажем. Уве-



Инерциальное измерительное устройство



Масса: 1587.5 г

Размеры: 15 x 8 x 5 см

Мощность: 35 Вт

Живучесть: 35 g's

Цена: 20,000\$

Масса: 10 г

Размеры: 2x 2 x 0.5 см

Мощность: 1 мВт

Живучесть: 100 Kg's

Цена: 500\$

Рис. 1

личный боезаряд может уменьшить число ракет, необходимых для уничтожения уединенной цели, позволяя атаковать больше целей.

Ракета за 30 000\$ обычно содержит обычных акселерометров и гироскопов на 1000\$. Их можно прямо на этой платформе заменить на эквивалентное МЭМС-устройство за 20\$. Это дает 50-кратное снижение цены подсистемы и потенциально большое уменьшение требований к пространству, массе и энергии. Почти любая система МО США, где сейчас есть гироскоп или акселерометр, является кандидатом на замену на МЭМС-устройство. Это покрывает широкий спектр платформ, включая самолеты, ракеты, танки и корабли. МЭМС-гироскопы могут быть использованы в авионике, автопилотах, пушечной подвеске и стабилизаторах (танковая башня), кораблях и антеннах РЛС, стабилизаторах кресел-катапульти в самолетах.

На рис. 1 приведено сравнение обычных и инерциальных измерительных МЭМС-устройств [19].

Технологические решения. Чтобы финансово заинтересовать рынок в дешевом товаре, один производитель должен захватить много разных приложений. Рынок модернизации требует множества аттестаций и сертификаций различных систем. Быстрое заключение сделки производителем — это ключ к быстрому применению в МО США. Типичные системы стабилизации платформы требуют трех гироскопов и трех акселерометров. Главное техническое решение — это разработка надежного МЭМС-гироскопа. Хотя МЭМС-акселерометры

уже относительно отработаны, нынешние МЭМС-гироскопы технически сырые и ненадежные.

3. Личный состав/навигация транспорта

Использование МЭМС-гироскопов и акселерометров, интегрированных в инерциальную навигационную систему на одной микросхеме в дополнение к GPS в личных и бортовых навигационных системах.

Точное знание местоположения позиции крайне важно для эффективных совместных и комбинированных военных действий. Современная выдача GPS-приемников ротам и даже взводам и отделениям значительно усилила способность командиров контролировать движение больших групп солдат и снаряжения. Однако GPS-приемники стоят несколько сотен долларов, и жизнь их аккумуляторов измеряется часами. Даже если ограничения по цене и питанию для приемников будут преодолены, GPS — не панацея для решения всех навигационных проблем военных. GPS-приемники должны непосредственно видеть четыре спутника для 3-координатного позиционирования. Даже если четыре спутника видны, ошибки определения позиции появляются в зависимости от положения этих спутников, что делает полезным видение более чем четырех спутников для определения одной позиции. Войска, действующие в густых лесах, городских зонах и в строениях, часто не могут получить данные о положении в реальном вре-

