НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 9 (122) ✧ 2010

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 систему Российского индекса научного цитирования

Издается с 1999 г.

Главный редактор
Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора
Лучинин В. В.

Редакционный совет:
Аристов В. В.
Асеев А. Л.
Волчихин В. И.
Гапонов С. В.
Захаревич В. Г.
Каляев И. А.
Квардаков В. В.
Климов Д. М.
Ковальчук М. В.
Нарайкин О. С.
Никитов С. А.
Сауров А. Н.
Серебряников С. В.
Сигов А. С.
Стриханов М. Н.
Чаплыгин Ю. А.
Шахнов В. А.
Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:
Абрамов И. И.
Андриевский Р. А.
Антонов Б. И.
Арсентьева И. П.
Астахов М. В.
Быков В. А.
Горнев Е. С.
Градецкий В. Г.
Гурович Б. А.
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.
Сухопаров А. И.
Телец В. А.
Тимошенков С. П.
Тодуа П. А.
Шубарев В. А.

Отв. секретарь
Лысенко А. В.

Редакция:
Григорин-Рябова Е. В.
Чугунова А. В.

Учредитель:
Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Аракелян С. М., Коростелев В. Ф., Кутровская С. В., Кучерик А. О., Кирилина А. Н. Наноиндентирование углеродных нанотрубок, пропитанных расплавом алюминия под давлением . . . 2

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ

Непомнящий О. В., Алекминский С. Ю. Проблемы верификации проекта при сквозном проектировании вычислительных систем-на-кристалле . . . 4

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Журавлева Л. М., Плеханов В. Г. Изотопическая нанотехнология низкоразмерных структур . . . 8

Шаурцков А. Г., Хатукаев Х. М. Применение процессов ионного легирования в технологии двухпролетных лавинопролетных диодов с плоским и ступенчатым профилем легирования . . . 13

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Смолин В. К. Тонкопленочные резистивные элементы первичных преобразователей датчиков . . . 16

Бобров А. А., Дюжев Н. А., Медников А. М., Махиборода М. А., Попков А. Ф., Шкуропат И. Г., Матвеева Н. К. Исследование выходного отклика резистивного анемометрического преобразователя расхода газа мембранного типа в стационарном и импульсном режимах нагрева . . . 23

Абрамов И. И. Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники. VIII. Нанотранзисторы с МДП-структурой (часть 1) . . . 27

Пивоненков Б. И. Новый класс пьезорезистивных микро- и наносенсоров . . . 38

Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Коротаев А. Г., Григорьев Д. В. Влияние облучения на характеристики фотодетекторов из HgCdTe . . . 48

Новости нанотехнологий . . . 53

Contents . . . 55

Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайтах журнала (http://novtex.ru) и научной электронной библиотеки (http://elibrary.ru). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на сайте журнала: с 1999 г. по 2003 г. в разделе "ПОИСК СТАТЕЙ", а с 2004 г. — в разделе "АРХИВ".

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

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2010

УДК 621.7.024

С. М. Аракелян, д-р физ.-мат. наук, проф., проректор,
В. Ф. Коростелев, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,
С. В. Кутровская, аспирант,
А. О. Кучерик, канд. физ.-мат. наук, доц.,
А. Н. Кирилина, канд. техн. наук, доц.,
Владимирский государственный университет,
e-mail: giess300@mail.ru

НАНОИНДЕНТИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК, ПРОПИТАННЫХ РАСПЛАВОМ АЛЮМИНИЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

В описываемой работе процесс компактирования осуществлен путем пропитки капсулы, наполненной УНТ, в расплаве алюминия при температуре 850 °С под давлением 400 МПа. Для исследования свойств методом наноиндентирования использовали сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) Солвер НЕКСТ, производства NT-MDT, Зеленоград, Москва.

Приведены результаты измерений, сравнение которых с литературными данными дает важную информацию для синтеза новых материалов.

Ключевые слова: *методика резонансных автоколебаний, изостатическая опрессовка в расплаве, свойства поверхности, формирование фрагментов наноструктуры*

Уникальные свойства УНТ [1—3] привлекают внимание многих специалистов, однако до настоящего времени не разработано технологически реализуемых процессов производства композиционных материалов, в которых многофункциональность УНТ находила бы практическое использование.

Проблема состоит в том, что высокая реакционная способность трубок выступает как барьер на пути их смешивания, компактирования и взаимопроникновения с другими металлами и неметаллами.

Компактирование УНТ в расплаве алюминия

Осуществлена попытка конструирования композита на основе УНТ методом пропитки в расплаве алюминия под давлением по схеме, приведенной на рис. 1. Здесь капсула *9*, представляющая собой оболочку из чистого алюминия, наполненную УНТ, установлена в полости формы *4*. После заливки расплава (тоже чистого алюминия) при температуре 800 ± 20 °С с помощью прессующих плунжеров *2* на расплав накладывается давление ~ 400 МПа. Вырезанный из полученного слитка в окрестности капсулы опытный образец представлен на рис. 2 (см. четвертую сторону обложки).

На макроуровне это создает впечатление сандвича, в котором по мере приближения к центру массива относительный объем распределенного алюминия уменьшается.

На микроуровне виден рельеф поверхности в исходной области в зоне проникновения расплава алюминия между УНТ (рис. 3). Электронная фотография УНТ в исходном состоянии приведена на рис. 4. Сравнение показывает, что в процессе опрессовки конфигурация трубок не изменяется, но их взаимное расположение становится более компактным.

Необходимо отметить, что на данном этапе исследований управление наложением давления обеспечивает лишь программно-временное воздействие и не выступает в качестве инструмента для управления изменением структуры [4]. Поэтому полученные образцы по составу и свойствам в разных зонах неоднородны. Однако по составу, массе и свойствам они достаточно близки к реальным изделиям типа поршней, втулок, плиток, что важно для определения области их эффективного использования в зависимости от сочетания таких свойств, как твердость, модуль упругости, упругое восстановление и др.

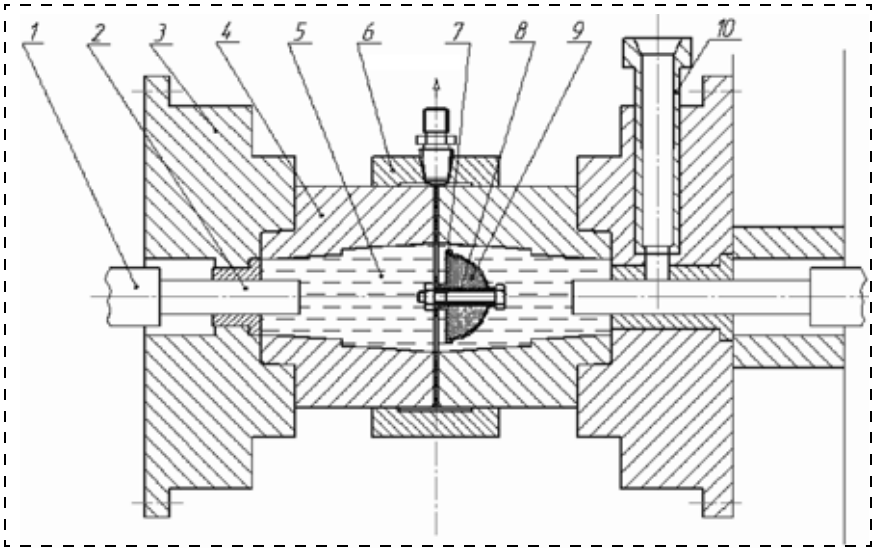

Рис. 1. Схема процесса: *1* — шток поршня гидроцилиндра; *2* —прессующий плунжер; *3* — основание; *4* — форма; *5* — расплав; *6* — кольцо; *7* —оболочка; *8* — болт; *9* — капсула; *10* — чаша заливочная

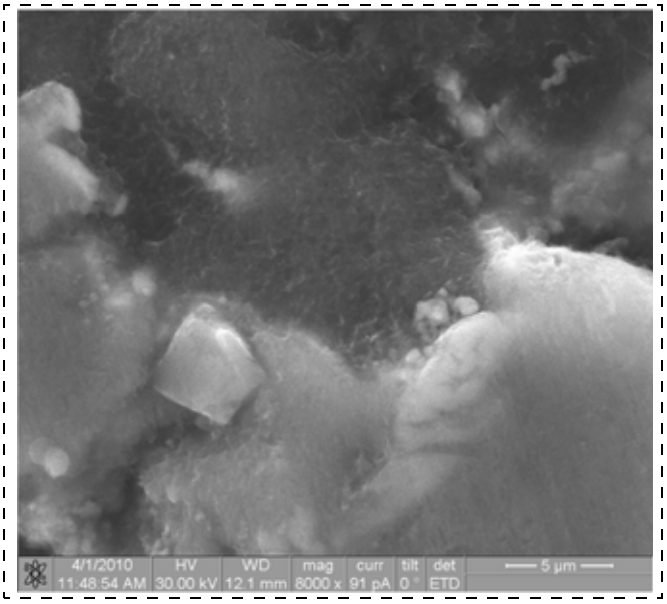

Рис. 3. Рельеф поверхности опытного образца на участке проникновения алюминия в НТ (точка *2* на рис. 2)

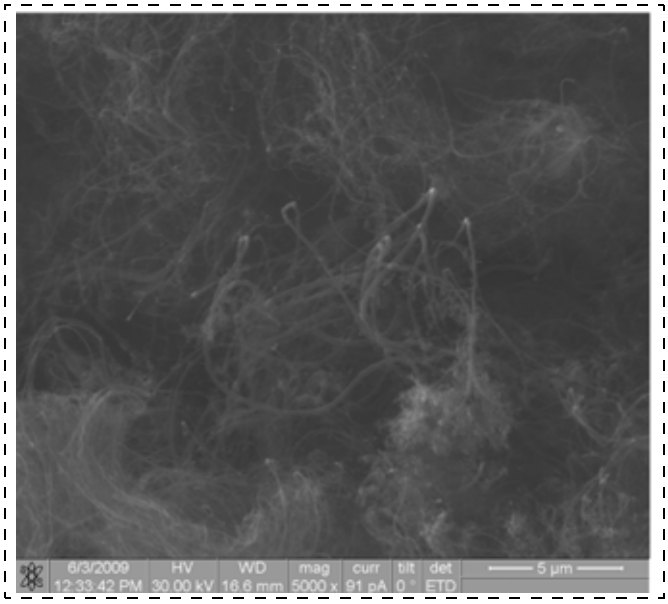

Рис. 4. Электронная фотография УНТ в исходном состоянии

Методика исследования

Измерения свойств поверхности опытных образцов проводили с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ). Физической основой работы АСМ является взаимодействие острия зонда и поверхности. Используя возможности нанолаборатории Ntegra Aura (поле сканирования 120 × 120 мкм; точность в плоскости сканирования до 0,05 нм; разрешение по высоте до 0,1 нм; точность позиционирования образца до 5 мкм), измерения проводили в прерывисто контактном режиме зондами NA_NC и в контактном режиме зондами CSG10 со следующими характеристиками: материал — кремний; отражающее покрытие — золото; угол острия конуса $\leqslant 22°$; радиус острия — 10 нм.

АСМ-изображение исходной поверхности показано на рис. 5 (см. четвертую сторону обложки).

Регистрирующая система прибора состоит из источника излучения — полупроводникового лазера, $\lambda = 670$ нм, $P = 0{,}9$ мВт и позиционно-чувствительного фотоприемника — четырехсекционного фотодиода.

Расчет параметров шероховатости приводили в соответствии со стандартами ISO 4287/1 [5].

Результаты измерений

Для оценки эффекта компактирования УНТ и появления сил межатомного взаимодействия по границе контакта алюминий — УНТ наибольший интерес представляют значения модуля упругости E, ГПа, твердости H, ГПа, упругого восстановления r, %. Эти величины приведены на рис. 6.

Для сравнения в таблице приведены литературные данные [5], из которых

Свойства материалов по литературным данным [5]

Материал	H, ГПа	E, ГПа	R, %
Медь	2,1	121	14
Титан (ОТ4-1)	4,1	130	19
Многослойная пленка Ti/α—C:H	8,0	128	34
Аморфная лента Zr—Cu—Ti—Ni	11,5	117	42
Кремний (100)	11,8	174	62
Тонкая PVD пленка Ti—Si—N	28,4	295	62
Алюминий АСД	0,72	56	7
Алюминий (АСД), дисперсно-упрочненный микрочастицами квазикристаллов Al—Cu—Fe (30 %)	1,9	106	14
Алюминий (АСД), дисперсно-упрочненный наночастицами квазикристаллов Al—Cu—Fe (30 %)	2,5	98	17
Микрочастицы квазикристаллов Al—Cu—Fe в АСД30	10,1	175	32
Квазикристалл Al—Cu—Fe (тонкая PVD пленка)	13,7	286	32

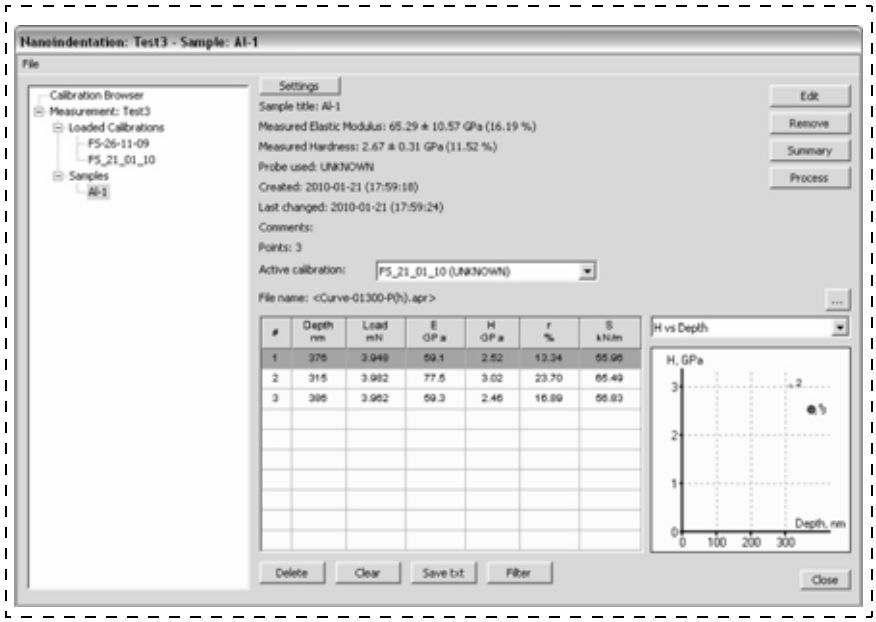

Рис. 6. Наноиндентация на чистом участке сплава алюминия

видно, что обработка УНТ расплавом алюминия под давлением формирует композит, свойства которого сопоставимы с алюминием дисперсно-упрочненным квазикристаллами Al—Cu—Fe (30 %). При этом особого внимания заслуживает, что в точке *2* (см. рис. 2), где условия для контактного взаимодействия УНТ и алюминия, вероятно, достаточно благоприятные, показатели выше, чем в точках *1* и *3*.

В данном случае эффект формирования материала с высоким уровнем свойств достигнут как результат взаимодействия по меньшей мере трех процессов:

- механического сближения частиц под влиянием давления расплавленного алюминия — уплотнения;
- заполнения воздушных пор, межчастичных пространств типа высокоугловых границ зерен и других дефектов структуры — компактирования;
- формирования свойств материала в результате сближения атомов на расстояние действия межатомных сил схватывания —упрочнения.

Важно также подчеркнуть, что технологическая реализация указанных процессов не требует значительных затрат и применения дорогостоящего оборудования. Производство УНТ в ближайшей перспективе может быть освоено в достаточно больших объемах. Поэтому проблема дальнейших исследований в направлении управляемого синтеза материалов с новым сочетанием физико-механических свойств приобретает практическое значение.

Список литературы

1. **Стариков С. В.** Механические свойства углеродных нанотрубок. Физико-химическая кинетика в газовой динамике. URL: http://www.chemphys.edu.ru/media/files/010-01-12-030.pdf
2. **Богословская Е. С., Бажин И. В.** Моделирование процессов разрушения углеродных нанотрубок и их контактов // Исследовано в России: электрон. науч. журнал. URL: http://zhurnal.gpi.ru/articles/2009/046.pdf
3. **Елецкий А. В.** Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // УФН. Т. 172, № 4. 2002. С. 401—438.
4. **Коростелев В. Ф.** Управление давлением при производстве наноструктурированных материалов // Материалы 2-й Российской мультиконференции по проблемам управления. Мехатроника, автоматизация, управление. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2003. С. 229—232.
5. **Левашов Е. А.** Обеспечение единства измерений физико-механических и трибологических свойств наноструктурированных поверхностей // Нанометрология: [сайт]. URL: http://www.nanometer.ru/2009/02/ll/nanometrologia_58090.html

Конструирование и моделирование МНСТ

УДК 004.315

О. В. Непомнящий, канд. техн. наук, доц., зав. лаб.,
С. Ю. Алекминский, студент-магистрант,
e-mail: al.stanislav@gmail.com,
Институт космических и информационных технологий Сибирского федерального университета, г. Красноярск

ПРОБЛЕМЫ ВЕРИФИКАЦИИ ПРОЕКТА ПРИ СКВОЗНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ-НА-КРИСТАЛЛЕ

Рассмотрены современные проблемы функциональной и системной верификации проектирования сверхбольших интегральных схем и, в частности, систем-на-кристалле. Приведен обзор существующих методик верификации и предложены пути решения означенных проблем.

Ключевые слова: *функциональная верификация, системная верификация, автоматизированное проектирование, СБИС, система-на-кристалле*

Современная радио- и микроэлектроника, микропроцессорные системы и радиотехнические устройства неразрывно связаны с жизнедеятельностью человеческого общества. Достижения практически всех существующих направлений в науке и технике немыслимы без применения микропроцессорной техники, цифровых и аналоговых интегральных схем и систем на их основе. На сегодняшний день в мировой практике освоено достаточно большое число методов и технологий изготовления интегральных схем, систем-на-кристалле и однокорпусных вычислительных систем.

Степень интеграции современных сверхбольших интегральных схем (СБИС) растет экспоненциально [1]. На сегодняшний день переход к субмикронным технологическим нормам позволяет размещать на кристалле практически любой по сложности проект. Тем не менее, имеется другой сдерживающий фактор — проблема функциональной верификации СБИС. При разработке сложнофункциональных устройств, т. е. систем, включающих не только цифровые, но и аналоговые, смешанные, а также процессорные ядра со встроенным программным обеспечением, означенная проблема стоит наиболее остро.

По последним данным примерно половина всего инженерного состава, работающего над крупными проектами, занята функциональной верификацией, а временные затраты на нее в общем цикле проектирования выглядят еще более впечатляюще — более 60 % [2].

Анализ проблемы показал, что технологии верификации проекта на сегодняшний день заметно отстают от технологий и вычислительных возможно-

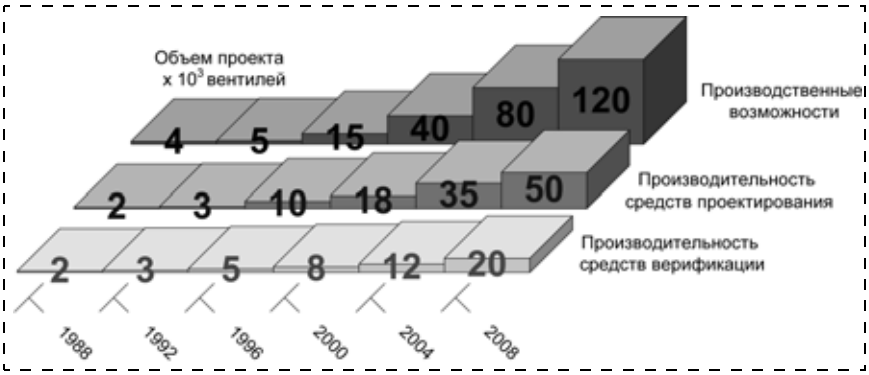

Рис. 1. Динамика роста производственных возможностей в отношении к производительности средств проектирования и верификации СБИС

стей систем проектирования. Еще более серьезным видится отставание возможностей верификации от технологических возможностей производства СБИС (рис. 1).

В то же время затраты на создание комплекта фотошаблонов для субмикронных СБИС настолько высоки, что их повторное изготовление из-за обнаруженных ошибок зачастую недопустимо как с точки зрения задержки выхода изделия на рынок, так и в связи с ростом его конечной стоимости [3].