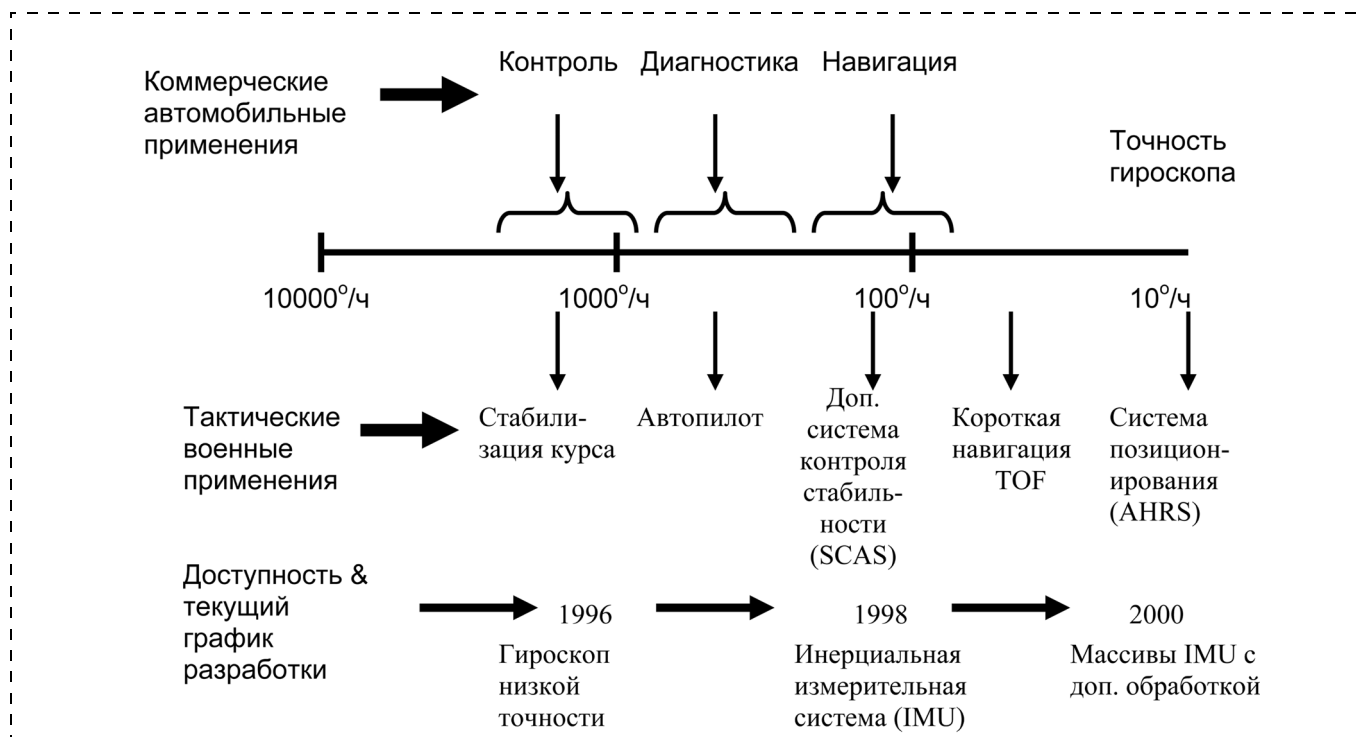


Рис. 2

мени без риска быть обнаруженными вражескими наблюдателями и быть обстрелянными.

МЭМС-технология может быть использована для разработки недорогого, маленького, мало-мощного (микроватты), личного навигационного устройства, которое может дополнить GPS, определяя индивидуальное положение по первоначальному GPS-реперу. Эта начальная реперная точка может периодически вводиться со взводного или ротного GPS-приемника в зависимости от скорости дрейфа гироскопа при вычислении пути. Это МЭМС-устройство может также непрерывно предоставлять навигационные данные в те периоды, когда сигнал GPS будет подавлен средствами РЭБ. МЭМС-устройства персональной навигации сейчас разрабатываются программой "Gen 2 Soldier Program" для выполнения функций запасной навигации. Для реализации этой возможности нужно разработать новые МЭМС-устройства.

В зависимости от проектной стоимости прибора и свойств его дисплея и коммуникатора одно устройство на бойца будет стоить 50\$ за штуку. Обеспечение функции счисления пути в дополнение к современным возможностям GPS в отделении, взводе или роте будет приемлемо при цене 300\$ за штуку. Объем этого рынка оценивается в 380 000 бойцов в 38 000 отделениях.

Технологические решения. МЭМС-гироскопы в настоящее время не доработаны и требуют улучшения стабильности на несколько порядков выше уровня существующих МЭМС-гироскопов. Скорость дрейфа гироскопа должна быть достаточно низкой для того, чтобы сделать устройство применимым в течение минимум 2—4 ч между проверками положения по данным GPS. Рис. 2 показывает требования к характеристикам гироскопа и требования военных к соответствующим коммерческим продуктам.