Поэтому необходим поиск принципиально новых решений, разработка передовых технологий верификации и подход к новым методам анализа проекта.

Основным недостатком традиционного подхода к функциональной верификации является общепринятый алгоритм проектирования. Дело в том, что здесь система сначала разрабатывается и лишь затем — тестируется [4]. При 60—70 %-ной загрузке по времени на верификацию такая последовательность действий недопустима. При увеличении числа транзисторов на кристалле на первое место выходит факт резкого увеличения необходимого числа и длины тестовых векторов и, как следствие, размера и сложности программно-аппаратных средств тестирования. Параллельно усложняется процесс поиска неисправности, обнаруженной тестом.

Традиционный подход к проектированию и верификации означает, что проектирование начинается с разработки спецификации на систему в целом с последующим разбиением системы сначала на крупные, а затем на меньшие блоки, реализуемые на уровне RTL-описания [4].

При таком принципе нисходящего проектирования каждый блок проектируется и верифицируется отдельно, и только после объединения в более крупные блоки происходит совместная верификация. Таким образом, более мелкие блоки приходится верифицировать дважды. Сначала функционирование блока тестируется на соответствие его спецификации, а затем — на соответствие общим требованиям в составе интегрированной системы. При таком подходе имеется высокая вероятность обнаружения ошибки на одном из последних этапов интеграции, особенно на уровне системной верификации, и, как следствие, возврат к началу блочного проектирования. Такой метод приводит к недопустимым затратам времени и ресурсов на внесение изменений.

Итак, с увеличением степени интеграции СБИС процесс верификации усложняется, но следует учесть и функциональные возможности современных систем-на-кристалле, которые также растут с экспоненциальной скоростью. В состав современной системы-на-кристалле могут входить несколько высокопроизводительных процессоров, высокоскоростные интерфейсы ввода-вывода, встроенные модули памяти, аналоговые, смешанные и СВЧ модули обработки данных. Управление такими системами может осуществляться с помощью программного обеспечения, базирующегося на встроенных операционных системах и т. д.

Таким образом, на первый план выходит системная верификация, т. е. верификация взаимодействия, а не верификация отдельных блоков на блочно-модульном уровне. Здесь особую сложность представляет взаимодействие цифровых подсистем с аналоговыми и СВЧ схемами.

На современном этапе развития применение готовых модулей "интеллектуальной собственности" — IP-блоков от сторонних фирм — в составе проекта также создает целый ряд проблем в области верификации. Дело в том, что IP-модули поставляются, как правило, в виде "черных ящиков", не позволяющих анализировать их внутреннее поведение [5].

На рис. 2 изображена диаграмма зависимости требуемой скорости верификации от сложности объектов.

Проведенный анализ текущего состояния проектов СБИС, в том числе систем-на-кристалле, реализуемых ведущими компаниями, показал, что на сегодняшний день решить проблему функциональной верификации только путем повышения производительности традиционного метода моделирования на уровне RTL не представляется возможным.

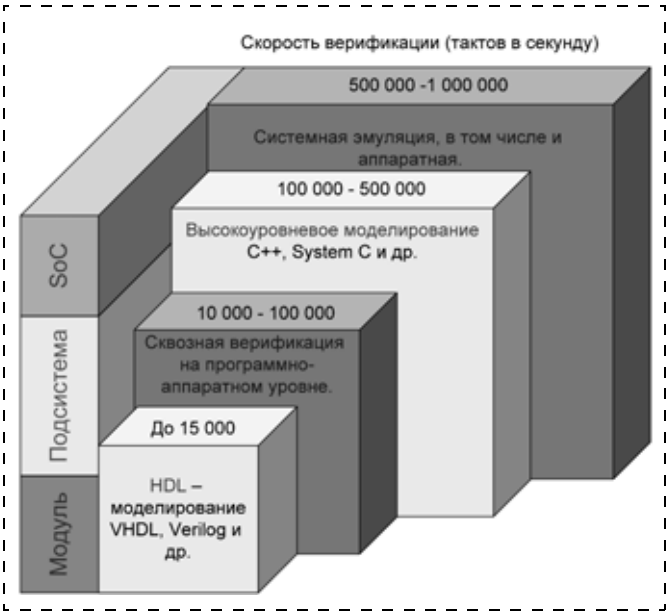

Рис. 2. Требуемая скорость верификации при переходе к более сложным объектам

В работе [6] рассматриваются два общих подхода к решению означенных проблем. Первый предполагает усовершенствование средств тестирования, а второй подход заключается в изменении самой методики верификации, а именно — в переносе соответствующих процедур верификации на более ранние этапы проектирования.

Тем не менее, для решения проблем верификации следует осуществить интеграцию процесса создания программно-аппаратных средств тестирования с разработкой методологии сквозной верификации проекта на всех этапах.

Современные средства проектирования должны обеспечивать сквозную верификацию на всех уровнях по преимущественным направлениям. Здесь необходимо использовать технологии имитационного моделирования, аппаратной эмуляции, интегрированной программно-аппаратной верификации и обязательно аналого-цифрового смешанного моделирования. Программные системы создания и верификации проекта должны поддерживать все стандартные языки проектирования, в том числе весь ряд HDL (VHDL, Verilog, VHDL_AMS, Verilog_A). Также должны поддерживаться системные языки (Spice, C, C++, SystemC, System Verilog, MATLAB, PSL assertions и др.)

В плане выработки перспективных методологий верификации следует отметить создание системных тестов, моделирование на уровне транзакций, верификацию интерфейсов различных подсистем одновременно с их проектированием, т. е. возможность верификации системы, отдельные блоки которой представлены на разных уровнях абстракции.

При таком подходе возможно проектирование на системном уровне, т. е. создание моделей высокого уровня на первоначальных этапах проекта. Такие модели могут быть созданы на основе C, C++, SystemC и System Verilog, при этом детали каждого отдельного блока не рассматриваются. Такой подход позволит верифицировать систему, не ожидая детальной проработки всех блоков и интерфейсов. Для реализации "узких" мест — интерфейсов между блоками — следует использовать механизм транзакций.

На основании изложенного рассматривается новая методология верификации, которая базируется на следующих основных принципах:

- разработка архитектурного плана системы верификации на первоначальных этапах при определении спецификации системы;
- реализация принципа нисходящего проектирования с поитерационной детализацией блоков до уровня RTL. При этом реализуются возможности смешанного моделирования подсистем, представленных на различных уровнях;
- принцип нисходящей верификации проекта от системного до вентильного уровней как в плане формального описания, так и в динамическом и статическом режимах функционирования;
- верификация принятых архитектурных решений на системном уровне с помощью построения моделей подсистем верхних уровней на языках C++, SystemC, SystemVerilog и организация моделей подсистемных интерфейсов на уровне транзакций;
- автоматическая генерация тестбенчей — виртуальных объектов, содержащих тестируемый модуль и подсистему тестовых воздействий, причем как на системном, так и на RTL уровнях;
- возможность эмуляции отдельных модулей на аппаратном уровне, в том числе и при использовании внутрисхемных эмуляторов, при которой имеется возможность подключения моделей разного уровня абстракции с управляющим виртуальным или эмулируемым процессором;
- возможности создания интегрированного виртуально-аппаратного прототипа посредством интегрированной системы программно-аппаратной верификации, реализующей совместное моделирование программной и аппаратной частей проекта, включающей построение моделей на языках высокого уровня и интерфейсных моделей посредством транзакций;
- возможность применения встроенных функций проверки истинности утверждений, характерных для правильного функционирования устройства (assertion-based verification) и возможностей оптимизации функционального покрытия (coverage driven verification);
- стандартизация в области представления данных и языковых средств проектирования;
- поддержка проектирования с помощью блоков интеллектуальной собственности — IP для организации стандартных подсистем (I2C, USB, SCSI и т. д.).

На основании вышеизложенного можно сформулировать основные требования к перспективным системам верификации. Система должна обеспечивать:

- исключение верифицированных блоков и моделирование только новых добавляемых блоков;
- моделирование на разных языках, т. е. система должна иметь возможность выполнять сборку наиболее сложных проектов из проектных блоков на языках VHDL, Verilog, C/C++, SystemC и им подобных, а также списков цепей в стандартизированном формате, при этом должна быть обеспечена их полная интеграция на основе общего модельного ядра;
- смешанное языковое моделирование, например, возможность совместного моделирования тестов и проектных модулей C/C++ и SystemC вместе с модулями VHDL и Verilog. При этом компилятор C должен встраивается в систему моделирования, а результаты комбинированного моделирования могут просматриваться в редакторе временных диаграмм;
- оптимизацию процесса моделирования, в том числе компиляцию и моделирование проектов на языках описания аппаратуры и смешанных языках совместно с тестами; распределение системной памяти между модулями проекта в необходимом и достаточном объеме для верификации; выгрузка неиспользуемых в процессе верификации блоков из проекта на время моделирования;
- использование передовых технологий верификации, например, верификацию на основе утвер-

ждений с аппаратной поддержкой и поддержкой стандартов утверждения OpenVera (OVA), языка определенных свойств (PSL), библиотеки открытой верификации (OVL);

- поддержку интерфейсов верификации в стандартах IEEE, в том числе интерфейсов PLI, VPI и VHPI, для связи с другими средствами верификации на различных этапах проектирования. Кроме того, должна быть заложена возможность сопряжения со средствами проектирования сторонних фирм путем подключения нестандартизированных протоколов обмена и предоставления информации;
- поддержку параллельных вычислений и многомашинных серверных систем. Система должна быть совместима со всеми методологиями управления загрузкой многомашинных серверных систем и систем параллельных вычислений, конфигурируемых для различных операционных систем в целях разгрузки локального компьютера при моделировании;
- защиту информации при многопользовательском проектировании в виде упаковки и кодирования библиотек исходных файлов при обмене проектными модулями между членами рабочей группы локально или по сети;
- анализ тестового покрытия по строкам кода, по переключениям, по ветвлению; осуществления интегрального покрытия на множестве тестов (слияние) и графической визуализации тестового покрытия;
- выявление блоков повышенного потребления ресурсов при моделировании и выполнения их оптимизации в целях предотвращения деградации моделирования;
- наличие в составе среды высокопроизводительного редактора временных диаграмм, использующего различные методы сжатия для обработки больших объемов данных при моделировании и ускорения визуализации временных диаграмм. Необходимым требованиям по реализуемым функциям редактора являются функции редактирования диаграмм с возможностью модификации цепей, поддержку форматов VCD, отображение источников событий, функцию сравнения временных диаграмм и др.;
- поддержку встроенного многоуровневого текстового редактора языков описания аппаратуры, интегрированного с компилятором и ядром моделирования, обеспечивающего весь спектр функций отладки от генерации точек останова до локализации ошибок компиляции;
- поддержку аппаратных ускорителей в целях увеличения скорости и эффективности моделирования за счет соединения вместе многих различных элементов проектирования и верификации в единую ускорительную платформу системного уровня.

Современные технологии проектирования систем от компаний Mentor Graphics, Aldec и других позволили снизить разрыв между производственными возможностями и производительностью средств верификации. Однако вопросы разработки технологий и методик верификации крупных проектов остаются открытыми. Здесь имеются существенные пробелы языкового плана, проблемы совместимости проектов и интерфейсов, проблемы защиты информации при сетевом и многопользовательском проектировании, проблемы международной стандартизации и др.

Рассмотренные проблемы в области верификации проектов и предложенные пути их решения позволят создавать системы верификации для более гибких интегрированных аппаратно-программных платформ класса "аппаратный ускоритель — язык моделирования", предназначенных для смешанного моделирования от системного уровня до уровня регистровых передач. Такие платформы позволят выполнять процедуры длительного регрессивного тестирования и моделирования во времени, а также применять методы и средства групповой разработки.

Список литературы

1. **Rosensliel W.** Rapid Prototyping, Emulation and Hardware/Software Co-debugging // In System-Level Synthesis / Ed. by A. A. Jerraya and J. Mermet, NATO Science Series, Kluwer Academic Publisher, 1999.
2. **Немудров В., Мартин Г.** Системы-на-кристалле. Проектирование и развитие. М.: Техносфера, 2004. 216 с.
3. **Стешенко В. Б., Руткевич А. В.** и др. Опыт разработки СБИС типа СнК на основе встроенных микропроцессорных ядер // Компоненты и технологии. 2008. № 9.
4. **Рабаи Ж. М., Чандракасан А., Николич Б.** Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования. 2-е изд.: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2007. 912 с.
5. **Бухтеев А. В.** Методы и средства проектирования систем на кристалле // Chip news. 2003. № 4.
6. **Лохов А.** Функциональная верификация СБИС в свете решений Mentor Graphics // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, технологии, бизнес. 2004. № 1.

УДК 621.3.049.77

Л. М. Журавлева, канд. техн. наук, доц., Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), e-mail: zhlubov@mail.ru,
В. Г. Плеханов, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф., Институт вычислительной техники, г. Таллин, e-mail: plekhanov@iati.ee

ИЗОТОПИЧЕСКАЯ НАНОТЕХНОЛОГИЯ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР

Рассматриваются перспективы нового направления в нанонауке — изотоптроники, базирующегося на использовании метода нейтронного облучения изотопически смешанных материалов. Изотоптроника изучает создание и исследование низкоразмерных квантовых структур, применяемых при передаче и обработке информации. Кратко описываются результаты применения изотоптроники в нано- и оптоэлектронике.

Ключевые слова: *изотопы, нанотехнология, низкоразмерные структуры, информация*

В настоящее время внедрение нанотехнологий наряду с информационными технологиями является необходимым условием научно-технического прогресса. Без этого невозможно повышение качества жизни, перевод экономики на ресурсосберегающие производства, усиление национальной безопасности.

Последние достижения в области наноэлектроники и ядерных технологий позволили сформулировать новое научное направление — *изотоптроника.* Изотоптроника изучает влияние свойств ядер изотопов химических элементов на электронные и оптические характеристики низкоразмерных структур, которые могут иметь размеры меньше 1 нм. Название "изотоптроника" состоит из двух слов: "изотопы", обозначающие атомы одного и того же вещества с ядрами, состоящими из одинакового числа протонов и разного числа нейтронов, и "троника" от слова трогать, т. е. использовать различные свойства вещества, обусловленные разным содержанием нейтронов в ядрах атомов [1].

Целью научных исследований изотоптроники является поиск новых материалов, базирующихся на особенностях изотопического строения вещества, для создания более совершенных устройств передачи, хранения и обработки информации в различных отраслях науки и техники.

Основополагающей технологией изотоптроники является ядерная технология. С ее помощью можно изменять изотопический состав химических элементов и тем самым получать материалы с новыми электронными и оптическими свойствами и создавать на их основе более совершенные электронные и оптоэлектронные приборы.

Из множества возможных приложений изотоптроники самым востребованным в настоящее время является применение новых материалов в волоконно-оптических системах передачи информации (ВОСП).

Это наиболее перспективные системы передачи дискретной информации, особенно на магистральных направлениях. Главная причина заключается в огромных ресурсах оптических волокон, которые позволяют передавать сигналы в полосе частот в десятки терагерц [2]. Поэтому у оптического волокна есть огромные возможности по наращиванию пропускной способности и скорости передачи информации. Особенно актуальна задача повышения скорости передачи цифровых сигналов. Это связано с тем, что в последнее время возникла необходимость передачи большого числа высокоскоростных сигналов, например, видеоизображений высокой четкости, в том числе в формате 3D. Большие потенциальные возможности использования цифровых сигналов с помощью ВОСП можно продемонстрировать на примере прямых трансляций оперных и балетных спектаклей ведущих театров в рамках Евросоюза.

Для осуществления этих задач требуется соответствующая приемо-передающая аппаратура (кодеки и модемы). Элементной базой для них являются высокочастотные транзисторы, диоды, лазеры и фотодетекторы.

Последние научные разработки свидетельствуют о больших достижениях в области электронных и оптоэлектронных устройств, связанных с увеличением их быстродействия. Однако повышение скорости передачи цифровых сигналов имеет теоретический предел. Так, максимальная рабочая частота используемых транзисторов ограничивается временем пролета носителей заряда через базу, размеры которой ограничены постоянной кристаллической решетки [3]. Современные транзисторы, работающие на эффекте резонансного туннелирования в низкоразмерных гетероструктурах, позволяют достичь быстродействия порядка 1 ТГц [3]. Эта цифра в настоящее время является предельной для наращивания скорости передачи цифровой информации, что связано не только с размерами таких устройств, но и с трудностями производства в промышленных масштабах, обусловленными сложностями технологического процесса и высокими требованиями к качеству изделий. Дальнейшее увеличение скорости передачи информации зависит от результатов поиска новых материалов и нанотехнологий производства

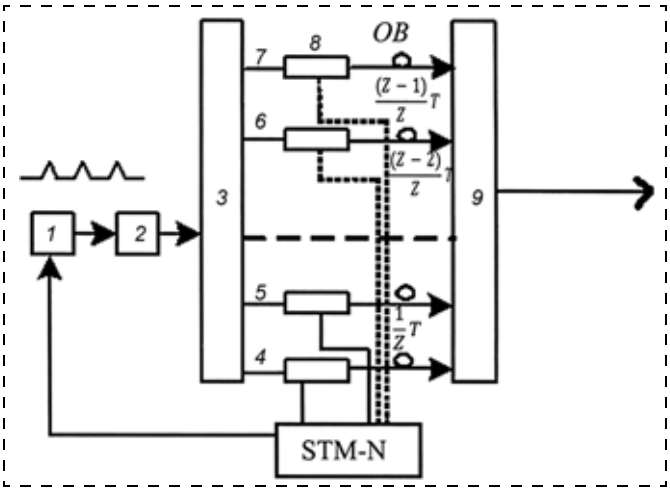

Рис. 1. Схема оптического временного уплотнения (OTDM)

элементной базы. Такие же проблемы возникают и при реализации оптических модемов ВОСП.

Самые быстродейственные оптические модуляторы Маха—Цендера, применяемые в настоящее время, имеют граничную частоту 40 ГГц [3]. Специальные оптические модуляторы на квантовых ямах из ниобата лития позволяют реализовать непосредственную оптическую модуляцию светового излучения с рабочей частотой до 100 ГГц [3]. В этом случае используется эффект экситонного поглощения под действием внешнего электрического поля. Достигаемая при этом частота оптической модуляции пока еще далека от потенциальных возможностей оптического волокна (ОВ).

Чтобы преодолеть существующие ограничения по скорости со стороны электронного и оптоэлектронного оборудования, предложен принципиально новый алгоритм передающей аппаратуры ВОСП, который объединил две операции: временное уплотнение и оптическую модуляцию [4]. Эта схема получила название оптического временного уплотнения (OTDM). В основе ее лежит лазер *1*, работающий в импульсном режиме с периодом T (рис. 1). Оптический импульс с помощью усилителя *2*, разветвителя *3* и многоканальной схемы *4—7* "клонируется" и подается на входы оптических модуляторов *8*. Каждый модулятор управляется электрическим сигналом в цифровой форме, поступающим от соответствующего транспортного модуля STM-N. Если подается единица, модулятор пропускает оптический импульс, если — ноль, то импульс не проходит. С помощью линий задержки из оптического волокна *ОВ* импульсы на выходе модуляторов сдвигаются по времени так, чтобы на выходе сумматора *9* каждый оптический импульс попал в свой временной промежуток. Так, время задержки изменяется в пределах от $(Z-1)T/Z$ до T/Z. При этом длительность элементарного импульса $\tau = T/Z$, где Z — число ветвей OTDM. Величина T должна соответствовать скорости цифровых потоков STM-N (длительности элементарного электрического импульса) и возможностям оптического модулятора по частоте модуляции.

Сравнивая быстродействие кодирующих устройств и оптических модуляторов, можно сделать вывод, что последние пока отстают по скорости срабатывания. В настоящее время в реализованных вариантах ВОСП максимальная скорость оптической модуляции составляет 40 ГГц. Однако идея оптического мультиплексирования в схеме OTDM позволяет решить проблему отставания оптоэлектронной базы. С учетом того, что современные лазеры способны генерировать фемтосекундные импульсы, возможности OTDM огромны и позволяют освоить частотные ресурсы ОВ в рамках одного "окна прозрачности". В настоящее время максимально достигнутая скорость передачи информации в схемах OTDM составляет 1,28 Тбит/с [3]. Используя несколько оптических несущих (волновое уплотнение в пределах одного "окна прозрачности"), можно организовать работу нескольких схем OTDM и полностью реализовать ресурсы ОВ по пропускной способности. Если вопросы повышения скорости оптической модуляции можно решить с помощью алгоритмов OTDM, то проблема дальнейшего увеличения быстродействия электронного оборудования может быть решена только с переходом на новую элементную базу.