Существует мощная стратегия средств двойного назначения, которую следует разработать для инерциальных измерительных устройств, необходимых для "умных" боеприпасов, оружейных взрывателей-предохранителей, стабилизации платформ и личных/бортовых систем навигации. Автомобильная индустрия является мощным коммерческим локомотивом для развития инерциальных измерительных МЭМС-систем. Существует большое перекрытие областей требований ТТХ военных и коммерческих инерциальных измерительных устройств (IMU). Инвестиции МО США в разработку, производство и модернизацию создаст гибкую

базу коммерческого производства, которое должно быть направлено на создание специфических военных инерциальных измерительных устройств. Природа процесса производства МЭМС обеспечивает получение относительно малогабаритных оборонных продуктов по низкой цене, обеспеченной большими объемами коммерческих рынков.

4. Наногирискоскоп — возможная реализация

Гироскоп может быть выполнен на основе нескольких МЭМС/НЭМС акселерометров, использующих туннельный или эмиссионный ток в нанометровом зазоре между электродами. Разрешение туннельных акселерометров достигает $2 \cdot 10^{-8} \text{ г/Гц}^{1/2}$ [1]. Для измерения линейных ускорений и инерциальной навигации достаточно иметь 3-координатный НЭМС-акселерометр. Интегрирование сигнала ускорений по трем координатам даст искомое смещение. При необходимости измерения угловых ускорений требуется по два акселерометра разнесенных на некоторое расстояние для каждой из трех возможных осей вращения. Средний по паре акселерометров сигнал даст линейное ускорение, а разностный — угловое. Интегрирование углового ускорения по времени даст искомое отклонение от первоначального курса.

На сегодняшний день в ИФМ РАН имеется опыт создания туннельно-эмиссионных акселерометров с разрешением до $10^{-6} \text{ г/Гц}^{1/2}$ [2, 3] и ведутся работы по созданию МЭМС/НЭМС датчиков с помощью пленарных технологий из монокристаллических и поликристаллических материалов [4, 5].

Список литературы

1. Liu C.-H. and Kenny T. W. A High-Precision, Wide-Bandwidth Micromachined Tunneling Accelerometer // J. of MEMS. 2001. Vol. 10. N 3. P. 425—433.
2. Шашкин В. И., Востоков Н. В., Вopilкин Е. А., Климов А. Ю., Волгунов Д. Г., Рогов В. В., Лазарев С. Г. О возможных конструкциях датчиков туннельно-эмиссионных акселерометров // Микросистемная техника. 2003. № 5. С. 3—6.
3. Shashkin V. I., Vostokov N. V., Vopilkin E. A., Klimov A. Yu., Volgunov D. G., Rogov V. V., Lazarev S. G. High-Sensitivity Accelerometer Based on Cold Emission Principle // IEEE Sensors Journal, april 2004.
4. Шашкин В. И., Вopilкин Е. А., Востоков Н. В., Климов А. Ю., Рогов В. В., Гусев С. А., Шулешова И. Ю. Изготовление микроконсольей и управление их изгибом // Микросистемная техника. 2004. № 9. С. 22—26.
5. Shashkin V. I., Vostokov N. V., Vopilkin E. A., Klimov A. Yu., Daniltsev V. M., Rogov V. V., Lazarev S. G. Fabrication and characterization of stress-free microbeams for MEMS applications // Phys. Stat. Sol. (c) 2. 2005. N 4. P. 1433—1437.

Л. С. Раткин, канд. техн. наук
rathkeen@bk.ru

ИТОГИ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

С 28 мая по 2 июня 2008 года в российской столице проходило Общее собрание РАН, на котором, в частности, были заслушаны отчетные доклады о работе Президиума и Отделений РАН, а также были проведены выборы новых членов академии.

Свидетельством поддержки руководством страны инновационных инициатив ведущих российских ученых и российской науки в целом явилось участие в Общем собрании РАН премьер-министра В. В. Путина, вице-премьера С. Б. Иванова, министра образования и науки А. А. Фурсенко и Председателя Совета Федерации С. М. Миронова. Выступление Председателя Правительства России было посвящено проблемам оценки эффективности капиталовложений в научные исследования и государственной поддержки наукоемких технологий, интеграции академической и вузовской науки, созданию интеллектуальной высокотехнологичной продукции и стимулированию развития в России научно-образовательных центров мирового уровня. С трибуны академии премьер-министр озвучил обсуждавшуюся на заседании Президиума Правительства в контексте вопросов налоговой политики инициативу по реализации с 2009 года дополнительных мер по поддержке НИОКР по приоритетным направлениям, предполагающую увеличение в полтора раза объем затрат, которые можно списывать на себестоимость, даже в случае их отрицательного результата.