Так, повышение граничной частоты возможно лишь с переходом на низкоразмерные гетероструктуры и принципиально новую технологию изготовления электронных приборов. Низкоразмерные, или квантовые, структуры — это такие, у которых один (квантовые ямы, рис. 2, *а*), два (квантовая проволока, рис. 2, *б*) или все три размера (квантовые точки, рис. 2, *в*) соизмеримы с длиной волны де Бройля электрона в твердом теле. В таких структурах наблюдается высокая подвижность электронов, которая является следствием локализации носителей заряда за счет потенциальных барьеров гетеропереходов (сопряжения двух полупроводников с разными электронными характеристиками) и квантования электронных состояний.

Особое значение для создания высокоскоростной элементной базы ВОСП имеют совершенство контактных поверхностей гетероперехода и чистота материала. Поэтому от качества изготовления стыкуемых слоев (отсутствия посторонних примесей, флуктуаций размеров квантовой структуры, "шероховатостей", которые равносильны внутренним дефектам) зависят характеристики эффективности электронных и оптоэлектронных приборов.

Получить качественные приборы для ВОСП в промышленных масштабах можно с помощью изотоптроники и ядерных технологий.

Известно, что материалы, состоящие из различных изотопов одного и того же химического элемента, обладают разными электронными и оптоэлектронными характеристиками (значениями запрещенной зоны, показателями преломления света, величиной спина, диэлектрической проницаемостью) (подробнее см. обзор [5]). Этот факт можно использовать для создания низкоразмерных гетероструктур из одного материала, легированного собственными изотопами.

Так, с помощью ядерных технологий путем нейтронного облучения определенных слоев заготовки (рис. 3), например, из кремния с естественным содержанием изотопов можно создать различные низко-

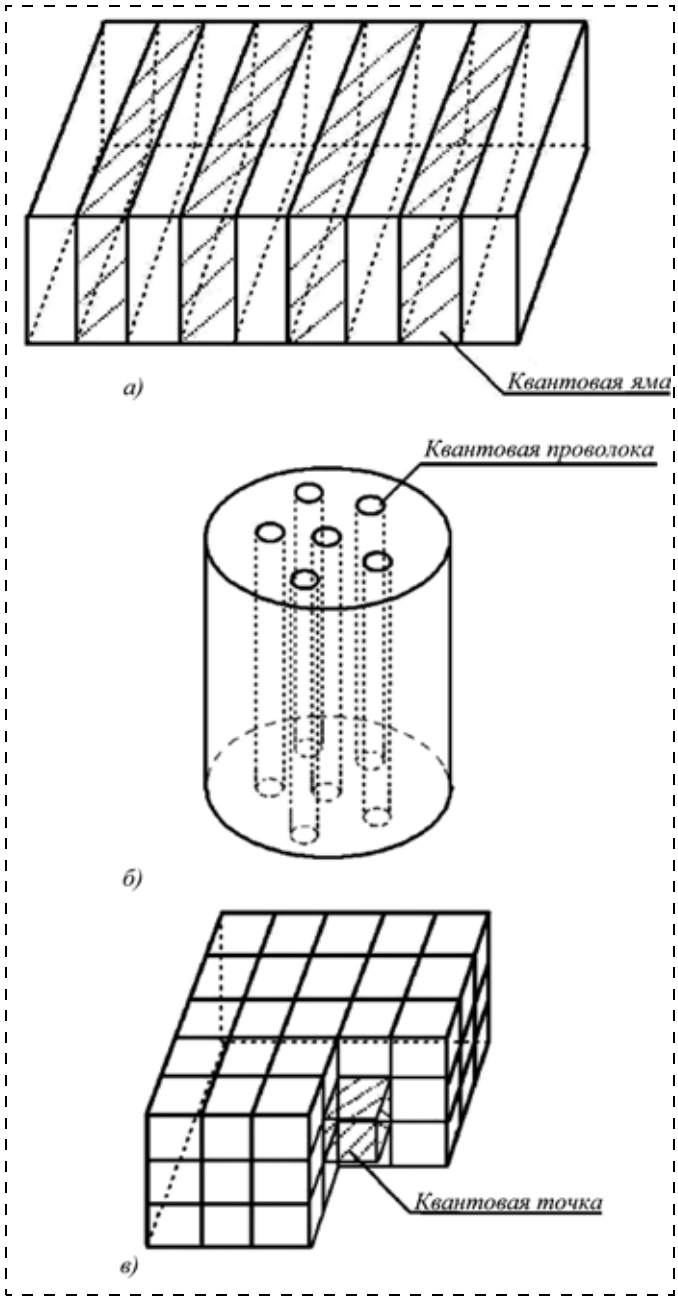

Рис. 2. Квантовые структуры: *а* — квантовая яма; *б* — квантовая проволока; *в* — квантовая точка

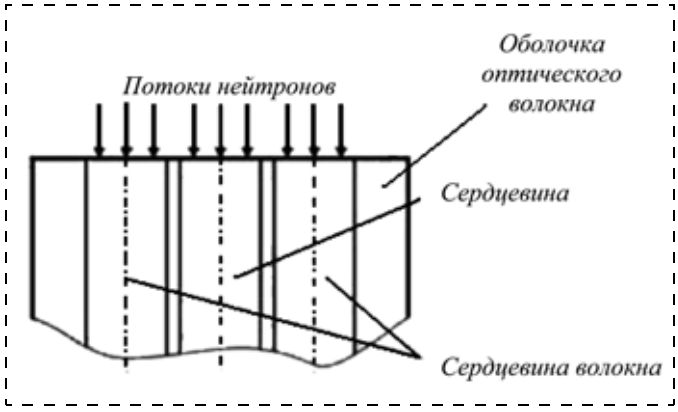

Рис. 3. Схема облучения оптического волокна

размерные структуры, в том числе фотонно-кристаллическое волокно, для электронных и оптоэлектронных приборов. Так, изображенные на рис. 2, *а*, *б*, *в* структуры можно создать из более тяжелых изотопов кремния (Si^{29}, Si^{30}) путем облучения нейтронами изотопа Si^{28} [5]. Потенциальные барьеры таких "гетеропереходов" при этом оказываются достаточными, чтобы возбудить в таких структурах, например, экситоны.

Применительно к фотонно-кристаллическому волокну (ФКВ) (см. рис. 2, *б*) требуемые различия в показателях преломления света n в отдельных элементах ФКВ (т. е. основе волокна и квантовых проволоках оболочки) можно достичь, если в результате облучения нейтронами заготовки создать слои из диоксида кремния с разной концентрацией тяжелых изотопов Si^{29}, Si^{30}, определяющей оптоэлектронные характеристики облученных слоев (рис. 3).

В этом случае один или два размера облучаемого нейтронами пятна должны иметь порядок нескольких нанометров и соответствовать диаметру стержней ФКВ (квантовых проволок). В результате облучения потоками нейтронов *1* (рис. 4), например, торцевой части заготовки *2* будут образовываться горизонтальные или вертикальные (или одновременно и те, и другие) полоски *3* с повышенным содержанием тяжелых изотопов, разделенные между собой необлученными слоями с естественной концентрацией изотопов. В зависимости от конструкции (размеров и сечения) облучателей, а также их расположения можно формировать в заготовке любые квантовые структуры.

Таким образом, благодаря использованию изотопических свойств материалов и ядерных технологий можно предложить новый способ изготовления наноструктур с помощью нейтронного облучения [1, 7]. При этом отлаженные на протяжении нескольких десятков лет технологии нейтронного облучения в промышленном масштабе могут гарантировать высокую точность размеров электронных и оптоэлектронных приборов, а также чистоту материалов (см., например [6] и ссылки там).

Наибольший практический интерес для облучения полупроводниковых материалов (Si, Ge, GaAs и т. д.) представляют собой тепловые нейтроны с энергией E в диапазоне 0,025...1 эВ [6].

Тепловые нейтроны H вступают в реакцию поглощения с ядрами мишени X по следующей схеме [8]:

$$ {}^{A}_{Z}X + {}^{1}_{0}H \rightarrow {}^{A+1}_{Z}X + \gamma, \qquad (1) $$

где Z — атомный номер вещества; A — массовое число; γ — излучение, которое представляет освобожденную энергию.

Концентрацию изотопов кремния, например, можно подсчитать следующим образом [8]:

$$ N_i^1 = N_i \sigma_i \varphi t, \qquad (2) $$

где N_i^1 — выход i-го изотопа после облучения; N_i — концентрация i-го изотопа до облучения; σ_i — сечение реакции поглощения i-го изотопа; t — время облучения.

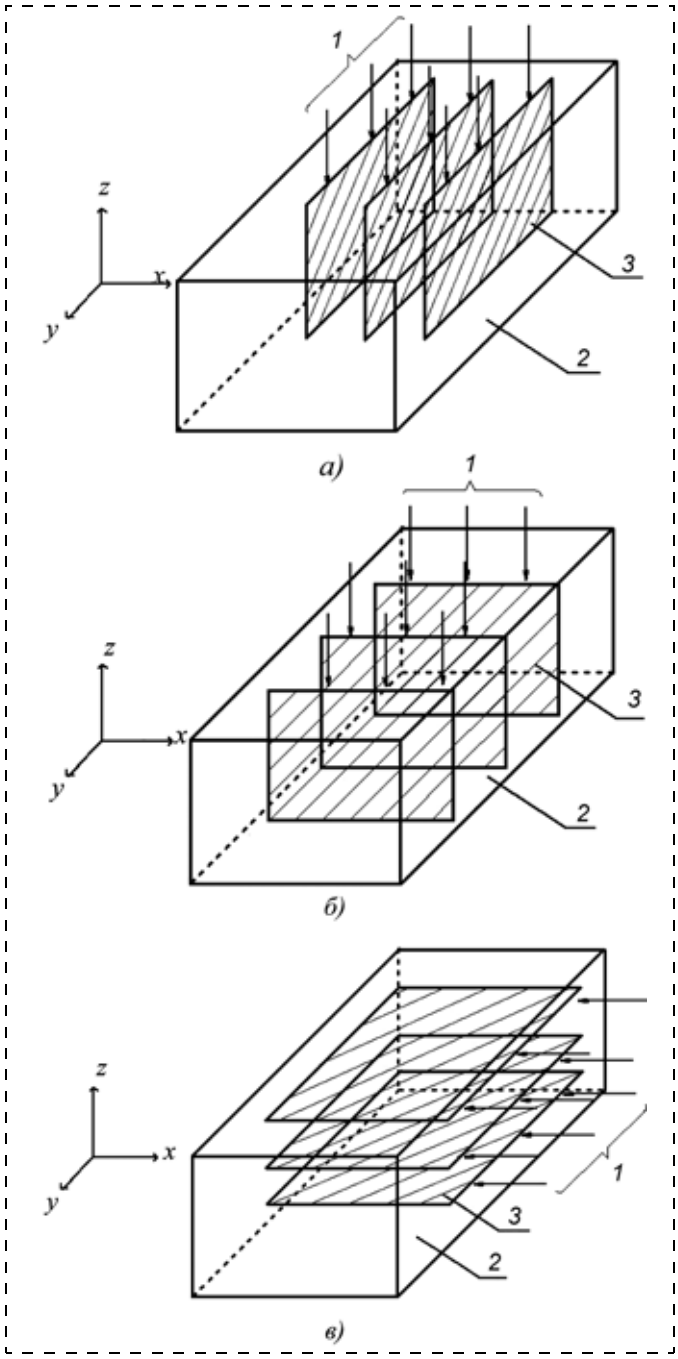

Рис. 4. Схемы облучения заготовки нейтронами: *а* — формирование вертикальных слоев в плоскости *y*, *z*; *б* — формирование вертикальных слоев в плоскости *x*, *z*; *в* — формирование вертикальных слоев в плоскости *x*, *y*

Применительно к изотопам кремния выход ^{29}Si из изотопа ^{28}Si в результате ядерной реакции может составлять

$$N_i^1 = 10^{-3} N_i,$$

где $N_i = 0{,}9218$ — концентрация изотопа ^{28}Si в естественном состоянии кремния.

После подстановки значения N_i^1 в формулу (2) получим величину интегрального облучения φt, а именно:

$$\varphi t = 10^{-3}/\sigma_i, \qquad (3)$$

где

$$\sigma_i = 0{,}08/\sqrt{E}. \qquad (4)$$

Для $E = 0{,}025$ эВ в случае кремния имеем $\sigma_i = 0{,}506$ барн (1 барн = 10^{-24} см^2), $\varphi t = 20 \cdot 10^{20}$ нейтрон/см^2.

При среднем значении интенсивности потока нейтронов $\varphi = 10^{17}$ нейтрон/см$^2 \cdot$ с время облучения составит 5,56 ч.

С помощью формулы Лорентц—Лоренца [9], определяющей молекулярную рефракцию, можно рассчитать разность коэффициента преломления Δn облученной и необлученной областей заготовки. Так, увеличение концентрации тяжелых изотопов в $10^{-3} N_i$ раз соответствует значению $\Delta n = 0{,}007$. Теоретически разница между показателями преломления сердцевины и оболочки волокна, необходимая для соблюдения эффекта полного внутреннего отражения, может быть сколь угодно малой. Практически все зависит от свойств лазера (угла расходимости лазерного излучения, который для различных лазеров колеблется от 0,1 до 6°).

В случае изготовления изотопических "гетеропереходов" нейтронным облучением разница в запрещенных зонах стыкуемых слоев полупроводника, состоящих из разных изотопов, может составлять в зависимости от материала от десятых долей эВ (материалы с изотопами водорода, например, LiH и LiD) до десятых долей мэВ (изотопы кремния) [5]. Перспектива использования изотопической структуры вещества для создания "гетеропереходов" объясняется, во-первых, тем, что изотопически смешанный состав заготовки в результате облучения можно менять в широких пределах. Так, концентрацию того или иного тяжелого изотопа можно поднимать до 100 %. Во-вторых, свойства материалов сильно зависят от изотопического состава. Так, сечение поглощения нейтронов (2) для разных изотопов одного и того же химического элемента (например, кадмия, индия и др.) могут отличаться на два порядка [6]. Это свидетельствует о больших возможностях моделирования новых материалов с помощью изотоптроники.

Конкретное значение потенциального барьера в образованном "гетеропереходе" ΔE зависит от размеров ядер изотопов и величин кулоновских взаимодействий внутри атома. Известно [8], что наибольшей разницей запрещенных зон ΔE для кремния обладают, например, изотопы Si^{28} и Si^{29}, а также Si^{30}. Эта разница видна из модели кулоновского взаимодействия, где сила, препятствующая отрыву валентного электрона в зону проводимости, обратно пропорциональна расстоянию (радиусу атома). Более тяжелый изотоп Si^{30} имеет ядро с числом нейтронов на два больше, чем у изотопа Si^{28}. Поэтому радиус ядра у Si^{30} больше, а запрещенная зона меньше, чем у Si^{28}. Существуют и другие причины, изложенные в работе [8]. Следует отметить, что дальнейшее утяжеление ядра химического элемента приводит к сжатию ядра и уменьшению радиуса. Так, для кремния наибольшая разница запрещенных зон ΔE составляет 2 мэВ.

Согласно теории прямоугольных потенциальных ям конечной глубины можно утверждать, что независимо от потенциального барьера в яме будет существовать хотя бы одно связанное состояние частицы, например экситона, причем энергия связи та-

кой частицы увеличивается обратно пропорционально ширине ямы [3]. Этот факт позволяет считать, что изотопические квантовые структуры, полученные с помощью ядерных реакций, можно использовать для возбуждения электронов и создания на их основе электронных и оптоэлектронных приборов. Такие устройства будут обладать всеми характеристиками наноструктур. Кроме того, они будут отличаться высокой чистотой и однородностью материала за счет того, что легирование осуществляется не "чужеродным" элементом, а собственными изотопами, имеющими близкие значения постоянной кристаллической решетки.

Для изготовления с помощью ядерных технологий изотопических низкоразмерных структур необходимо обеспечить определенные параметры облучения. Это такие характеристики, как сфокусированность нейтронного потока, дифракционные искажения, степень разрешения (однородности) нейтронов по энергии $\Delta E_н$ и т. д. Наибольшее значение для достижения высокой точности изготовления геометрических размеров и отсутствия дефектов имеет величина $\Delta E_н$. Ее влияние, например, на точность размеров можно оценить по длине поглощения нейтронов L. Величина L определяется выражением [8]

$$L = \frac{1}{K\sigma_i}, \qquad (5)$$

где $K = 5{,}04 \cdot 10^{22}$ ат/см^3 — число атомов кремния в 1 см^3.

Используя формулы (4) и (5), можно рассчитать разницу ΔL для величин энергий $E \pm \Delta E_н$. Так, современные монохроматоры могут иметь разрешение по энергии нейтронов $\Delta E_н = 10^{-9}$ эВ [8]. После подстановки в соответствующие формулы получим, что величина ΔL, определяющая точность геометрических размеров низкоразмерных структур с помощью нейтронного облучения, составит значение порядка ± 5 нм. Эта цифра позволяет назвать новую технологию изотопической нанотехнологией.

Наиболее интересным механизмом реализации оптоэлектронных приборов на низкоразмерных структурах можно считать экитонный [3].

Экситонами называют электрон-дырочные пары, в которых электрон и дырка соединены кулоновскими силами притяжения (рис. 5). Такая частица возникает в результате поглощения фотона, не влияет на электропроводность вещества, поскольку не обладает электрическим зарядом. Возникновение экситонов значительно облегчается в низкоразмерных структурах (наблюдается даже при комнатной температуре), так как локализация в ограниченной области усиливает эффекты перекрытия волновых функций электронов и дырок. В случае, когда боровской радиус r экситона намного меньше ширины квантовой ямы, экситон сжимается, усиливаются кулоновские силы. Это приводит к увеличению энергии связи $E_{св}$ между электроном и дыркой, что сказывается на устойчивости экситонов в квантовых ямах по отношению к сильным электрическим полям.

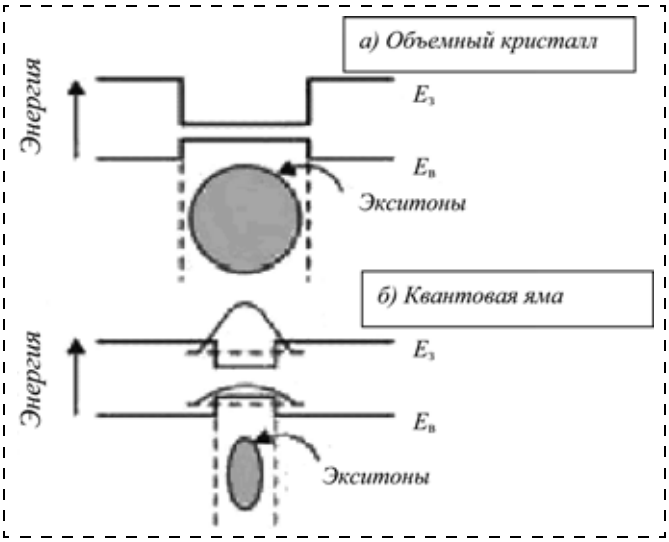

Рис. 5. Орбиты экситонов: $E_з$ — зона проводимости, $E_в$ — зона валентности

Так, для кремния энергия экситона $E_{экс}$ (равная энергии фотона, необходимой для его создания) и его радиус будут составлять соответственно на нижнем уровне квантования 12,1 мэВ и 3,13 нм. Величина $E_{св}$ для объемного материала равна разнице между запрещенной зоной $E_з$ и энергией $E_{экс}$. Экситоны гораздо легче и чаще наблюдаются в собственных полупроводниках, чем в легированных другими элементами, поскольку в последних свободные носители частично экранируют кулоновское взаимодействие между электроном и дыркой. Поэтому вероятность возбуждения экситонов в изотопических структурах, легированных собственными изотопами, должна быть выше. В очень многих полупроводниках рекомбинация электронов и дырок происходит без излучения фотона. Процесс рекомбинации осуществляется посредством центров рекомбинации в виде внутренних дефектов. Более чистые изотопические материалы могут повысить эффективность фотолюминесценции, что важно, например, для лазерных диодов.