В отчетном докладе Президиума РАН были представлены научные достижения академии, в частности, по Отделению нанотехнологий и информационных технологий (ОНИТ). Созданное в Институте проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН программное обеспечение для минимизации возможных искажений в рельефе оттиска, вызванных неравномерной деформацией штампа и подложки, предназначено для моделирования на ПЭВМ процесса в печатывания штампов сантиметровой площади с нанораз-

мерными компонентами и является не имеющим аналогов комплексом для оптимизации наноимпринтинга. В Физико-технологическом институте РАН проведены исследования когерентной квантовой динамики электронов в наноструктуре, представленной имплантированной в полупроводник парой однократно ионизированных донорских атомов. Воздействие на структуру электростатическими и оптическими импульсами для управления эволюцией вектора состояния электрона позволит реализовать квантовые операции PHASE и NOT для построения произвольного однокубитного квантового вентиля. Проведенное в Московском государственном институте электронной техники (МГИЭТ) изучение макетов нанотранзисторов, нановаристоров и электронных приборов на основе углеродных пленок нанометровой толщины, углеродных токовыводящих электродов и нанотрубок позволило исследовать перспективы развития экоэлектроники при создании эксплуатируемых в экстремальных условиях радиационно- и термостойких устройств.

Также были представлены технологии высокопроизводительных вычислений с использованием суперкомпьютеров "СКИФ" второй серии в GRID-системах. Изучение принципов подключения кластерных установок к пилотному сегменту распределенной вычислительной GRID-системы "СКИФ" под управлением ОС "Windows Compute Cluster Server" в Институте программных систем РАН позволило разработать средства создания web-сервисов на библиотечной платформе T-Slim и на базе реализованных на языке T++ приложений.

Созданная Институтом проблем информатики РАН совместно с МГИЭТ функционально полная библиотека самосинхронных элементов на основе серий 5503, 5507, 5508 и 5509, использующих российские базовые матричные кристаллы, позволяет разрабатывать схемы высоконадежных отказоустойчивых вычислительных систем и средств. Для решения вычислительно-трудоемких задач в НИИ многопроцессорных вычислительных систем при Таганрогском государственном радиотехническом университете (ТГРТУ) создан работающий под управлением операционной системы (ОС) Linux опытный образец модульно-наращиваемой рекон-

фигурируемой вычислительной системы производительностью 50—75 Гфлопс [1]. Следует отметить, что в вошедшем в состав Южного федерального университета ТГРТУ в 2008 году открылся Научно-образовательный центр (НОЦ) "Нанотехнологии", являющийся региональным межведомственным центром коллективного пользования с лабораториями микро- и наносистем, зондовых технологий и материаловедения. Общая стоимость НОЦ, созданного за счет средств ФЦП и включающего оборудование, в том числе для диффузионного легирования и импульсного фотонного отжига, термического окисления полупроводников и электронно-лучевой обработки, составляет около 400 млн руб. На установленном в НОЦ и запущенном в производство нанотехнологическом комплексе нового поколения НаноФаб-100 с кластерной компоновкой технологических модулей, разработанном фирмой "Нанотехнология МДТ", планируется реализация ряда научных проектов, в частности, связанных с управляемым процессом роста нанотрубок для сверхпрочных и сверхлегких материалов и повышением качества функционирования волоконно-оптических систем, применяемых для доставки к конкретной точке поверхности лазерного импульса, что поможет снизить стоимость современных солнечных батарей [2].

Основанный на частичном сканировании кореллограмм макет быстродействующего оптического нанопрофилометра с большим поперечным полем измерения и разрешением по глубине для бесконтактных измерений нанорельефа поверхности не ниже 1 нм создан впервые в России в Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения СО РАН. Разработанный макет многоцелевого Фурье-радиоспектрометра со спектральным диапазоном $400\text{--}6000\text{ см}^{-1}$ применяется для непрерывного измерения температурного и влажностного профилей верхних слоев атмосферы и обнаружения ряда молекулярных составляющих методами спектрального зондирования атмосферы спутниковыми спектрорадиометрическими системами.

В ходе изучения резонансных магнитооптических эффектов в Институте систем обработки изображений РАН при пропускании через состоящие из намагниченного диэлектрического слоя и двумерной золотой субволновой дифракционной решетки (СДР) двух- или трехслойные структуры плоской ЭМ волны были обнаружены резонансы функций пропускания и резонансы углов Фарадея и Керра в СДР. В частности, зафиксировано семнадцатикратное увеличение поворота вектора по-

ляризации волны при пропускании структуры с толщиной, сопоставимой с длиной волны.

В Институте радиотехники и электроники (ИРЭ) РАН, отметившем в сентябре 55-летие основания ИРЭ РАН и столетие одного из основоположников методов цифровой обработки сигналов и электронной криптографии, основателя нового направления в освоении космоса — планетной радиолокации — академика В. А. Котельникова, совместно с рядом ведомств и заинтересованных организаций подготовлены предложения по нелицензируемому использованию сверхширокополосных СВЧ сигналов на территории РФ. Разработанная спектральная маска для нелицензируемых средств беспроводной связи (СБС) с перспективой создания отечественных низкоскоростных (до 1 Мбит/с) и среднескоростных (1—50 Мбит/с) СБС будет способствовать переходу отечественной информационной инфраструктуры на новый уровень функционирования.

Изучение плазмонных трехмерных наноструктур с нанесенной рельефно-фазовой структурой на поверхность плазмонного слоя, применяемых для создания датчиков определения наноконцентраций химических реагентов в газовой и жидкой средах, проведено в НИИ системных исследований РАН. Созданная в Институте проблем лазерных и информационных технологий РАН методика формирования оптических шин для передачи сигналов по полимерным волноводам между СБИС на печатных платах уже в ходе первых экспериментов на полимерной оптической шине позволила достичь скорости передачи данных 10 Гбит/с по волноводу длиной 1 дм [1, 3].

В ходе состоявшегося голосования на Общем собрании РАН действительными членами РАН по Отделению нанотехнологий и информационных технологий (ОНИТ) избраны:

- академик РАСХН, директор Центра "Биоинженерия" РАН К. Г. Скрыбин;
- директор Института проблем информатики РАН И. А. Соколов;
- ректор МГТУ имени Н. Э. Баумана И. Б. Федоров;
- директор Института проблем лазерных и информационных технологий РАН В. Я. Панченко;
- генеральный директор ОАО "НИИ молекулярной электроники и завод "Микрон" Г. Я. Красников;
- директор Медицинского центра ЦБ РФ Г. И. Назаренко;
- и. о. директора Института цитологии и генетики СО РАН Н. А. Колчанов;

- директор Института физики металлов УрО РАН В. В. Устинов.

Академиками по Отделению физических наук (ОФН) РАН по специальности "Физика наноструктур" стали:

- директор Института физики микроструктур РАН С. В. Гапонов;
- директор Отделения физики твердого тела Физического института имени П. Н. Лебедева Ю. В. Копаев.

По Отделению химии и наук о материалах (ОХНМ) РАН по специальности "Наноматериалы" академиком избран заведующий кафедрой Воронежского государственного университета В. М. Иевлев, по Отделению биологических наук (ОБН) РАН по специальности "Нанотехнологии, молекулярная биофизика" — директор Института молекулярной биологии имени В. А. Энгельгардта А. А. Макаров.

Членами-корреспондентами РАН в ОНИТ избраны:

- заведующий лабораторией Института биоорганической химии имени академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН С. М. Деев;
- ректор Вятского государственного университета Е. В. Пименов;
- руководитель отдела НИИ нормальной физиологии РАМН К. В. Анохин;
- руководитель отдела молекулярно-генетических технологий Санкт-Петербургского государственного медицинского университета имени академика И. П. Павлова М. В. Дубина;
- заместитель директора Института проблем проектирования в микроэлектронике РАН С. Г. Русаков;
- заведующие кафедрами МГТУ имени Н. Э. Баумана В. А. Шахнов и О. С. Нарайкин;
- заместитель директора Научного центра лазерных материалов и технологий Института общей физики РАН Т. Т. Басиев;
- заведующий лабораторией Центра фотохимии РАН С. П. Громов;
- заведующий лабораторией Института физики твердого тела РАН М. И. Карпов;
- первый проректор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета А. И. Рудской.