Выбор конкретного материала квантовой структуры для возбуждения экситонов зависит от требуемой величины ΔE. В этом случае предпочтение следует отдавать прямозонным полупроводникам, таким как галлий арсенид. Несмотря на небольшую разницу в запрещенных зонах для изотопов кремния этот химический элемент может быть использован для создания низкоразмерных структур, например фотонно-кристаллического волокна, где важно обеспечить необходимую разницу в коэффициентах преломления основы ФКВ и квантовых проволок.

Дальнейшее развитие изотоптроники позволит расширить список перспективных материалов для наноэлектроники и оптоэлектроники и продвинет создание элементной базы не только для телекоммуникационных систем связи, но и других стратегически важных направлений науки и техники, например, создания квантовых процессоров [11].

Так, интересным приложением изотопических квантовых структур можно считать ячейки памяти для хранения квантовой информации. Предполага-

ется, что устройство для хранения квантовой информации — это кристалл, например кремния, внутри которого сформированы квантовые точки, разделенные друг от друга объемами не менее 1000 нм^3.

В этих точках осуществляется запоминание единицы информации с помощью экситонов. Для этого целесообразно использовать лазеры с длительностью импульса 10^{-15} с и интенсивностью 10^{12} фотон/с, чтобы в каждой квантовой точке возбуждался один экситон. Избирательность возбуждения экситонов именно в квантовых точках объясняется разной энергией связи (энергия связи в квантовой точке $E^1_{св}$ больше, чем в разделяющих объемах $E_{св}$ за счет сжатия экситона в квантовой точке). Например, для разделительных слоев кремния $E_{св} = 12{,}1$ мэВ в квантовых точках энергия связи $E^1_{вс}$ будет примерно в 3 раза больше [3].

Экситоны будут вращаться вокруг центра масс "макромолекулы" (квантовой точки), постепенно теряя энергию за счет столкновения с фононами кристаллической решетки. Время "жизни" такой символической единицы информации, записанной в квантовой точке, составляет не более 10^{-7} с. Число операций, которые можно осуществить за это время с экситоном, равно $n = \frac{10^{-7}}{10^{-15}} = 10^8$, что вполне удовлетворяет требованиям, например, для квантовых вычислений. Поэтому экситонный механизм можно использовать и для создания вычислительных гейтов квантовых процессоров.

Оперирование с единицами квантовой информации дает большие преимущества в виде быстродействия операций, секретности (электронные замки), объема памяти. Основные трудности в создании квантовых компьютеров заключаются в недостаточном уровне технологии изготовления квантовых устройств. Поэтому развитие изотопической нанотехнологии сможет продвинуть вперед решение этих вопросов.

Список литературы

1. **Журавлева Л. М., Плеханов В. Г.** Ядерная нанотехнология низкоразмерных изотопически-смешанных структур // Наноиндустрия. 2009. № 4. С. 28—30.
2. **Убайдуллаев Р. Р.** Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Трендз, 1998. 267 с.
3. **Мартинес-Дуарт Дж. М., Мартин-Палма Р. Дж., Агулло-Руеда Ф.** Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники. М.: Техносфера, 2007. 368 с.
4. **Скляров О. К.** Волоконно-оптические сети и системы связи. М.: Солон-Пресс, 2004. 261 с.
5. **Plekhanov V. G.** Elementary excitations in isotope — mixed crystals // Phys. Rep. 410. 2005. N 1—3. P. 1—235.
6. **Plekhanov V. G.** Applications of the Isotopic Effect in Solids. Berlin — Heidelberg: Springer, 2004.
7. **Журавлева Л. М., Плеханов В. Г.** Способ изготовления оптического волокна; пат. РФ № 2302381 от 09.12.2005.
8. **Мухин К. Н.** Экспериментальная ядерная физика. С-Пб., М., Краснодар: Лань, 2008. 318 с.
9. **Ландсберг Г. В.** Оптика. М.: Физматлит, 2006. 848 с.
10. **Tsoi S., Rodriguez H. S., Ramdas A. K.** et al. Isotopic dependence of the direct gaps in the electronic band structure of Si // Phys. Rev. 2005. B72. P. 153203 — 4.
11. **Плеханов В. Г., Журавлева Л. М.** Изотоптроника в медицине, геологии и в квантовой информации // Наноиндустрия. 2010. № 1. С. 52—54.

УДК 611.38(075)

А. Г. Шауцуков, канд. техн. наук, доц.,
Х. М. Хатукаев, ст. преподаватель,
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова, Нальчик, Кабардино-Балкарская республика,
e-mail: hatukaev@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ДВУХПРОЛЕТНЫХ ЛАВИНОПРОЛЕТНЫХ ДИОДОВ С ПЛОСКИМ И СТУПЕНЧАТЫМ ПРОФИЛЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ

Рассмотрена возможность получения структур кремниевых двухпролетных лавинопролетных диодов (ЛПД) с использованием процессов эпитаксиального наращивания в реакторе пониженного давления, многократного ионного легирования, имплантации легирующей примеси через пленки и фотонного отжига ионно-легированных слоев. Показано, что разработанная технология может быть использована для организации серийного выпуска ряда перспективных двухпролетных ЛПД миллиметрового диапазона.

Ключевые слова: *двухпролетный лавинопролетный диод, ионное легирование, метод эпитаксиального наращивания*

Введение

Известно, что двухпролетные лавинопролетные диоды (ЛПД) и особенно ЛПД со ступенчатым профилем легирования имеют существенные преимущества по сравнению с однопролетными. Преимуществом структуры двухпролетного ЛПД со ступенчатым профилем легирования является меньшая ширина области умножения [1]. Это обусловливает меньший разброс носителей по энергиям, следствием чего является большой КПД, а следовательно, и большая выходная мощность [1].

Активную структуру двухпролетных ЛПД со ступенчатым профилем легирования можно создавать, используя метод многослойной эпитаксии и метод многократного ионного легирования. Однако серийное производство приборов сдерживается из-за значительных технологических трудностей.

К методам многослойной эпитаксии относятся методы газовой эпитаксии и молекулярно-лучевой эпитаксии. В настоящее время метод газовой эпитаксии позволяет формировать эпитаксиальные

слои с точностью по толщине и концентрации, равной ± 20 %. Кроме того, при использовании этого метода получаются широкие переходные слои (15...30 % от толщины слоя). Большими возможностями при создании кремниевых эпитаксиальных структур для ЛПД обладает процесс молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), однако низкая производительность и дороговизна оборудования сдерживают широкое применение МЛЭ в производстве ЛПД.

В данной статье рассматривается технологический маршрут, включающий формирование:

- n^+-, n-слоев методом эпитаксиального наращивания;
- (p^+ — p)-пролетной области методом многократного ионного легирования;
- приконтактного p^{++}-слоя методом имплантации через пленки.

Моделирование процесса формирования p^+-, p-, p^{++}-областей

Моделирование процесса формирования (p^+—p)-пролетных областей ЛПД со ступенчатым профилем легирования в данной статье проводится на основе алгоритмов моделирования пролетных областей ЛПД с плоским профилем легирования, описанных в работах [2, 3]. При этом энергия бомбардирующих ионов для формирования p^+-слоя выбирается равной энергии, для которой проективный пробег ионов (R_p) равнялся бы координате 1/2 толщины p^+-слоя. Определив средний разброс проективных пробегов ионов (ΔR_p), соответствующий выбранной энергии, можно определить необходимую дозу внедрения по формуле

$$D = N\sqrt{2\pi}\,\Delta R_p,$$

где N — концентрация p-примеси, равная сумме концентрация n-примеси в исходной подложке и требуемой концентрации p-примеси в p^+-слое. Энергию и дозу второго легирования необходимо выбрать таким образом, чтобы концентрация в максимуме профиля легирования была равна сумме концентраций n-примеси в подложке и необходимой концентрации p-примеси в p-пролетном слое, а в точке пересечения профилей первого и второго легирования концентрация должна быть равной 1/2 концентрации в максимуме второго легирования.

Алгоритмы моделирования процесса формирования p^{++}-приконтактной области ЛПД разрабатывались на основе методики расчета профилей распределения ионов, внедренных в подложку при бомбардировке структур пленка — подложка, описанной в работе [4].

Согласно этой методике профиль распределения бомбардирующих ионов определяется по формуле

$$N(x) = \sum_{k=1}^{k=n} f(E_k)N(x, E_k)\Delta E_k,$$

где $f(E_k)$ — спектр энергии ионов на границе пленка — подложка; $N(x, E_k)$ — симметричная функция распределения Гаусса, описывающая распределение в подложке ионов с энергией E_k.

Как известно, это распределение определяется двумя параметрами: R_p и ΔR_p. Расчеты этих параметров в теории Линхарда и др. достаточно сложны. Для инженерных расчетов целесообразно воспользоваться имеющимися таблицами параметров пространственного распределения ионно-имплантированной примеси.

На основании сказанного выше разработаны алгоритмы моделирования процесса формирования заданного тонкого p^{++}-слоя активной структуры ЛПД. Алгоритмы предусматривают построение профилей распределения бомбардирующих ионов в подложке для ряда доз и энергий и сравнение каждого профиля легирования с заданным. Проводится сравнение концентрации внедренной примеси на поверхности и на глубине, равной толщине p^{++}-слоя. На этой глубине они должны быть равны исходной концентрации легирующей примеси в подложке.

Моделирование процесса фотонного отжига внедренной в p^{++}-, p-, p^+-слои примеси проводилось с учетом того, что, согласно данным ряда работ, максимальная активация имплантированной примеси и максимальный отжиг дефектов осуществляется при фотонном отжиге, обеспечивающем нагрев кремниевых пластин до температуры 1100 °С. Поэтому алгоритмы моделирования этого процесса предусматривали:

- определение плотности потока мощности излучения галогенных ламп, обеспечивающих стационарную температуру пластины кремния 1100 °С;
- расчет средней температуры пластины кремния, соответствующей заданному режиму отжига [5];
- моделирование степени перераспределения внедренных атомов отдачи в процессе фотонного отжига с учетом коэффициента радиационно-ускоренной диффузии, который моделировался согласно работе [6].

Для определения степени перераспределения внедренной примеси рассчитывается профиль ее распределения после отжига и проводится сравнение его с исходным.

По разработанным алгоритмам был проведен численный эксперимент по определению режимов

Таблица 1

Конструктивные параметры p^{++}-, p-,p^+-слоев в двухпролетных ЛПД четырехмиллиметрового диапазона

Параметры слоя	Тип слоя		
	$p+$	p	p^{++}
N, см$^{-3}$ n, мкм	$2{,}1 \cdot 10^{17}$ 0,1	$1{,}5 \cdot 10^{17}$ 0,3	$\geqslant 5 \cdot 10^{19}$ 0,1

Таблица 2

Режимы многократного легирования p^+—p-ступенчатой области двухпролетного ЛПД четырехмиллиметрового диапазона со ступенчатым профилем легирования

Режимы имплантации	Этапы легирования			
	1	2	3	4
E, кэВ D, см$^{-2}$	162 $7{,}3 \cdot 10^{12}$	84 $4{,}5 \cdot 10^{12}$	38 $3 \cdot 10^{12}$	14 $1{,}5 \cdot 10^{12}$

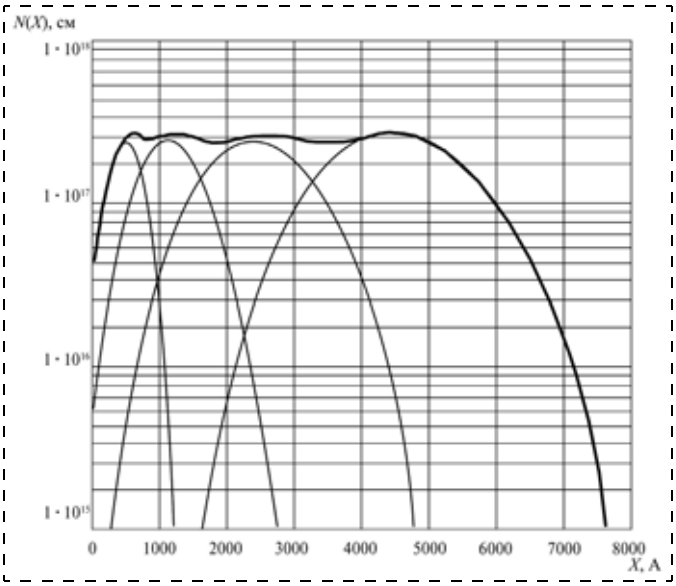

Рис. 1. Результаты численного эксперимента по моделированию процесса формирования (p^+—p)-пролетной области четырехмиллиметрового ЛПД со ступенчатым профилем легирования:
——— профили распределения ионов бора для каждого этапа легирования;
▬▬▬ суммарный профиль распределения ионов бора

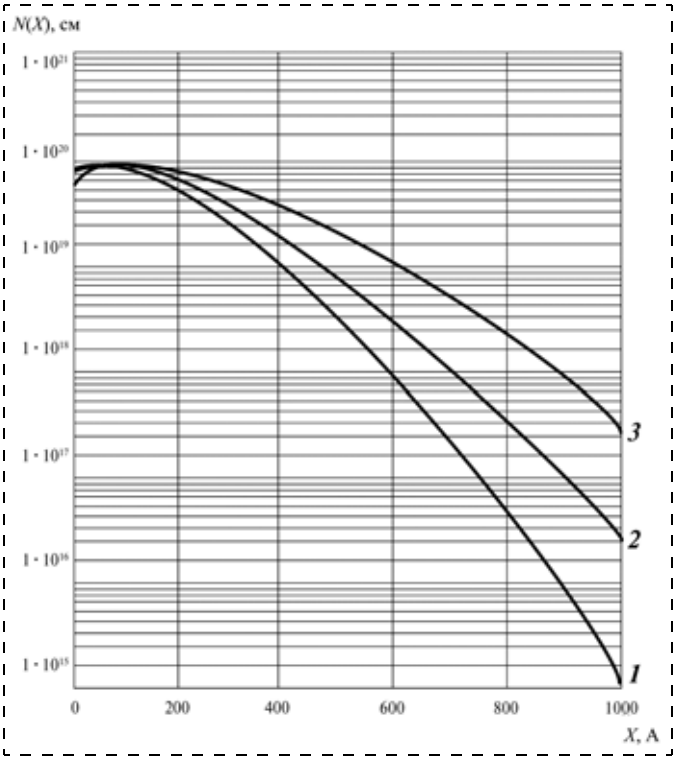

Рис. 2. Профили распределения бомбардирующих ионов бора после бомбардировки структуры Cr—Si ионами различной энергии:
1 — 55 кэВ; *2* — 60 кэВ; *3* — 65 кэВ

формирования p^{++}-, p-, p^+-слоев активной структуры двухпролетных ЛПД четырехмиллиметрового диапазона. Исходными данными для проведения численного эксперимента были:

- конструктивные параметры p^{++}, p-, p^+-слоев рассматриваемого ЛПД, представленные в табл. 1;
- плотность потока мощности излучения галогенных ламп;
- время отжига;
- тормозные коэффициенты $\frac{dE}{dR_p}$ и $\frac{dE}{d\Delta R_p}$ хрома и кремния для ионов бора и некоторые другие физические константы, необходимые для расчетов.

Результаты численного эксперимента по моделированию процесса формирования пролетной области представлены в табл. 2 и на рис. 1.

На рис. 1 представлены профили распределения бомбардирующих ионов бора для каждого этапа многократного ионного легирования и суммарный профиль бомбардирующих ионов бора. Как видно из представленных данных, многократное легирование, согласно режимам, указанным в табл. 2, обеспечивает формирование (p^+—p)-пролетных областей с заданными конструктивными параметрами.

На рис. 2 представлены профили распределения бомбардирующих ионов бора в кремниевой подложке для различных энергий бомбардировки ионами бора структуры пленка хрома — кремниевая подложка, иллюстрирующие моделирование процесса формирования p^{++}-слоя. Как видно из представленных данных, бомбардировка структуры Cr—Si ионами бора с энергией $E = 65$ кэВ и дозой $D = 5 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$ обеспечивает формирование необходимого p^{++}-слоя.

Разработанная технология формирования p^{++}, p-, p^+-слоев ЛПД была опробована путем изготовления и исследования опытных образцов.

Образцы изготавливались на исходной подложке КЭМ-0,003. На первом этапе путем эпитаксиального наращивания при температуре 950 °С за счет разложения моносилана и легирования растущей структуры мышьяком на подложке формировалась структура n — n^+ — n. Структура p^{++} — p — p^+ формировалась по разработанной технологии. На основе полученных структур по традиционной "мезатехнологии" были изготовлены образцы ЛПД с интегральным теплоотводом. Параметры изготовленных ЛПД показали, что для приборов со ступенчатым профилем легирования КПД выше в среднем в 1,3—1,4 раза, а уровень выходной мощности выше на 10—15 %, чем у двухпролетных ЛПД с плоским профилем легирования.

Выводы

- Разработан технологический маршрут изготовления двухпролетных ЛПД со ступенчатым профилем легирования, который предполагает: формирование n-, n^+-, n^{++}-слоев на n^{++}-подложке методом эпитаксиального наращивания; формирование (p^+—p)-слоев методом многократного ионного внедрения; формирование p^{++}-слоя методом имплантации через пленки; активацию внедренной примеси и отжиг радиационных дефектов путем фотонного отжига ионно-легированных слоев.
- Проведен численный эксперимент и определены режимы проведения процесса имплантации через пленки для формирования p^{++}-приконтактного слоя ЛПД.
- Проведен численный эксперимент и определены режимы многократного легирования для формирования (p^+—p)-пролетной области ЛПД.

- Показано, что для изготовленных по разработанной технологии образцов КПД в среднем в 1,3—1,4 раза выше, а уровень выходной мощности выше на 10—15 %, чем у двухпролетных ЛПД с плоским профилем легирования.

Список литературы

1. **Тагер А. С., Вальт-Перлов В. М.** Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ. М.: Сов. радио, 1968.
2. **Шауцуков А. Г., Шухостанов А. К.** Разработка технологии создания p^{++}, p областей двухпролетных ЛПД методом ионного легирования. // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1988. Вып. 1 (51). С. 57—60.
2. **Шауцуков А. Г., Дружинин А. В., Шухостанов А. К.** Автоматизированное проектирование режимов многократной ионной имплантации для создания p-областей двухпролетных ЛПД // Электронная промышленность. 1990. Вып. 2. С. 26—21.
3. **Шауцуков А. Г., Бетуганов М. А.** Расчет профилей распределения ионов в подложке при бомбардировке многослойных структур // Физика и химия обработки материалов. 1978. № 4. С. 151—153.
4. **Шауцуков А. Г., Кузнецов Г. Д.** Моделирование нагрева пластин кремния в процессе фотонного отжига их ионно-легированных слоев // Электронный журнал "Исследовано в России", 2005.
5. **Шауцуков А. Г., Загидулин Ю. С.** Моделирование процессов радиационно-стимулированной диффузии в ионно-легированных слоях // Микросистемная техника. 2004. № 4. С. 7—12.

Элементы МНСТ

УДК 621.3.049.77.002

В. К. Смолин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ФНПЦ НИИ измерительных систем им. Ю. Е. Седакова, г. Нижний Новгород, e-mail: niiis@niiis.nnov.ru

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ РЕЗИСТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАТЧИКОВ

Дан обзор конструкторско-технологических особенностей выполнения элементов первичных преобразователей датчиков различного функционального назначения, использующих в качестве чувствительных элементов тонкопленочные резисторы.

Ключевые слова: *резистор, тонкие пленки, технология формирования, первичные преобразователи*

Современные методы формирования тонкопленочных элементов и устройств на их основе базируются на технологии микроэлектроники, которая является результатом многочисленных исследований различных процессов и явлений материального мира. Становление понятия "резистор" и определение основных закономерностей движения электрического заряда в проводниках относятся ко второй половине XVIII века. В середине XIX века опытами М. Фарадея по взрыву металлических проволочек в инертной атмосфере были заложены основы тонкопленочной технологии, которая только в 30-х годах прошлого века нашла практическое применение в производстве резисторов [1].

Резистивные элементы часто используются в качестве чувствительных элементов преобразователей датчиков и измерительных систем. Измеряемая физическая величина, воздействуя на резистор, обусловливает изменение его сопротивления, которое может служить информативным параметром электрической цепи, зависящим от воздействия. В настоящей статье рассмотрены основные условия формирования и применения тонкопленочных резистивных элементов для определения различных физических характеристик.