Также членами-корреспондентами ОНИТ РАН стали:

- директор Института когнитивных исследований ФГУ "РНЦ "Курчатовский институт" Б. М. Величковский;
- заведующий кафедрой МГИЭТ А. А. Горбачевич;

- и. о. ректора Академического физико-технологического университета РАН А. Е. Жуков;
- директор ГНЦ "НПК "Технологический центр" МГИЭТ А. Н. Сауров;
- заведующий лабораторией Физико-технического института имени А. Ф. Иоффе РАН С. Г. Конников;
- исполнительный директор НТК "Курчатовский центр синхротронного излучения и нанотехнологий" ФГУ "РНЦ" Курчатовский институт" В. В. Квардаков;
- директор Института проблем передачи информации имени А. А. Харкевича РАН А. П. Кулешов;
- депутат ГД ФС РФ Г. К. Сафаралиев;
- генеральный директор ФГУП "НПО "Орион" А. М. Филачев;
- заместители директора Института физики полупроводников СО РАН А. В. Латышев и А. В. Двуреченский;
- директор Института динамики систем и теории управления СО РАН И. В. Бычков.

В ОФН РАН по специальности "Физика наноструктур" членами-корреспондентами были избраны директор Центра физики наногетероструктур Физико-технического института имени А. Ф. Иоффе РАН П. С. Копьев и заместитель директора отделения Физического института имени П. Н. Лебедева Н. Н. Сибельдин, в ОФН УрО РАН по специальности "Нанотехнологии" — заместитель директора Института электрофизики УрО РАН В. В. Иванов.

По ОХНМ РАН членами-корреспондентами стали:

- заведующий лабораторией Института металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН М. И. Алымов (специальность "Наноматериалы");
- главный научный сотрудник Института физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина И. Г. Тананаев (специальность "Наноматериалы");
- заведующий лабораторией Института органической химии имени Н. Д. Зелинского РАН В. П. Анаников (специальность "Физическая химия наноразмерных структур");
- заведующий лабораторией Института химии ДВО РАН В. А. Авраменко (специальность "Нанотехнологии, функциональные материалы");
- заместитель директора Института катализа имени Г. К. Борескова СО РАН В. И. Бухтияров (специальность "Нанотехнологии, наноматериалы").

По Отделению энергетики, машиностроения, механики и процессов управления членом-корреспондентом избран заведующий лабораторией Института проблем механики РАН Р. В. Гольдштейн (специальность "Наномеханика и прочность материалов"), в ОБН членом-корреспондентом избрана заведующая лабораторией Института химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН О. И. Лаврик (специальность "Нанотехнологии, биохимия").

Иностранцами членами РАН по специальности "Нанодиагностика и физика наноструктур" в ОНИТ избран профессор физики Калифорнийского университета Норман Ростокер (США), по специальности "Биофизика, нанобиотехнологии" в ОБН — директор Института нанобиотехнологии Генуэзского университета Клаудио Николини (Италия).

Выводы

- ♦ Одним из главных итогов Общего собрания РАН является стабильная государственная поддержка органами законодательной и исполнительной власти России отечественной фундаментальной и прикладной науки. Принятие новых нормативно-правовых документов (НПД) в научной сфере и повышение финансирования РАН должно содействовать росту числа инновационных разработок в подведомственных РАН институтах, вузах и научных центрах и возможной коммерциализации результатов интеллектуальной деятельности для их вовлечения в хозяйственный оборот.
- ♦ Инновационный вектор развития российской экономики предполагает непрерывный рост

объемов частных инвестиций и государственных капиталовложений в выпуск новых наноматериалов и производство нанотехнологического оборудования. Представленные в Отчете РАН разработки свидетельствуют о качественном росте российских разработок в сфере нанотехнологий, инвестирование в которые необходимо законодательно стимулировать посредством внесения изменения в НПД, в частности, введением налоговых льгот и сниженных таможенных пошлин.