Тонкопленочные терморезисторы

В качестве исходных материалов для изготовления тонкопленочных терморезисторов используют преимущественно металлы с большим температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) и обладающие квазилинейной зависимостью сопротивления от температуры в широком диапазоне температур. Такими материалами, находящими практическое применение, являются никель, платина, медь [2].

Осаждение пленок Ni с подслоем ванадия осуществлялось электронно-лучевым испарением на подложку, нагретую до 240 °С, при скорости осаждения ~ 2,5 нм · с$^{-1}$. ТКС для этих пленок в диапазоне температур от −60 °С до 50 °С составил $4{,}0 \cdot 10^{-3}$ °С$^{-1}$ и $4{,}2 \cdot 10^{-3}$ °С$^{-1}$ в диапазоне 50...100 °С. При толщинах более 1 мкм ТКС пленок никеля составляет чуть больше $6 \cdot 10^{-3}$ °С$^{-1}$ (для массивных образцов Ni эта величина имеет значение $6{,}68 \cdot 10^{-3}$ °С$^{-1}$ [3]).

Обычно тонкие пленки металлов считаются "толстыми" (т. е. когда их электрофизические свойства приближаются к свойствам массивных образцов), начиная с толщин 0,2...0,3 мкм. В 1970 г. А. Майдасом и М. Щатцкасом было получено решение уравнения Больцмана, описывающее электропроводность поликристаллических металлических пленок с учетом рассеяния электронов на фононах и примесях [4]. Аналогичный результат получен при использовании подхода, основанного на теории расслоенного пространства с постоянной кривизной [5].

Электропроводность пленки с учетом межзеренных границ σ_g в модели Майдаса—Щатцкаса определяется выражением

$$\sigma_g = \sigma_f F(\alpha).$$

Здесь σ_f — проводимость в отсутствие межзеренных границ (т. е. проводимость в рамках модели Фукса—Зондхеймера, учитывающей квантовый размерный эффект);

$$F(\alpha) = 1 - \frac{3}{2}\alpha + 3\alpha^2 - 3\alpha^3 \ln\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right);$$

$$\alpha = \frac{lR}{D(1-R)},$$

где l — средняя фоновая длина свободного пробега; R — коэффициент отражения плоской волны от потенциального барьера; D — среднее расстояние между границами зерен.

В двух предельных случаях имеем выражения для электропроводности поликристаллических пленок:

$$\frac{\sigma_g}{\sigma_f} = 1 - \frac{3}{2}\alpha \text{ при } \alpha \ll 1; \quad \frac{\sigma_g}{\sigma_f} = \frac{3}{4\alpha} \text{ при } \alpha \gg 1.$$

Более точно сопротивление тонких поликристаллических пленок (например, алюминия) интерпретируется двухслойной моделью, нижний слой которой равен первой критической толщине (11,4 нм), характеризующей переход от островковой пленки к сплошной, а электрическая проводимость осуществляется в верхнем слое [6, 7].

При использовании специальных методов физического осаждения из газовой фазы (ФОГФ) критическая толщина может быть уменьшена. При создании вдоль поверхности диэлектрической подложки электрического поля напряженностью более 100 $В \cdot см^{-1}$ равновесная форма зародышевого островка приобретает эллипсовидную форму, поскольку его свободная энергия изменяется в присутствии заряда и заполнение поверхности подложки происходит интенсивнее [8]. Учет этого явления использован в способе контроля сопротивления резистивных пленок в процессе осаждения [9].

В работах [10, 11] предложено при изготовлении тонкопленочных резисторов использовать циклическую криогенную обработку путем попеременного погружения подложек с пленками в сосуд Дьюара с жидким азотом и извлечения их на воздух. Для терморезистивных пленок никеля с удельным сопротивлением 2,5...3 Ом/□ (толщина около 100 нм) с подслоем ванадия после циклической криогенной обработки (30 с в жидком азоте, 30 с на воздухе; общее время обработки 25 мин) и отжига в вакууме при давлении $2{,}5 \cdot 10^{-3}$ Па и температуре 773 К в течение часа наблюдалось (по результатам измерений на рентгеновском дифрактометре) уменьшение более чем в 3 раза механических напряжений, возрастание ТКС и повышение стабильности при воздействии электрической нагрузки. Наиболее эффективной явилась обработка резистивных элементов на основе пленок никеля, помещенных в жидкий азот, импульсами электрического тока [12], что позволило сократить продолжительность термообработки в несколько раз (длительность обработки 5...10 мин, исключается отжиг в вакууме). При воздействии импульсов электрического тока с максимальной плотностью $3 \cdot 10^6$ $А/см^2$ и длительностью импульсов 1...2 с после 10 циклов обработки наблюдается уменьшение удельного сопротивления пленок на 30...35 % и возрастание ТКС до 50 % (до $4{,}1 \cdot 10^{-3}$ $К^{-1}$ вместо $2{,}6 \cdot 10^{-3}$ $К^{-1}$ у исходных образцов). Произведение удельного сопротивления на ТКС (правило Матиссена) для обработанных пленок находится в тех же пределах, что и для массивного никеля. При циклическом и резком изменении упруго напряженного состояния резистивной пленки в моменты охлаждения и нагрева активируются процессы перехода субструктурных составляющих(отдельные кристаллические дефекты, границы раздела, целые блоки и зерна) в равновесное состояние, характеризующееся меньшим значением свободной энергии по сравнению с исходным состоянием, свойственным структуре пленки после ее нанесения. В частности, резкое циклическое изменение внутренних напряжений обусловливает разрушение оксидных диэлектрических прослоек между зернами резистивной пленки. Дополнительно изменения в пленке стимулируются упругими волнами, возникающими при каждом акте локальной перестройки, а также квазиимпульсным воздействием пузырьков газообразного азота, образующихся при кипении (давление схлопывающихся пузырьков газообразного азота составляет около 30 МПа).

Пленочные терморезисторы на основе платины могут работать до температур 800...1000 °С. Структура таких элементов на сапфировых подложках включает в себя адгезионные и термокомпенсирующие слои: Ti (50 нм) — W (200 нм) — Mo (100 нм) — Ti (200 нм) — Pt (0,5 мкм) [13]. ТКС пленок платины, полученных ВЧ распылением, при толщине 1...3 мкм составил $3{,}85 \cdot 10^{-3}$ $°С^{-1}$ и $3{,}2 \cdot 10^{-3}$ $°С^{-1}$ при использовании кислородосодержащей и аргоновой плазмы соответственно (ТКС платиновой проволоки Пл-4 составляет $(3{,}83...3{,}85) \cdot 10^{-3}$ $°С^{-1}$) [14].

Способ формирования пленочных терморезисторов на основе платины, изложенный в работе [15], заключается в следующем. На окисленную кремниевую подложку со слоем Si_3N_4, нагретую до температуры 453...473 К наносят слой, состоящий из TiO_2 и Ti (с плавным или ступенчатым изменением концентрации компонентов), путем магнетронного распыления титановой мишени в газовой смеси аргона и кислорода. На данный адгезионный подслой ВЧ магнетронным распылением со скоростью 30 нм/мин осуществляют осаждение пленки платины толщиной 0,3 мкм. Полученная пленочная композиция подвергается отжигу в вакууме: 1 ч при температуре 623...653 К и 1 ч при температуре 713...733 К. При этом происходит восстановление диоксида платины до металла и низших оксидов, растворимых в "царской водке". Травление структуры типа "меандр" (ширина элемента 10 мкм, зазор 20 мкм) осуществляли через маску фоторезиста ФП-051МК, затем маску удаляли в кислородосодержащей плазме и проводили отжиг подложек на воздухе при температуре 693...723 К в течение 6...8 ч в целях доокисления проводящих низших оксидов титана до изолирующего диоксида титана.

Данное конструкторско-технологическое решение платиновых пленочных элементов при прочих равных условиях изготовления (скорость и темпера-

тура нанесения слоев, температура и продолжительность термообработок) имеет преимущества по сравнению с вариантами, в которых используется однородный по составу адгезионный подслой — Ti (улучшение механических характеристик пленочной композиции на безкислородном диэлектрике) или TiO_2 (повышение точности выполнения элементов, снижение их неровности края, повышение примерно на 4 порядка сопротивления в зазорах между элементами гребенчатой структуры преобразователей). Конструкции таких платиновых терморезисторов (и нагревателей) использовались в сенсорных устройствах, работающих при температурах до 773 К.

Терморезисторы на основе металлических пленок имеют квазилинейную зависимость от температуры в небольшом интервале температур. Это обусловлено не только структурными особенностями тонкой пленки, но и характером электропроводности исходного массивного материала. Например, нелинейная зависимость удельного сопротивления вольфрама от температуры в диапазоне 0...3200 °С аппроксимируется прямой линией с $\alpha = 5{,}8 \cdot 10^{-3}$ °С$^{-1}$. В случаях, когда требуется большая точность, для моделирования используют полиноминальную зависимость более высокого порядка [16]:

$$\rho = 4{,}45 + 0{,}0269t + 1{,}914 \cdot 10^{-6}t^2,$$

где t — температура в °С, а ρ — удельное электрическое сопротивление в Ом · м.

Пленочные терморезисторы с положительным ТКС порядка $7 \cdot 10^{-3}$ °С$^{-1}$ (при 25 °С) на основе кремния могут быть изготовлены при использовании в качестве основы изделия МСТ структур "кремний-на-диэлектрике".

Терморезисторы с отрицательным ТКС формируют преимущественно на основе полупроводниковых металлоксидных пленок, например, SnO_2, легированного Sb, или SnO_2 — In_2O_3 [17]. С близкой к линейной характеристикой резистор, имеющий ТКС $-(6...7) \cdot 10^{-3}$ °С$^{-1}$ (в интервале температур 140...350 °С), формируют на основе пленки нитрида меди толщиной 0,14 мкм, получаемой распылением меди в атмосфере азота [18].

Основные проблемы применения тонкопленочных терморезисторов —линеаризация характеристики и подавление саморазогрева — решаются путем применения шунтирующих резисторов и ограничением измерительного тока значением 1 мА [19].

Тонкопленочные тензорезисторы

Формирование тензорезистивной схемы выполняется аналогично изготовлению плат микросборок с тонкопленочными резисторами. Тензочувствительные свойства тонких пленок детально рассмотрены в работе [20]. Максимальное значение коэффициента тензочувствительности может на два порядка превышать значение этого параметра для массивного материала. Для керметных пленок и пленок тантала пониженной плотности могут быть достигнуты значения коэффициентов тензочувствительности $\gamma = 10...50$ при удовлетворительной стабильности и толщине, значительно меньшей, чем обычно в резисторах микросборок. Коэффициент продольной тензочувствительности хромосилицидных резисторов плат микросборок составляет примерно 1,3 [21]. Для пленок сплава Х20Н80 с удельным сопротивлением 5 Ом/□ значение $\gamma = 2{,}03...2{,}08$, что соответствует значениям коэффициента тензочувствительности нихромовой проволоки [22, 23]. Температурный коэффициент тензочувствительности $\beta \approx -\alpha$, где α — ТКС резистора, и поэтому в качестве тензорезисторов целесообразно использовать элементы с ТКС, близким к нулю; подобные элементы обладают также максимальной стабильностью [24]. Для компенсации температурного влияния часто в плече измерительного моста используют два тензорезистора с одинаковым ТКС. Тензопреобразователем является только один резистор, а второй служит для компенсации температурного изменения сопротивления первого.

Адсорбционно-чувствительные резисторы

К группе адсорбционно-чувствительных резисторов следует отнести элементы, электропроводность которых изменяется в зависимости от состояния парогазовой среды над воспринимающей поверхностью. Это элементы датчиков состава газа, датчиков вакуума, датчиков влажности.

Тонкопленочные газовые сенсоры состоят как минимум из трех функциональных резисторов: нагревательного элемента, терморезистора и асорбционно-чувствительного резистора. Конструкции таких сенсоров отличатся прежде всего вариантами взаимного расположения указанных элементов; пример одной из конструкций, в которой пленочный кольцевой нагреватель является внешним измерительным электродом резистивного датчика, приведен на рис. 1 (контуром обозначены границы мембраны) [25]. Из-за большого удельного сопротивления асорбционно-чувствительного слоя электроды резистора выполняются преимущественно в виде гребенчатой структуры, поверх системы электродов которой наносится пленка полупроводника (рис. 2). В качестве материалов в зависимости от вида детектируемых газов используются как неорганические соединения (оксиды металлов SnO_2, ZnO, Bi_2O_3, тройные соединения), так и органические полупроводники — порфины, фталоцианины, ароматические углеводороды с большим удельным весом [26].

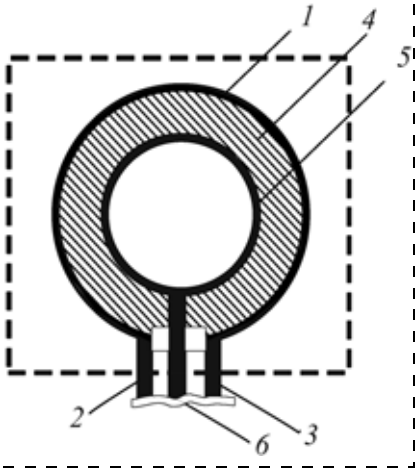

Рис. 1. Фрагмент конструкции тонкопленочного газового сенсора: *1* — внешний измерительный электрод, являющийся одновременно нагревателем; *2* и *3* — контакты внешнего измерительного электрода; *4* — газочувствительный слой; *5* —внутренний измерительный электрод; *6* — контакт внутреннего измерительного электрода

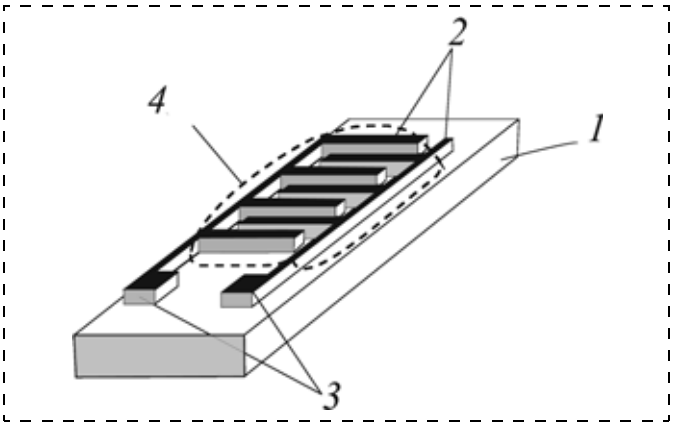

Рис. 2. Фрагмент конструкции сенсора с электродами гребенчатой формы:

1 — подложка; *2* — электроды гребенчатой формы; *3* — контактные площадки; *4* — контур чувствительного слоя

Нанесение пленок SnO_2, которые являются наиболее применяемым металлооксидным полупроводником, реализуется следующими способами [27...30]:

- осаждение слоя олова методами ФОГФ с последующим окислением на воздухе при температуре 140 °С;
- осаждение слоя SnO (термическое испарение в вакууме порошка SnO) с последующим доокислением до SnO_2;
- плазмохимическое осаждение из смеси паров тетрахлорида олова и кислорода;
- осаждение из раствора пленки металлорганического соединения и ее последующая термообработка.

Фотолитографическое формирование элементов на пленках SnO_2 осуществляется преимущественно с использованием плазмохимического травления в смесях хлоридов (CCl_4, $SiCl_4$, BCl_3) с кислородом, аргоном, азотом, в смеси водорода с 8...10 % CCl_4 [31]. Жидкостное травление является нетехнологичным; основывается на использовании реакции замены олова активным металлом, например цинком [32]. Пленки, наносимые из растворов металлорганических соединений и обработанные при температурах ниже полного разложения соединений, обладают способностью травиться в слабых щелочных растворах. Температуры, используемые для частичного разложения металлорганических соединений олова, составляют: для гексаната олова 110...130 °С, для неодеканата олова 240..250 °С, для алкооксида олова 120...130 °С. Пленки промежуточного соединения олова и экспонированные участки фоторезиста ФП-РН7 толщинами около 1 мкм удалялись за время в пределах 1...1,5 мин в процессе обработки проявителем (0,6 % раствор КОН) [33].

Для повышения селективности или чувствительности элемента в состав материала вводят добавки различных химических элементов. Например, добавки V, Nb, Ti повышают чувствительность сенсора к C_3H_6, Cd — к N_2H_4, Au — к Cl_2 [26]. Модифицирование пленочной структуры осуществляется изменением состава исходного материала, введением примесей в состав парогазовой среды при осаждении и другими приемами. Добавки также могут быть локализованы в виде паропроницаемого каталитического слоя на поверхности или во внутреннем пространстве чувствительной пленки [34].

Примером органических полупроводников является медная комплексная соль фталоционина CuPc (техническое название — пигмент голубой фталоцианиновый; химическая формула — $C_{32}H_{16}N_8Cu$). При использовании в качестве материала электронной техники исходный технический продукт подвергают многоступенчатой очистке. Фталоцианиновые пленки в диапазоне толщин от нескольких монослоев до 10 мкм получают сублимацией в вакууме, плазменной полимеризацией, гидрофильным методом. Стабилизация параметров газочувствительных слоев CuPc достигается путем многократного нагрева и охлаждения в вакууме и соответствующей газовой среде [35]; облучение пленок CuPc рентгеновским излучением с энергией 150...200 кэВ и дозой 4,5...9,0 кР привело к увеличению в 3...4 раза чувствительности к H_2S [35]. Получение необходимой конфигурации элементов на пленках CuPc обеспечивается либо использованием свободной маски (при термическом испарении в вакууме), либо жидкостным травлением через фоторезистивную маску [37]. Безметалльные фталоцианины хорошо травятся в высокочастотной кислородной плазме, но обладают высокой стойкостью к процессам ионно-лучевого травления [38].

Простейшими датчиками вакуума являются резисторы в виде прямоугольного элемента, выполненного из поликристаллических пленок элементарных полупроводников (Si или Ge) на диэлектрической подложке, и двух концевых контактных площадок [39, 40]. Пленки Ge толщиной 0,01...0,1 мкм работают в диапазоне 10^{-2}...10 Па, при этом изменение их сопротивления относительно сопротивления при атмосферном давлении составляет от 5 до 1 %.

Конструкция датчиков влажности (гигристоров) аналогична структуре, приведенной на рис. 2. В качестве исходного материала чувствительного элемента используют гелеобразный раствор, состоящий из гигроскопического вещества (например, хлорида лития) и связующего. Нанесение чувствительной пленки осуществляется вытягиванием подложки из раствора с определенной скоростью [16].

Магниторезистивные элементы

Магниторезисторы применяются в качестве чувствительных элементов в функционально-ориентированных магнитных датчиках: скорости и направления вращения, угла поворота и положения, линейного перемещения, расхода жидкости и газа, электрического тока и напряжения и т. п.

В основе принципа действия датчиков лежит анизотропный магниторезистивный эффект (АМР). Анизотропное магнитосопротивление —эффект, обнаруженный Уильямом Томсоном в 1857 г., состоит в том, что сопротивление ферромагнитной системы, измеренное при токе, текущем вдоль намагниченности структуры, отличается от сопротивления, измеренного при токе, текущем перпендикулярно намагниченности. Механизм эффекта обусловлен спин-орбитальным взаимодействием, проявляющимся в виде различного рассеяния носителей тока на де-

фектах и колебаниях решетки в зависимости от спина носителей. Характерное значение эффекта составляет 1...2 %.

Тонкопленочные магниторезисторы больше подходят для регистрации слабых магнитных полей (до 10...30 мТл), иногда близких к пороговым значениям. При этом следует помнить, что порог чувствительности определяется минимальным уровнем магнитного излучения, регистрируемым преобразователем магнитного поля при отношении сигнал/шум, равном единице. Порог чувствительности характеризуется многими параметрами чувствительного элемента: остаточным напряжением, уровнем собственных шумов, током управления и т. д. Значение остаточного напряжения зависит от направления и силы тока управления, от температуры элемента. Температурное изменение чувствительности (выходного сигнала) магниторезисторов на основе ферромагнитных пленок при питании от источника постоянного тока составляет около −0,04 % на градус Цельсия, что в 5...10 раз меньше, чем у "монолитных" магниторезисторов. Кроме того, при использовании в ограниченном динамическом диапазоне (до 10 мТл) тонкопленочные магниторезисторы выгодно отличаются от других преобразователей магнитного поля [16].

Примером простейшего магниторезистора служит конструкция, содержащая диэлектрическую подложку, на которую нанесены подслой из материала, способствующего повышению содержания в резистивном слое кристаллитов определенной ориентации (никель, кобальт, медь, хром, платина, палладий, золото, серебро), слой анизотропного резистивного материала (висмута) и концевые контакты [41].

Магниторезистивный эффект наблюдается в пленках многих материалов. В работе [42] сообщается, что тонкие, легированные кремнием, пленки InSb с подвижностью электронов $3 \cdot 10^4$ см$^2 \cdot$ В$^{-1} \cdot$ с$^{-1}$, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на полуизолирующих подложках GaAs, показывают слабую температурную зависимость удельного сопротивления в широком диапазоне температур при сохранении высокого магниторезистивного эффекта.

Конструкция магниторезисторов из ферромагнитных пленок не отличается от конструкций других разновидностей магниторезисторов, за исключением того, что магниточувствительный элемент изготовлен по специальной тонкопленочной технологии. Напыление магниточувствительного слоя, как правило, происходит при воздействии магнитного поля. Для создания магниточувствительных элементов используют тонкие одно- и многослойные пленки никель-кобальтовых (Ni—Co), никель-железных (Ni—Fe) и других сплавов. В качестве подложек применяют стекло, ситалл или кремний, обладающие большой теплопроводностью и коэффициент термического расширения которых близок к ТКР используемых пленок [16, 43].

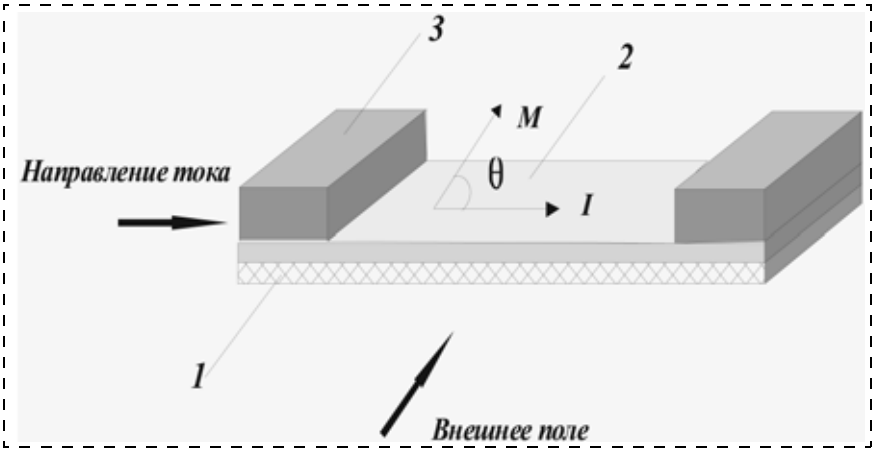

Рис. 3. Магниточувствительный резистивный элемент:
1 — подложка; *2* — пермаллоевая тонкая пленка; *3* — контактная площадка

АМР заключается в способности длинной пермаллоевой (NiFe) пленки изменять свое сопротивление в зависимости от взаимной ориентации протекающего через нее тока и направления ее вектора намагниченности (рис. 3). Внешнее магнитное поле поворачивает вектор намагниченности пленки M на угол θ, который зависит от направления и величины этого поля. При этом сопротивление пленки

$$R = R_o + \Delta R \cos 2\theta,$$

где $\Delta R = (\Delta\rho/\rho) R_o \cos^2\theta$; $\Delta\rho/\rho$ — коэффициент АМР эффекта, определяемый свойствами материала пленки и замеряемый в поле насыщения кривой намагничивания.

Для построения датчика четыре идентичных магниторезистивных пленки соединяются по мостовой схеме и образуют плечи моста. На практике для увеличения чувствительности датчика плечи моста формируют из нескольких магниторезистивных полосок, параллельно ориентированных на подложке, последовательно между собой соединенных с помощью алюминиевых перемычек и защищенных сверху нитридом тантала. Мостовой магниторезистивный датчик имеет ось предпочтительного намагничивания или легкую ось, которая принудительно формируется в процессе напыления пленки в магнитном поле. Датчик наиболее чувствителен к полям, направленным перпендикулярно этой оси в том случае, если вектор намагниченности совпадает с этой осью.

Для функционирования магниточувствительного резистивного элемента необходимы:

- организация смещения для перевода вольт-эрстедной характеристики в линейную область;
- устранение гистерезиса и перевод элемента в режим максимальной чувствительности;
- устранение влияния посторонних магнитных полей.

В исходном состоянии, сразу после изготовления или в результате воздействия разрушающего магнитного поля величиной больше 1,5...2,0 мТл магнитная структура пленки не определена. Это объясняется хаотичной ориентацией образующих ее магнитных доменов. Такое состояние датчика непригодно для измерения ввиду нулевой чувствительности. Для ориентации вектора M вдоль легкой оси используют

специальную катушку Set/Reset. Подача короткого установочного импульса тока 2...5 А длительностью 1...2 мкс через катушку Set/Reset формирует поле, ориентирующее магнитные домены сенсора в направлении легкой оси. Эта процедура возвращает прибор в режим максимальной чувствительности и восстанавливает все его характеристики, сохраняющиеся до очередного попадания сенсора в сильное магнитное поле [44].

В [45] приводится описание одной из конструкций магниторезистивного датчика. На подложке с диэлектрическим слоем размещены четыре ряда тонкопленочных магниторезистивных полосок, ориентированных под углом +45° или −45° относительно оси легкого намагничивания. Полоски последовательно соединены между собой немагнитными токопроводящими перемычками, образуя при этом мостовую схему. Поверх магниторезистивных полосок на изолирующем слое сформирован проводник управления в виде меандра, рабочие части которого перпендикулярны оси легкого намагничивания. На следующем изолирующем слое выполнена планарная катушка, рабочие части которой расположены вдоль оси легкого намагничивания. Сверху всей тонкопленочной системы расположен защитный слой. На рис. 4 представлено вертикальное сечение магниторезистивного датчика.

Магниторезистивный датчик имеет следующие типичные параметры: значение AMP эффекта — 1,5 %; ширина магниторезистивной полоски — 20 мкм; длина магниторезистивной полоски — 300 мкм; толщина ферромагнитной пленки 20 нм; в качестве изолирующих и защитных материалов (толщиной до 0,5 мкм) могут быть использованы SiO_2, Si_3N_4 и другие диэлектрики; в целях обеспечения долговременной стабильности характеристик магниторезистора в качестве основы слоев, примыкающих к магниточувствительной пленке, целесообразно использовать бескислородосодержащие материалы.

Магниточувствительные элементы в виде отдельных бескорпусных элементов и магниторезисторные мосты в пластмассовых корпусах выпускаются рядом отечественных и зарубежных фирм (характеристики приведены в работе [46]).

Современное направление в области создания магниторезистивных чувствительных элементов определяется как спинтроника [47]. Термин "спинтроника" произошел от англоязычного выражения "spin electronics" ("спиновая электроника"; иногда ее называют и "магнитоэлектроникой"). Спинтроника — область науки, изучающая взаимодействие собственных магнитных моментов электронов (спинов) с электромагнитными полями. Одним из основополагающих открытий, сыгравших значительную роль в развитии спинтроники, является открытие гигантского магнитосопротивления (GMR). Эффект гигантского магнитосопротивления первоначально наблюдался в многослойных структурах, получивших название *спиновых вентилей* (spin valve), которые состоят из чередующихся магнитных и немагнитных проводящих слоев [48, 49], например, $(Co/Cu)_n$ или $(Fe/Cr)_n$. Такие структуры называют магнитными сверхрешетками. Толщины слоев, как

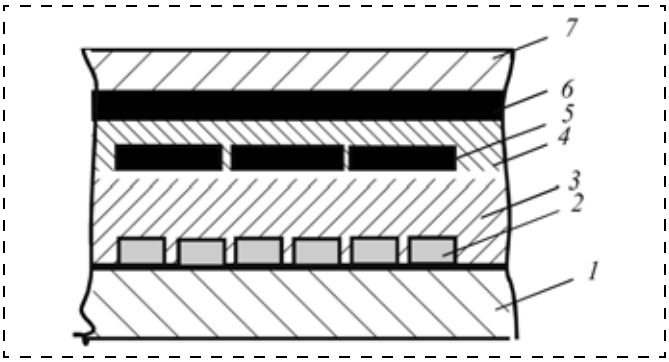

Рис. 4. Сечение магниторезистивного датчика:
1 — кремниевая подложка; *2* —магниторезистивные полоски (Ni—Co—Fe, 0,02 мкм); *3* — первый диэлектрик; *4* — участки проводника катушки смещения (Al + 4 % Cu, ~ 0,5 мкм); *5* — второй диэлектрик; *6* —участок проводника катушки сброса/установки (Al + 4 % Cu, ~ 1,0 мкм); *7* — защита

правило, составляют доли — единицы нанометров. Эффект состоит в том, что сопротивление структуры, измеренное при токе, текущем в плоскости системы, зависит от взаимного направления намагниченности соседних магнитных слоев. Так, при параллельной намагниченности слоев сопротивление, как правило, низкое, а при антипараллельном — высокое. Поскольку не очень большое внешнее магнитное поле не оказывает влияния на антиферромагнетик, то намагниченность магнитного слоя оказывается закрепленной (это явление получило название однонаправленной, или обменной, анизотропии [50]). Относительное изменение сопротивления системы составляет от 5 до 50 % в зависимости от материалов, числа слоев и температуры.

Магниточувствительные элементы GMR резисторов представляют собой многослойные тонкопленочные структуры с субмикрометровой шириной. Фирмой Siemens и другими зарубежными производителями освоен выпуск высокочувствительных тонкопленочных магниторезисторов серии GMR. Магниторезисторы серии GMR размещены в стандартных микроминиатюрных пластмассовых корпусах типа SOH, SMT, MW-6. Габаритные размеры магниторезисторов GMR S4 — 3,2 × 2,3 × 0,7 мм, остальных (GMR S6, GMR B6, GMR C6) — 2,9 × × 1,3 × 1,1 мм. Диапазон рабочих температур всех магниторезисторов составляет от −40 до +150 °С [46].

Следующий прорыв в области эффектов магнитосопротивления обусловлен обнаружением эффекта *туннельного магнитосопротивления* (Magnetic Tunnel Junction — MTJ) [51]. Он имеет место в системах, в которых место проводящей немагнитной прослойки занимает тонкий (1...2 нм) слой изолятора. Сопротивление такой структуры сильно зависит от относительного направления намагниченности слоев благодаря различным вероятностям прохождения носителей с противоположными ориентациями спина через туннельный барьер. Оказалось, что для весьма распространенного аморфного изолирующего слоя Al_2O_3 относительное изменение сопротивления достигает 70 % при комнатной температуре. Еще более перспективным является барьер в виде монокристаллического слоя MgO, который позволяет достичь значений до 500 % при комнатной температуре.

Следует подчеркнуть, что главной целью всех исследований по туннельному магнитосопротивлению является изготовление магниторезистивных туннельных контактов в связи с задачей создания неразрушающейся, нестираемой, стойкой к радиационному воздействию оперативной памяти (MRAM — magnetic random access memory), которая сможет заменить традиционную память на полупроводниках.

Технологические требования к образцам с MTJ, которые могли бы быть использованы в электронных устройствах, достаточно высоки. Прежде всего, для получения разумной силы тока слой оксида должен быть достаточно тонким. В то же время весьма нежелательно появление внутри барьера пор (pinholes) и точек пробоя, которые приводят к шунтированию тока и значительному уменьшению эффекта MTJ. Эти требования являются взаимно исключающими и значительно тормозят применение эффекта MTJ в спинтронике. Физики обратили свое внимание и на "естественно-слоистые" материалы; именно в таком материале — манганите лантана — был в 1994 г. открыт новый, гораздо более сильный эффект — колоссальное магнитосопротивление, причина которого пока не выяснена до конца, но сенсоры на основе которого уже запатентованы [52]. Изучение процессов полевого и токового перемагничивания слоистых ферромагнитных структур с наноразмерными элементами является актуальной задачей для разработки базовых элементов спинтроники, перспективных для создания микро- и наноразмерных магниточувствительных сенсоров, предназначенных для широкого применения в технике, включая микроэлектромеханические системы [53].

В заключение следует отметить, что в части применяемости менее всего "повезло" адсорбционно-чувствительным резисторам. Для анализа газовой среды наиболее приемлемыми по таким характеристикам, как воспроизводимость результатов измерений и срок службы, являются агломеративные датчики из металлоксидных полупроводников. Для контроля малой концентрации паров воды в гермообъемах микроэлектронной аппаратуры, по-видимому, целесообразно применять способы контроля, например, основывающиеся на определении точки росы.

Список литературы

1. **Смолин В. К.** Температурный коэффициент сопротивления как универсальная характеристика пленочных резисторов // Конверсия в машиностроении. 2004. № 5. С. 49—51.

2. **Ефимов Е. П., Иванова А. Б., Курчаева Н. Е.** и др. Терморезистивные свойства пленок хрома, никеля и платины // Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты. 1977. Вып. 4 (23). С. 47—53.

3. **Таблицы** физических величин: Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.

4. **Mayadas A. F., Shatzkes M.** Модель электрического сопротивления для поликристаллических пленок: случай произвольного рельефа внешней поверхности // Phys. Rev. 1970. V. 1. N 4. P. 1382.

5. **Кричевец Ю. М., Титаренко И. М., Мещеряков А. Г.** Осцилляция проводимости пленок в дисторсионном поле // Обмен производственно-техническим опытом. 1989. Вып. 11. С. 53—54.

6. **Teller C. R., Tosser A. J.** // Thin Solid Films. 1977. V. 43. N 3. P. 261—266.

7. **Teller C. R., Tosser A. J.** // Thin Solid Films. 1977. V. 33. N 2. L. 19.

8. **Чопра К. Л.** Электрические явления в тонких пленках. М.: Мир, 1972. 436 с.

9. **Способ** контроля удельного поверхностного сопротивления тонких резистивных пленок в процессе нанесения: Пат. РФ № 2032237, опубл. 27.03.95 / Смолин В. К., Уткин В. П.

10. **Способ** изготовления пленочных резисторов: Пат. РФ № 2109360 / Скупов В. Д., Смолин В. К.

11. **Способ** изготовления пленочных резисторов: Пат. РФ № 2109360 / Скупов В. Д., Смолин В. К.

12. Способ изготовления тонкопленочных резисторов: Пат. РФ № 2183876 опубл. 20.04.98 / Смолин В. К., Кондрашевский В. П.

13. **Fendroch J. J., Hong L. M.** Paralle-gup welding to verythik mttallization for high temperature microelectronic interconnects // JEEE Trans. Compon. Hidrids and Manuf. Technol. 1990. V. 13. N 2. P. 376—382.

14. **Аржанников А. А., Куликова С. В., Москалева Н. Н.** и др. Исследование возможности создания платинового термометра с ТКС, близким к значению его для платиновой проволоки // Приборы и системы управления. 1993. № 2. С. 18—10.

15. **Способ** формирования тонкопленочных элементов на основе платины: Пат. РФ № 2110115, опубл. 27.04.98 / Смолин В. К., Кондрашевский В. П.

16. **Фрайден Дж.** Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2005. 592 с.

17. **Датчик** температуры: а. с. СССР № 1086896 опубл. БИ № 4, 1984 / Чигиринский Ю. И. и др.

18. **Тонкопленочный** датчик температуры и способ его получения: а. с. СССР № 1333104 / Морозов В. П., Тропяк Б. Д.

19. **Аш Ж., Андре П., Бофрон Ж.** и др. Датчики измерительных систем. В 2-х кн. Кн. 1: Пер. с франц. М.: Мир, 1992. 480 с.

20. **Мейскин З. Г.** Несплошные и керметные пленки // Физика тонких пленок. М.: Мир, 1978. Т. 8. С. 106—179.

21. **Лугин А. Н.** Тензоэффект в пленочных резисторах // Изв. вузов. Сер. Электроника. 2000. № 2. С. 55—59.

22. **Сысоев В. С., Смолин В. К.** Датчик контроля физических параметров полимерных материалов: а. с. СССР № 920361, опубл. 15.04.82.

23. **Smolin V. K., Sysoev V. S.** Metal-film technological sensor. // MST, Proc. abstracts, St. Petersburg, June 22—23, 1993. — P. 51.

24. **Смолин В. К.** Температурный коэффициент сопротивления как характеристика стабильности тонкопленочных резисторов // Новые промышленные технологии. 2001. Вып. 2—3. С. 17—18.

25. **Резистивный** газовый датчик: Пат. РФ № 2038589, опубл. 27.06.97 / Жуков Г. Ф., Смолин В. К.

26. **Арутюнян В. М.** Микроэлектронные технологии — магистральный путь для создания химических твердотельных сенсоров // Микроэлектроника. 1991. Т. 20. Вып. 4. С. 337—355.

27. **Смынтына В. А., Лепих Я. И., Римашевский А. А.** и др. Полупроводниковые пленочные элементы, адсорбционно-чувствительные к кислороду // Приборы и системы управления. 1989. № 2. С. 32—34.

28. **Афанасьев В. П., Крамар Г. П., Минина Е. В.** и др. Фоторезисторы с памятью и электрической подстройкой параметров // Приборы и системы управления. 1989. № 2. С. 31—32.

29. **Способ** изготовления полупроводникового датчика состава газа: а. с. СССР № 1225428, опубл. 03.08.84 / Бутурлин А. И., Габузян Т. А., Крутоверцев С. А. и др.

30. **Бутурлин А. И.** и др. // Зарубежная электронная техника. № 10, 1983. С. 3.

31. **Способ** ионно-плазменного травления пленок на основе оксидов индия-олова: а. с. СССР № 1466588, опубл. 20.10.86 / Акашкин А. С., Ветошкин В. М., Печенкин Н. Е.

32. **Пресс В. П.** Фотолитографические методы в технологии полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: Сов. радио, 1978. С. 96.

33. **Смолин В. К.** Методы управления процессами обработки резистивных масок на основе позитивного фоторезиста // Новые промышленные технологии. 1999. Вып. 1—2. С. 18—25.
34. **Siroky K.** Polovodicove detektory plynu. Sb. VSCHT Praze. P. 6. 1983. P. 79—103.
35. **Смолин В. К.** Фталоцианины как развивающийся класс материалов электронной техники // Новые промышленные технологии. 1999. Вып. 1—2. С. 30—36.
36. **Способ** изготовления чувствительного элемента газового датчика: Пат. РФ № 20738523, опубл. 20.02.97 / Скупов В. Д., Киселев В. К., Смолин В. К.
37. **Раствор** для размерного травления пленок фталоцианина меди: Пат. РФ 2090652, опубл. 20.09.95 / Смолин В. К., Голубева Л. Н., Гусев В. К.
38. **Способ** получения рельефного изображения: а. с. СССР № 1387704, опубл. 14.04.86 / Мишенская Т. А., Кривоспицкий А. Д., Селиванов Г. К. и др.
39. **Датчик** давления: а. с. СССР № 609070, опубл. 30.05.78 / Семов Ю. И., Бандурина Л. Т., Матвеев Н. А. и др.
40. **Бандурина Л. Т.** Тонкопленочный датчик вакуума // Получение и свойства тонких пленок. Киев: Наукова думка, 1982. С. 98—99.
41. **Магниторезистор:** а. с. СССР № 544020, опубл 25.01.77 / Новиков В. Н.
42. **Okamoto A., Yoshda T., Maramatsu S., Shibasaki I.** Magneto-resistance effect in InSb thin film grown molecular beam epitaxy // J. Cryst. Growth 1999. V. 201—202. P. 765—768.
43. **Коген М. С.** Ферромагнитные свойства пленок // Технология тонких пленок (справочник) / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга: Пер. с англ. Т. 2. М.: Советское радио, 1977. С. 477—577.
44. **Маргелов А.** Магниторезистивные датчики положения компании Honeywell // Chip news. 2005. № 4. С. 55—58.
45. **Магниторезистивный** датчик: пат. РФ № 2279737, опубл. 10.07.2006 / Дягилев В. В., Касаткин С. И., Муравьев А. Н. и др.
46. **Бараночников М. Л.** Микромагнитоэлектроника. Т. 1. М.: ДМК Пресс, 2001. 544 с.
47. **Огнев А. В., Самардак А. С.** Спинтроника: физические принципы, устройства, перспективы // Вестник ДВО РАН. 2006. № 4. С. 70—80.
48. **Baibich M. N., Broto J. M., Fertetal A.** Phys. Rev. Lett. 1988. 61. P. 2472.
49. **Binach G., Grunberg P., Creuzetetal G.** Phys. Rev. B. 1989. 39. P. 4828.
50. **Кринчик Г. С.** Физика магнитных явлений. М.: Изд. МГУ, 1976. 367 с.
51. **Chappert C., Fert A., Van Dau F.** Nature Materials. 2007. V. 6. P. 813.
52. **Никитин С. А.** Гигантское магнитосопротивление // Соросовский образовательный журнал. 2004. № 2. С. 92—98.
53. **Rife J. C.** et al. Design and performance of GMR sensors for the detection of magnetic microbeads in biosensors // Sensors and Actuators A: Physical 2003. V. 107. N 3. P. 209—218.