- ♦ Итогом преобразования Отделения информационных технологий и вычислительных систем в Отделение нанотехнологий и информационных технологий РАН явилось увеличение числа вакансий и соответственно наибольшее число избранных в мае членами РАН ученых (свыше 40), работающих в наноиндустриальной сфере. Представляется целесообразным дальнейшее расширение нанотехнологической тематики в академических институтах и вузах с созданием соответствующих кафедр и лабораторий на основе коллективов высококвалифицированных специалистов.

Список литературы

1. **Отчетный доклад** Президиума Российской академии наук. Научные достижения Российской академии наук в 2007 году. М.: Наука, 2008.
2. **Доступ к солнцу** // Еженедельная газета научного общества "Поиск". 2008. № 39 (1009), 26 сентября. С. 8.
3. **Отчет** о деятельности Российской академии наук в 2007 году. Основные результаты в области естественных, технических, гуманитарных и общественных наук. М.: Наука, 2008.

- Krasnikov G. Ya., Zaitcev N. A.** *Nanoelectronics: Status, Challenges and Prospects* 2
In the given work the basic problems modern nanoelectronics are resulted and ways of their decision are indicated. The basic concepts of nanomaterials and nanoelectronic devices are resulted.
Keywords: nanoelectronics, nanomaterials, nanotransistor, CMOS, High-k.
- Potapov A. A.** *Atom: the Key to Creation of Bases Nanotechnology* 5
It is shown fundamental a role of atom in becoming mechanosynthesis as leading direction nanotechnology. The new approach to a structure of theoretical bases nanotechnology is offered.
Keywords: atom, model, theory, project, nanosystems, structure, inter-atomic and inter-molecular interaction, nanotechnology.
- Lougin A. N.** *Nano-Effects of Three-Dimensional Non-Uniformity of Current Distribution and Power Dissipation in Thin Film Contact* 13
It was shown that nano-effects of three-dimensional non-uniformity of current distribution and power dissipation are watched in resistive layer on the contact boundary. The peak values of current and power dissipation exceed corresponding values of these parameters with their uniform distribution by 3—10 times at length of 0,01 μm away from the contact boundary.
Keywords: resistor, thin film contact, resistance, current density, power dissipation, potential difference, distribution, non-uniformity, nano-effect.
- Markelov A. S., Trushin V. N., Chuprunov E. V.** *Features of Formation of Contrast of X-Ray Images at Diffraction of X-Rays From the Surface of the Crystals Having Columned Structure* 16
It is investigated features of formation of contrast of X-ray images at diffraction of X-rays from a surface of a crystal from the changed geometry of structure of its surface. Data of modelling of formation of X-ray images of the X-rays received at diffraction from a surface of a crystal having columned structure. It is shown, that at use columned structures resolution of X-ray images raises more than in 10 times that allows to form two-dimensional X-ray images.
Keywords: X-ray, X-ray image, columnnet structure, resolution, temperature field, contrast.
- Glukhova O. E.** *Rigidity Y-Shaped Carbon Nanotube at Stretching/Compression Deformation* 19
On molecular-mechanical model rigidity Y-shaped carbon nanotube is investigated at stretching/compression deformation. It is established that deformation remains elastic only in limits from -3 % to 3 % of change of length of a Y-tube along a symmetry axis. The rigidity factor (on a solution corner) for a Y-tube of a tube (6,6) doubled from one edge with a corner of a solution 112,5°, is equal 12,26 nN/grad. Thus, Y-tubes can serve as a strengthening composite of polymeric materials, and also probes of high rigidity in nuclear power microscopes.
Keywords: Y-shaped carbon nanotube, established deformation, molecular-mechanical model.
- Rinkevich A. B., Ustinov V. V., Samoilovich M. I., Klescheva S. M., Kuznetsov E. A.** *Magnetic Resonance in Opal Matrixes with 3D-Nanostructure of Nickel-Zinc and Manganese-Zinc Ferrite Nanoparticles* 23
Interaction of electromagnetic waves with nanoheterostructures obtained by doping of opal matrixes with nickel-zinc and manganese-zinc ferrite has been studied. The opal matrixes contain of SiO_2 nanospheres with diameter about 250 nm with ferrite nanoparticles in the nanosphere voids. The measurements are carried out in frequency range from 26 to 38 GHz in magnetic fields up to 13 kOe. Variation in magnetic field of the transmission coefficient module of the TE_{10} mode in rectangular waveguide containing a doped opal matrix is studied. The nanstructure sample is placed into the waveguide. Field dependencies of the transmission and reflection coefficients are analyzed. It has been shown that the magnitude and the field dependencies of the coefficients are similar each other. Measurements of transmission coefficient module through a rectangular cavity with a doped opal matrix sample have been carried out. It was shown that magnetic resonance in the doped matrix is the main reason for microwave variations. Besides the resonances belonging to the acoustic branch of magnetic resonance spectrum, other resonances have been observed to appear which do not relevant to the acoustic branch. Transmittance of electromagnetic waves through nanocomposite sample has been analyzed and its magnetic field dependency.
Keywords: microphotonics, opal matrices, ferrite nanoparticles, microwave measurements.
- Mustafaev G. A., Mustafaev A. G.** *Process of Deep Trench Isolation for Silicon on Insulator Structures* 30
Work is considering deep anisotropic etching of SOI structures. Parameters of trench forming process in ion coupled plasma reactor with LF bias at substrate electrode are given. Breakdown voltage of formed structures is measured.
Keywords: trench, anisotropical etching, plasma chemical etching.

- Shilyaev P. A., Pavlov D. A., Korotkov E. V., Treushnikov M. V., Krivulin N. O.** *Study of Elastic and Friction Properties of Submicron Layers of Silicon on Sapphire* 32
Molecular-beam epitaxy (MBE) layers of silicon with 30—1000 nm thickness on sapphire were investigated by means of Lateral Force Microscopy (LFM) and Z-modulation mode of Atomic Force Microscopy (AFM). It was shown, that lateral force contrast between silicon and sapphire exists independently of deposited layer thickness, while the difference of elastic properties of silicon and sapphire appears only on thick films (more than 100 nm).
Keywords: silicon on sapphire (SOS), molecular-beam epitaxy (MBE), atomic force microscopy (AFM), lateral force microscopy (LFM), Z-modulation mode.
- Adamov D. Yu., Matveenkov O. S.** *Hardware Components of Nanoscale CMOS Microcircuits* 34
Limiting factors of microcircuit logic element speed are considered in the paper. Problems of power saving and means of this problem solving are explained in this paper too.
Keywords: logic element, CMOS, power saving, performance, hardware components.
- Sobolev V. S., Kostsov E. G., Shcherbachenko A. M., Utkin E. N., Kharin A. M.** *Microvibrations of Capital Structures Components as the Sources of Renewed Energy for MEMS-Generators* 42
Results of the microvibrations measurements of the capital building elements, as sources of renewed energy are presented. Measurements are executed by means of the new contactless laser equipment based on the phenomena of an optical feedback and frequency modulation of semiconductor lasers radiation. Root-mean-square values and corresponding spectral density of vibrodisplacements, vibrovelocities and vibroaccelerations for walls, ceilings and windowpanes of a building are certain. Estimations of the microvibrations energy and power, are carried out.
Keywords: microvibrations of designs, energy output, laser Doppler vibrometer, vibrovelocity, vibrodisplacement.
- Vopilkin E. A.** *Microelectromechanical Systems Opportunities* 47
Opportunities of implementation of MEMS/NEMS accelerometers and nanogyroscopes for various DOD's purposes are considered. There are shown advantages of use such devices in competent munitions for ordnance, in platform stabilization for aviation and in personal/vehicle navigation for infantry and vehicles.
Keywords: microelectromechanical systems, nanogyroscope accelerometer.

For foreign subscribers:

Journal of "NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE" (Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, ISSN 1813-8586)

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(499) 269-5510.

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

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Телефон редакции журнала **(499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru**

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства

в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер *Т. Н. Погорелова*. Технический редактор *Е. М. Патрушева*. Корректор *Т. В. Пчелкина*

Сдано в набор 18.11.2008. Подписано в печать 16.12.2008. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 6,86 Уч.-изд. л. 8,59. Заказ 22. Цена договорная

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15