УДК 533.608.681.121

А. А. Бобров, инженер,
Н. А. Дюжев, канд. физ.-мат. наук, зам. директора ЦКП,
А. М. Медников, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр.,
М. А. Махиборода, зам. нач. отд.,
А. Ф. Попков, д-р физ.-мат. наук, зам. руковод. ЦКП,
И. Г. Шкуропат*, вед. инж.,
Н. К. Матвеева*, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Московский институт электронной техники,
Москва, e-mail: afpopkov@inbox.ru
* ФГУП "НИИФП им. Ф. В. Лукина"

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДНОГО ОТКЛИКА РЕЗИСТИВНОГО АНЕМОМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ РАСХОДА ГАЗА МЕМБРАННОГО ТИПА В СТАЦИОНАРНОМ И ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМАХ НАГРЕВА

Описаны конструкция и принцип работы разработанного терморезистивного анемометричного преобразователя для газовых сред мембранного типа. Приводятся результаты измерений выходного разностного сигнала преобразователя в стационарном и импульсном режимах. Приведены оценки динамического диапазона измерений преобразователя и оценка ресурса его работы в автономном режиме.

Ключевые слова: *нано- и микросистемы, преобразователь расхода газа, термокомпенсированная мембрана, терморезисторы, динамический диапазон измерений, скорость потока*

Введение

Современные условия работы телекоммуникационных систем, систем газоснабжения, а также любых систем и устройств (как бытовых, так и промышленных), в состав которых входят пневматические элементы, требуют возможности удаленного контроля параметров газовой среды. Выпускаемые отечественные механические бытовые счетчики газа не могут быть эффективно использованы для решения подобных проблем. В настоящее время в промышленности наиболее широко применяют следующие методы контроля расхода газов: метод переменного перепада давлений (диафрагменные расходомеры); метод постоянного перепада давлений (ротаметры); тахометрический метод (турбинные расходомеры); гидродинамический частотный метод (вихревые расходомеры); термоанемометрический метод (датчики массового расхода газа) и др. Данные методы известны уже давно и признаны классическими, но измерительные приборы продолжают развиваться и совершенствоваться. Гибридные сенсоры по таким показателям, как мощность, быстродействие, надежность и т. д., уступают интегральным сенсорам. Анализ показывает, что наиболее перспективным вариантом изготовления сенсоров по технологии МЭМС является кремниевая мембранная технология [1, 2].

Возникающие в настоящее время системные задачи учета и распределения потребления газа могут быть решены только при использовании датчиков расхода на основе нано- и микросистем. На данном рынке преобладают изделия зарубежных фирм. Необходимо учитывать, что в отечественной практике системные решения в данной области не внедря-

лись, а зарубежные системы в основном ориентированы на применения в интеллектуальных зданиях, инженерные сети которых изначально приспособлены для диагностики и мониторинга на основе традиционных приборных средств. Ввиду этого проблема разработки и производства отечественных электронных счетчиков газа имеет большое народнохозяйственное значение.

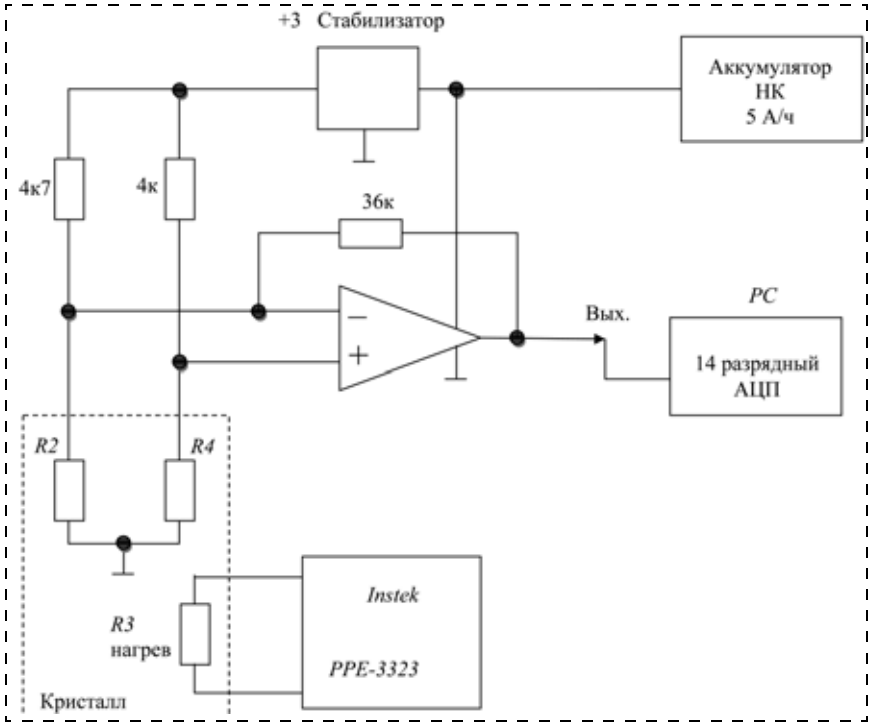

Рис. 2. Принципиальная схема первичного предусилителя разностного сигнала анемометрического преобразователя в схеме измерений скорости протекания (расхода) воздушного потока

Объект исследования

С учетом анализа особенностей зарубежных разработок чувствительных элементов датчиков расхода газа фирм Bosch, Siemens и Honeywell [3] нами разработан чувствительный элемент на базе платиновых резисторов, сформированных на тонкой мембране, который позволяет менять режимы измерения расхода газа (см. ниже) и может использоваться как универсальный терморезисторный элемент в датчиках газового потока различного назначения. На рис. 1 (см. третью сторону обложки) схематически представлено топологическое изображение кристалла разработанного термочувствительного датчика расхода.

Разработанный нами первичный термоанемометрический преобразователь (далее ПТП) серии SRV-3 содержит кристалл с кремниевой мембраной и терморезисторами, который вставлен в держатель, представляющий собой специальную плату либо готовый металлокерамический корпус. При формировании данного преобразователя частично были использованы процессы базовой технологии изготовления электронных сенсоров на основе нано- и микросистем, разрабатываемой на базе Научно-технологического центра "Нано- и микросистемная техника" при Московском институте электронной техники. Отличительной особенностью данной технологии является переход от единичных к групповым операциям изготовления МЭМС-приборов [1, 2].

На мембрану кремниевого кристалла нанесены пять меандровых резисторов $R1$, $R2$, $R3$, $R4$ и $R5$, покрытых защитным слоем (рис. 1, см. третью сторону обложки). Центральный резистор $R3$ номиналом в 50 Ом, выполняет функцию нагревателя. Этот резистор формирует при отсутствии обдува симметричное распределение теплоты по кристаллу. Соседние термочувствительные резисторы $R2$ и $R4$ номиналами по 1,67 кОм каждый служат для регистрации значения скорости протекания над преобразователем газа, в данном случае воздуха. Для этого измерительные резисторы подключают к мостовой схеме Ветстоуна (рис. 2). При обдуве кристалла теплота в нем перераспределяется, что приводит к изменению сопротивлений в резисторах, а следовательно, создает дисбаланс в мостовой схеме. Далее полученный из этой схемы слабый сигнал усиливается и передается на аппаратуру вывода информации.

Два крайних боковых резистора $R1$ и $R5$ находятся на кристалле вне области мембраны и предназначены для контроля температуры потока газа и подгонки номинала термосопротивления. Кроме того, один из этих резисторов обеспечивает возможность организации цепей обратной связи для решения различных задач, например, управления током нагревателя для компенсации погрешности, обусловленной колебаниями температуры окружающей среды.

Многослойная диэлектрическая мембрана (см. рис. 1) выполнена в виде прямоугольника размером 0,6 × 1,8 мм. Толщины образующих ее слоев подобраны таким образом, чтобы обеспечить минимальные тепловые потери в подложку и минимальную тепловую связь между элементами.

Экспериментальная установка и измерения

Для измерения выходных характеристик ПТП нами использовался специальный газодинамический стенд, включающий (рис. 3):

- пневматическую систему с компрессором, ресивером и воздушными магистралями;
- регулятор расхода газа РРГ-12;
- оснастку для установки макетных образцов ПТП в воздушную магистраль;
- блок управляющей аппаратуры с цифровым интерфейсом;
- блок измерительного оборудования с цифровым интерфейсом;
- персональный компьютер, работающий под управлением ОС Windows XP или аналога.

Стенд представляет собой магистраль, в которой формируется воздушный поток. Давление на входе магистрали создает компрессор, и оно может варьи-

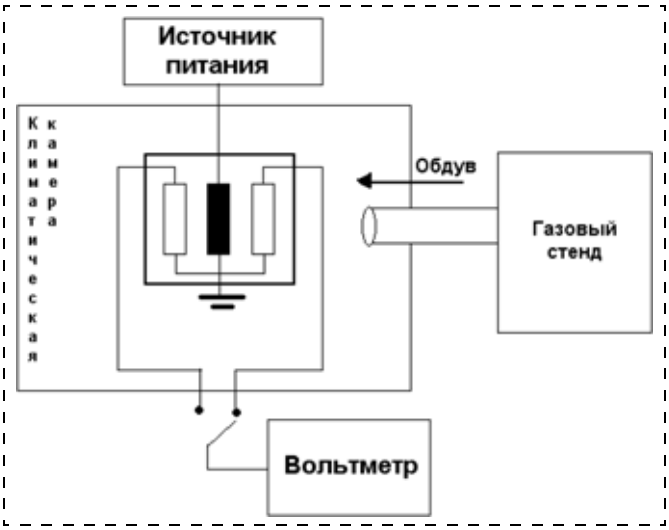

Рис. 3. Структурная схема измерительного стенда для измерений потоков воздуха

роваться в пределах 0,1...1 атм. Скорость воздушного потока в магистрали и массовый расход воздуха можно задавать с помощью регулятора расхода газа РРГ-12 (далее РРГ). Верхний предел регулирования расхода для данного прибора составляет 3600 л/ч. Макетный образец ПТП в специальной оснастке устанавливается в разрез воздушной магистрали. В данной оснастке образец расположен на одном уровне с внутренней стенкой канала диаметром 4 мм, по которому проходит весь воздушный поток.

Блок управляющей аппаратуры содержит источник напряжения, генератор сигналов специальной формы и блок управления РРГ. Все приборы имеют цифровые интерфейсы и в процессе измерений управляются программой ПК. Нагреватель ПТП работает от внешней аккумуляторной батареи. Блок измерительного оборудования содержит плату с мостовой измерительной схемой для сигнала ПТП и усилителем, а также измерительный преобразователь напряжения E14-440D, осуществляющий аналого-цифровое преобразование выходных сигналов ПТП. Измерения выходных характеристик образцов ПТП на газодинамическом стенде полностью автоматизированы. С этой целью было создано специальное программное обеспечение. Программа управления процессом измерений, установленная на ПК, осуществляет следующие функции:

- обеспечивает интерфейс с оператором стенда;
- обеспечивает задание оператором исходных параметров для измерений;
- управляет РРГ, задавая значения скорости воздушного потока;
- управляет генератором сигналов специальной формы;
- ведет считывание выходных сигналов с измерительного преобразователя напряжения E14-440D;
- ведет обработку измеряемых данных;
- обеспечивает визуализацию и графическую интерпретацию измеряемых данных;
- обеспечивает сохранение результатов измерений в виде массивов данных в текстовых файлах.

Измерения велись в двух режимах — стационарном и импульсном. В стационарном режиме на центральный резистор с источника питания подавалось постоянное напряжение, которое последовательно выбиралось равным 2; 2,5 и 2,9 В. Варьировались также такие параметры, как частота, шаг и число измерений на шаге. При частоте измерений в 5 кГц, шаге в 5 мВ и числе измерений, равном 10 000, фиксируется самая качественная кривая зависимости разностного сигнала от управляющего напряжения на РРГ.

Степень обдува сверху ограничена возможностями РРГ. При подаче на РРГ входного напряжения более 2,6 В значение потока воздуха принимает максимальное значение и далее не растет. Однако, как видно из рис. 4 (см. третью сторону обложки), насыщение зависимости сигнала с датчика от потока воздуха происходит раньше, чем достигается максимум значения потока, обусловленный возможностями РРГ. На основе градуировочных соотношений для РРГ графики пересчитывались в зависимость разностного сигнала от расхода воздуха (рис. 4) и от скорости обдува. Пересчет велся исходя из соотношения: сигнал 10 В на РРГ соответствует расходу 60 л/мин при длительности измерения 4 с.

В импульсном режиме ток на нагреватель подается короткими импульсами максимальной мощности с последующей регистрацией отклика. Этот режим дает возможность использовать сенсор при решении задач измерения быстро меняющихся параметров, а также расширить диапазон измерения сенсора. Импульсный режим позволяет регистрировать большие расходы и обеспечивает наименьшее энергопотребление, что необходимо для автономных приборов со встроенным элементом питания [4, 5].

Измерения в импульсном режиме проводили следующим образом. На центральный резистор с источника питания подавался импульс напряжением в 2,5 В, длительностью 5 мс. Варьировалось управляющее напряжение на РРГ, пересчитанное в скорость обдува. Далее снимались выходные сигналы с разностных резисторов при разных значениях скорости обдува. Сигналы снимались в диапазоне скоростей от 1,25 до 23,75 м/с с шагом 1,25 м/с. Интервал между измерениями был выбран равным 0,01 мс, проводилось 10 000 измерений, т. е. для каждого значения скорости длительность измерения была равна 100 мс. При увеличении длительности импульса до 30 мс наблюдались ощутимые флуктуации выходного сигнала. Подобные флуктуации отмечались также при подаче импульса длительностью в 5 мс. Данные флуктуации вызваны турбулентными эффектами, обусловленными недостатками измерительного блока, и частично устраняются усреднением данных по пяти измерениям для импульса длительностью 30 мс. Для импульса длительностью в 5 мс достаточно трех измерений для почти полного исчезновения флуктуаций (рис. 5).

Инерционность процесса роста выходного сигнала по порядку величины составляет 1—2 мс. Спад сигнала имел задержку длительностью 25...30 мс.

На основе проведенных измерений построены зависимости амплитуд выходных сигналов при длительности импульса 5 и 30 мс от скорости обдува (см. рис. 4). Из приведенных на рис. 4 зависимостей видно, что выход на стационарную кривую достига-

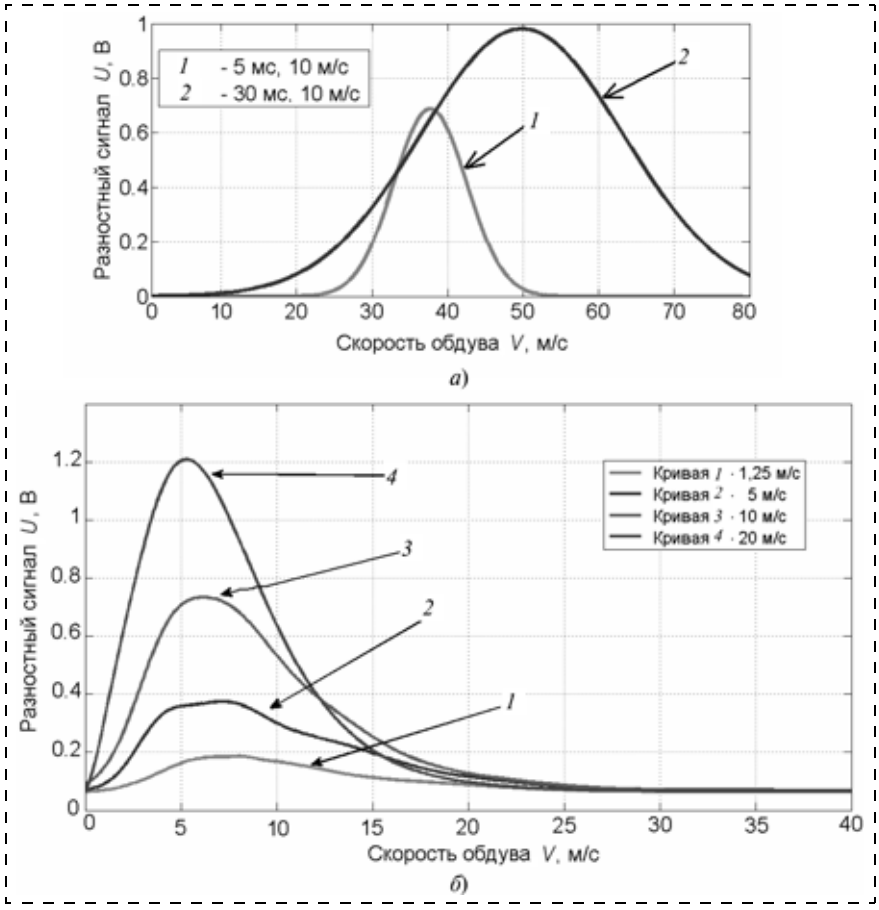

Рис. 5. Выходной сигнал с датчика при импульсном нагреве длительностью 5 и 30 мс при скорости обдува воздуха, равной 10 м/с (*а*), и при разных скоростях обдува (*б*) при длительности импульса нагрева, равной 5 мс. Экспериментальные зависимости усреднены по нескольким измерениям

ется в случае импульсного нагрева длительностью 30 мс. При этом, исходя из ограничений задания шага управляющего сигнала на РРГ и флуктуаций в измерениях при импульсе, равном 5 мс, нижний предел измерения скорости составляет 0,25 м/с, а при импульсе, равном 30 мс, нижний предел измерения составляет 0,1 м/с.

Обсуждение результатов и заключение

Проведенные измерения и сравнение с теорией позволяют определить динамический диапазон анемометрического преобразователя и минимально обнаружимую скорость протекания. Проведем оценку минимально измеримой скорости, определяющей нижнюю границу динамического диапазона преобразователя SRV-3 (см. рис. 4, экспериментальная кривая). Для оценок примем эквивалентную схему измерений в виде мостовой схемы Ветстоуна с параметрами, описанными в нашей работе [4], и, предполагая изменение температуры пропорциональным изменению скорости обдува $\Delta T = \beta V$, как на начальном участке, из сравнения стационарного режима с теорией при подходящем подъеме преобразователя получим

$$V_{\min} = \frac{\Delta T_{\min}}{\beta} = \frac{1{,}2 \cdot 10^{-2}\ \text{К} \cdot \text{м}}{3{,}424\ \text{К} \cdot \text{с}} = 0{,}0035\ \text{м/с}.$$

Верхняя граница динамического диапазона измерений скоростей, вообще говоря, зависит от заданной точности измерений и ограничена скоростью обдува, при которой происходит насыщение сигнала на участке подъема снимаемой экспериментальной кривой из рис. 4 (см. третью сторону обложки). В данном случае максимально измеримая скорость составляет $V_{\max} = 25$ м/с.

Зависимость начального наклона стационарной зависимости сигнала $\beta = \frac{dU}{dV}$, где U — измеряемый сигнал преобразователя; V — скорость протекания газа, от мощности нагрева $\beta = f(P)$, позволяет получить эмпирическое соотношение между минимально измеримой скоростью протекания и мощностью нагрева для данного преобразователя. А именно, приравнивая минимальный шумовой сигнал U_N на выходе преобразователя к измеряемому сигналу $U(P, V_{\min}) \approx \approx \frac{d\beta}{dP} P V_{\min}$, получим $P = \frac{U_N}{V_{\min} d\beta/dP}$. Из этого соотношения можно оценить необходимый номинал нагревательного резистора R_3 при заданной нижней границе измеряемого диапазона скоростей протекания $V_{\min}$ и заданном на нагревателе напряжении U_3 согласно формуле $R_3 = \frac{V_{\min} d\beta/dP}{U_N} U_{cell}^2$. Так, например, для батарейки с напряжением $U_{cell} \approx 3$ В получим $R_3 = \frac{U_{cell}^2}{UI} = 60$ Ом.

Кроме того, мы можем оценить также минимальный измерительный интервал при автономном режиме питания ПТП от батареи с заданным ресурсом работы. Примем для батареи питания ЛИКГП-10 ICP 325582 напряжением $U = 3{,}6$ В ресурс работы равным $It = 10$ А · ч. Тогда полный энергетический ресурс составляет $E = UIt = 3{,}6 \cdot 10$ Вт · ч = 36 Вт · ч = $= 1{,}3 \cdot 10^5$ Дж. Пусть за интервал одного измерения $\Delta\tau$ расходуется энергия измерения δE. Поэтому весь ресурс батарейки выработается за $N = \frac{E}{\delta E}$ измерений. Если принять за межповерочный интервал время $t = 6$ лет = 52 560 ч = $1{,}9 \cdot 10^8$ с, то на интервал между измерениями приходится время $\Delta\tau = t\frac{\Delta E}{E}$.

Примем сопротивление резистора, равным 50 Ом, напряжение 2,5 В, ток 50 мА.

Статический режим: время разогрева $\tau_S = 4000$ мс, энергия разогрева $\delta E = 50$ мА · 2,5 В · 4 с = $= 0{,}5$ Дж. Интервал между измерениями $\Delta\tau = 730$ с.

Квазистатический режим: время разогрева τ_S = = 30 мс, энергия разогрева δE = 50 мА · 2,5 В · 0,03 с = = $3{,}75 \cdot 10^{-3}$ Дж. Интервал между измерениями $\Delta\tau$ = 5,5 с.

Динамический режим: время разогрева τ_S = 5 мс, энергия разогрева δE = 50 мА · 2,5 В · 0,005 с = = $6{,}25 \cdot 10^{-4}$ Дж. Интервал между измерениями $\Delta\tau$ = 0,9 с.

Из приведенных оценок видно, что применение более коротких импульсов позволяет снизить энергопотребление, но увеличивает нижнюю границу динамического диапазона обратно пропорционально падению амплитуды отклика.

Таким образом, проведенные измерения выходных характеристик разработанного нами первичного термоанемометрического преобразователя расхода газа мембранного типа показывают, что он может успешно работать в импульсном режиме измерения в интервале скоростей от 0,1 до 20 м/с и более. При этом оценки энергопотребления показывают, что в импульсном режиме измерения первичный преобразователь может работать от батареи питания с напряжением U = 3,6 В и ресурсом работы It = 10 А · ч в течение 6 лет с приемлемым интервалом между измерениями — 1 с. Полученные экспериментальные результаты качественно неплохо согласуются с результатами проведенного нами численного моделирования [6].

Работа поддержана ФАПНИ (проект № 02.523.11.3018).

Список литературы

1. **Nan-Fu Chiu, Tzu-Chien Hsiao, Chi-Wann Lin.** Low Power Consumption Design of Micromachined Thermal Sensor for Portable spirometer // Tamkang Journal of Science and Engineering. 2005. V. 8, N 3. P. 225—230.

2. **Дюжев Н. А., Поправкин А. Н., Шкуропат И. Г., Шокин А. Н., Попков А. Ф.** Универсальный термочувствительный элемент к датчикам газового потока // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 2. С. 22—24.

3. **Рабодзей А. Н., Халикеев В. М.** БЭК 15. Датчики фирмы Honeywell. М.: Додэка, 2000.

4. **Чуйко В. А.** Моделирование рабочих характеристик импульсного термисторного термоанемометра // Научные работы Донецкого национального технического университета. Серия: Вычислительная техника и автоматизация. Донецк: ДонНТУ, 2004.

5. **Ураксеев М. А., Романченко А. Ф., Абдрашитова Д. Р., Шилов С. А.** // Исследовано в России. 2001. С. 587. URL: http: //zhurnal.ape. relarn.ru/articles/2001/051.pdf.

6. **Бобров А. А., Попков А. Ф., Дюжев Н. А., Кулагин Н. Е., Махиборода М. А., Медников А. М.** Расчет терморезистивного анемометрического преобразователя на мембране // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 8. С. 34—39.

УДК 621.382

И. И. Абрамов, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь,
e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

ПРОБЛЕМЫ И ПРИНЦИПЫ ФИЗИКИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ. VIII. Нанотранзисторы с МДП-структурой (часть 1)

Проанализированы модели кремниевых нанотранзисторов со структурой металл—диэлектрик—полупроводник (МДП). Оценены перспективы развития электроники после окончания "эры" данного типа приборных структур.

Ключевые слова: *нанотранзисторы, металл—диэлектрик—полупроводник, наноэлектроника*

Введение

И все же *основным типом активных элементов ИС твердотельной наноэлектроники остаются кремниевые нанотранзисторы с МДП-структурой**. Серьезной альтернативы для них пока не видно, если иметь ввиду схемы степени интеграции около 10^{10} и, возможно, выше [2].

На этом пути увеличения степени интеграции встретится немало проблем. Так, при дальнейшем уменьшении размеров МОП-транзисторов (металл — окисел — полупроводник) более существенное отрицательное влияние будут оказывать различные паразитные эффекты. В частности, как правило, усиливаются короткоканальные эффекты. Кроме того, все более важными становятся туннельные токи затвора, токи между истоком и стоком (прямое туннелирование) и другие составляющие токов утечки, уменьшение подвижности носителей заряда, флуктуации распределений зарядов примесей, увеличение последовательных сопротивлений областей стока и истока, задержки межсоединений и др.

В целях борьбы (часто хотя бы уменьшения влияния, а не полного устранения) с данными эффектами для сохранения приемлемыми ряда электрических характеристик элементов предложено большое разнообразие конструктивно-технологических вариантов и их разновидностей (сочетания и т. п.) кремниевых нанотранзисторов с МДП-структурой, включая нанотранзисторы с КНИ-структурой (кремний-на-изоляторе), а именно: частично и полностью обедненные; необедненные; вертикальные совмещенные; с ультратонким основанием; с управляемой проводимостью канала; с напряженными слоями; с высокой диэлектрической проницаемостью подзатворного диэлектрика; с вертикальной и "реберной" структурами; с двойным, тройным, вер-

* Заметим, что ряд специалистов данный тип приборных структур не относит собственно к наноэлектронике (см., например, [1]). Автор не разделяет эту точку зрения. Аргументация приведена в работах [2, 3] (см. также далее).

тикальным, сторонним, окружающим, π- и Ω- затворами; одно- и многоканальные; с локальной изоляцией канала; на основе гетероструктур; на квантовых проволоках; с опрокинутой Т-образной формой; со структурой "кремний ни на чем" и др.

Важный конструктивно-технологический вид нанотранзисторов на основе кремниевых квантовых проволок был рассмотрен в работе [4]. Замечу, что многие рассмотренные подходы, методы, характерные для приборных структур на квантовых проволоках, сохраняют свою эффективность и для нанотранзисторов с МДП-структурой. Так, некоторые модели, описанные в работе [4], с успехом модифицируют и используют для последнего типа приборных структур (см. далее).

Однако такая в целом благоприятная ситуация не всегда имеет место. Иногда конструктивно-технологические особенности могут существенно изменить требования к модели. Например, двумерный анализ бывает недостаточен, и необходима разработка трехмерных моделей. Еще более важными, как правило, являются размеры структуры, что приводит к *фундаментальному вопросу: когда достаточно использовать модели полуклассического подхода* [5, 6], *а когда необходимо применять квантово-механические модели*?

Рассмотрим вопрос о размерах приборной структуры, ввиду его принципиальной важности для нас, более подробно. Так, с ноября 2007 года компания *Intel* серийно производит микропроцессоры с проектными нормами 45 нм (длина затвора $L_з$ около 22 нм [7]) семейства *Penryn*. Она же заявила о разработке технологического процесса с проектными нормами 32 нм [8]. Процесс с такими же нормами разработан компанией *IBM* с партнерами [8]. Это что касается серийного производства. Сейчас о научных исследованиях. В настоящее время имеется сообщение о создании типа "реберных" нанотранзисторов (FinFET) с длиной канала $L_к = 3$ нм [9]. Теория и оценки показывают, что кремниевые МДП-нанотранзисторы будут иметь приемлемые характеристики, по крайней мере, до $L_к \approx 2$ нм (см. [10] и далее). Существует точка зрения, что возможны полевые транзисторы "теоретически при $L_к > 0$" [11]. Согласно авторитетному прогнозу 2007 года [12] нанотранзисторы с длинами затвора около 5 нм будут использоваться в серийных ИС к 2022 году. Однако последующие исследования дают более сдержанную оценку. Так, уже согласно прогнозу 2009 года [12] физическая длина затвора составит около 7,4 нм к 2024 году. Отмечу, что при прогнозировании 2009 года интенсивно использовалось программное обеспечение MASTAR, реализующее аналитические модели МОП-транзисторов, настроенные на экспериментальные данные.

Другая точка зрения заключается в том, что полевые транзисторы с длиной канала менее 1 нм* будут вряд ли обладать приемлемыми электрическими характеристиками, причем изготовленные на различных материалах и по различным технологиям [13]. Замечу, однако, что эта точка зрения не противоречит первой точке зрения, т. е. изготовить может быть и можно, но будут ли эти транзисторы нормально функционировать? Так, оценка предельно достижимого размера любого необратимого двоичного логического элемента на основе соотношения неопределенностей Гейзенберга и выражения Шеннона—фон Неймана—Ландауэра для минимальной энергии переключения составляет около 1,5 нм при температуре $T = 300$ К [14]. Вместе с тем, "меньше не обязательно лучше" [13]. Вспомним про такие информационные системы, как мозг человека — объект органической гибридной наноэлектроники, созданный природой [15].

Итак, в данной части цикла статей будут рассмотрены проблемы и принципы физики и моделирования МДП-транзисторов на основе кремния с длинами канала от 100 до 1 нм, т. е. нанотранзисторы с МДП-структурой наноэлектроники [3]. В связи с тем, что модели приборных структур на квантовых проволоках уже были рассмотрены [4], здесь основное внимание будет уделено численным (дискретным), как наиболее адекватным, моделям кремниевых нанотранзисторов других конструктивно-технологических видов.

Модели полуклассического подхода

Основные классы моделей полуклассического подхода и общие оценки справедливости полуклассического и квантово-механического подходов [15] были рассмотрены в [5]. Оценки допустимого применения моделей полуклассического подхода при расчете внешних электрических характеристик приборных структур микроэлектроники приведены в работе [6]. Двинемся дальше в диапазон характеристических длин $L_{хар}$ от 100 до 1 нм в соответствии с целью данной части работы.

В статьях [5, 6] отмечалось, что многие модели полуклассического подхода, которые, как правило, проще и экономичнее моделей квантово-механического подхода, сохраняют свою адекватность при расчете электрических характеристик в значительной части этого диапазона, т. е. и для МДП-транзисторов наноэлектроники. Так, первые экспериментальные транзисторы с $L_з < 100$ нм, едва ли отличающиеся в конструктивном плане от обычных планарных МОП-транзисторов глубокосубмикронной области (см., например, [11, 16—18]), анализировались и проектировались с применением известных комплексов программ, в которых реализованы диффузионно-дрейфовые модели. В частности, в работах [19, 20] с этой целью для МОП-транзисторов с $L_з = 70$ нм использовали комплекс FIELDAY (двумерное моделирование), а в работах [21, 22] для МОП-транзисторов с $L_к = 90$ нм — комплекс MINIMOS (двумерное моделирование) (см. также [6]). Однако лучшее согласование с экспериментальными данными [19, 20], особенно при более низкой по сравнению с комнатной температуре ($T = 11$ К), достигается с помощью кинетического моделирования на основе полуклассического метода Монте-

* Заметим, однако, что это уже будет не наноэлектроника [3] (см. далее).

Карло частиц [23], так как в данном случае физически корректно описывается эффект всплеска скорости, который важен для кремниевых МОП-транзисторов с $L_к < 100$ нм [6]. Необходимо отметить, что эти результаты были получены с использованием, по-видимому, наиболее адекватной на тот момент времени модели [24], основанной на методе Монте-Карло частиц и реализованной специалистами фирмы IBM в программе двумерного численного моделирования полупроводниковых приборов DAMOCLES [25].

Остановимся на данной модели, ввиду особой важности ряда результатов, полученных с ее применением. Полуклассическая самосогласованная модель [24] основана на решении уравнения Пуассона в двумерном сечении прибора и использовании метода Монте-Карло частиц. Квантовые эффекты не учитываются (исключение — вырождение*). Для описания вырождения носителей заряда применяется простая аппроксимация. Зонная структура получается с помощью метода эмпирического псевдопотенциала, а далее с ее учетом вычисляются интенсивности рассеяния электронов на фононах, примесях и электронах. Учитывается также ударная ионизация. Моделировались кремниевые *n*-МОП-транзисторы с эффективной длиной канала вплоть до 60 нм при $T = 11$ и 300 К. Получено хорошее согласование с экспериментальными данными работы [19] по крутизне для случая малого сигнала в области насыщения транзистора. Кроме важности эффекта всплеска скорости, особенно при $T = 11$ К, показана необходимость детального описания зонной структуры Si. В частности, традиционно используемая параболическая аппроксимация зонной структуры приводит к сильному завышению эффекта всплеска скорости, средней энергии, особенно при $T = 77$ К. Отмечается, что описание транспорта электронов в Si с помощью только четырех согласующих параметров — большое достижение. О значительности вычислительных затрат свидетельствуют следующие данные. На IBM 3090/600E вычислительной системе с векторным процессором требуется порядка десятков часов на одну точку смещения. И в то же время переход к параболической аппроксимации зонной структуры уменьшает это время в 20 – 100 раз. В последующей работе [25] метод Монте-Карло частиц распространен на случай описания транспорта дырок. Сравнивались *n*- и *p*-МОП-транзисторы с $L_к = 233$ и 53 нм при $T = 77$ и 300 К. Оказалось, что для однотипных структур (модули профилей легирования, работ выхода затворов и прикладываемых напряжений — равны) ток и крутизна *p*-МОП-транзисторов составляют около половины от таковых для *n*-МОП-транзисторов с $L_к = 233$ нм, а для $L_к \leqslant 100$ нм крутизна *p*-МОП-транзисторов уже составляет 75 % от значений для *n*-МОП-транзисторов. Однако наиболее интересные и важные результаты были получены в работе [26]. В ней исследовались МОП-транзисторы с $L_к$, равными от 233 до 43 нм, с подложками *n*-типа на Ge, Si, GaAs, InP, $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ и *p*-типа на Si (характеристики этих материалов и некоторых других полупроводников рассчитаны в работе [27]) при $T = 77$ и 300 К. Установлено, что за исключением приборов, включающих In, "скорость", оцениваемая по крутизне, МОП-транзисторов с $L_к \leqslant 100$ нм практически не зависит от полупроводника. Такое "универсальное" поведение в основном обусловлено подобием плотностей состояний зонных структур соответствующих материалов при средних энергиях. Это связано с тем, что концепции эффективной массы и подвижности, оцениваемых у дна и потолка зон, т. е. при малых энергиях, строго говоря, неприменимы для описания транспорта заряда в малых приборах с $L_к \leqslant 100$ нм. Тем самым в работе [26], *т. е. в 1991 году* (!), *фактически показано, что при создании на МОП-транзисторах УБИС наноэлектроники кремнию нет альтернативы среди ряда рассмотренных технологически значимых материалов, по крайней мере до $L_к = 43$ нм**. Замечу также, что программу DAMOCLES использовали при моделировании биполярных *n—p—n*- и *p—n—p*-транзисторов на кремнии с шириной базы $W_б = 50$ нм и полевых транзисторов с барьером Шоттки на основе GaAs [25, 28]. В частности, показано слабое влияние эффекта всплеска скорости на высокочастотное поведение кремниевых биполярных транзисторов (см. также [6]). В работе [29] программу DAMOCLES применяли для оценки потенциала масштабирования *n*-МОП-нанотранзисторов с каналом на напряженном Si и $Si_{1-x}Ge_x$ ($L_з = 66$; 44; 22 и 11 нм). На предварительном этапе масштабирования использовалась FIELDAY (диффузионно-дрейфовая модель). Установлено, что улучшение характеристик будет несильным, что согласуется с экспериментальными данными.

В дальнейшем модели полуклассического подхода с успехом применялись как для теоретических исследований, предложений новых конструкций нанотранзисторов, так и для анализа и при разработке экспериментальных образцов приборных структур. Отметим лишь некоторые работы.

В статье [17] проанализированы перспективные конструктивно-технологические варианты МОП-транзисторов при их масштабировании в область $L_к \leqslant 100$ нм. Были использованы программы FIELDAY (трехмерный анализ) и DAMOCLES. В частности, с помощью диффузионно-дрейфовой модели (FIELDAY) исследовано влияние флуктуаций распределения примесей на выходные токи и пороговое напряжение. Подобные исследования также были проведены в некоторых других работах с помощью гидродинамических моделей и методов Монте-Карло. Так, влияние флуктуаций примесей на эти же характеристики и дрейфовую скорость было исследовано для 30 МОП-нанотранзисторов с $L_к = 50$ нм в работе [30] с помощью многочастичного метода Монте-Карло в сочетании с методом молекулярной

* В литературе так сложилось, что под учетом квантовых эффектов обычно подразумевается нечто большее, чем включение в модель только вырождения.

* Во многом именно по этой причине данная часть цикла статей посвящена нанотранзисторам с МДП-структурой на кремнии.

динамики [31]. Важно при этом отметить, что применяемая модель была предварительно настроена на экспериментальные данные по зависимости подвижности от уровня легирования при малых электрических полях. Ясно, что такой прогноз будет более достоверным по сравнению с другими, в которых подобная настройка модели не проводится.

В то же время в ряде работ с применением различных полуклассических моделей были предложены новые конструктивно-технологические варианты МОП-нанотранзисторов. В статье [32] для этих целей при исследовании нанотранзистора с $L_з = 10$ нм ($L_к \approx 16$ нм) использовали двумерную диффузионно-дрейфовую модель. Интересно заметить, что оценка вклада тока прямого туннелирования была 15 % от полного тока стока для предлагаемой конструкции транзистора. То есть диффузионно-дрейфовая модель продолжает работать хорошо! (См. также далее). В работе [33] был предложен новый конструктивно-технологический вариант МОП-нанотранзистора на КНИ с $L_к = 10$ нм. Для этого применяли гидродинамическую модель и метод Монте-Карло. Сравнение *n*-МОП-нанотранзисторов на КНИ различных конструктивно-технологических вариантов (с $L_к$ до 50 нм) с помощью коммерческого пакета программ ISE TCAD (двумерное моделирование) было проведено в работе [34]. Была также предложена новая конструкция нанотранзистора. В настоящее время перечень проведенных исследований подобного рода весьма многочислен*, поэтому ограничимся лишь приведенными.

Интересные результаты приведены в статье [35]. В работе была построена двумерная численная модель кремниевого нанотранзистора с КНИ-структурой с полным и частичным обеднением на основе одночастичного метода Монте-Карло. С помощью предложенной модели для транзистора с $L_з = 50$ нм были проиллюстрированы возможности исследования влияния на его электрические характеристики не только различных конструктивно-технологических параметров, но и некоторых электрофизических параметров. В последующей статье [36] описан простой способ коррекции модели для учета поперечного квантования в канале кремниевых нанотранзисторов с КНИ-структурой. Модель реализована в программе BALSOI.

Гидродинамическую модель в сочетании с методом Монте-Карло использовали в работе [37] для анализа шумовых характеристик МОП-транзисторов с $L_к$ от 2000 до 60 нм. Показано, что главный механизм (дробовый) шума в современных МОП-нанотранзисторах подобен характерному для баллистических приборов, а не для длинноканальных МОП-транзисторов.

Важные результаты были получены при сопоставлении различных полуклассических моделей в работе [38]. Были рассчитаны стоковые и сток-затворные характеристики *n*-МОП-транзисторов с тонким слоем кремния с двойным затвором с его длинами от 100 до 5 нм ($L_з = L_к$) и использованием трех моделей различных классов, а именно: метода Монте-Карло частиц, гидродинамической и диффузионно-дрейфовой. Отмечу, что результаты были получены с применением хорошо известного** инструментария моделирования приборов, а именно: программы DAMOCLES (метод Монте-Карло частиц), коммерческого комплекса программ ATLAS (гидродинамическая и диффузионно-дрейфовая модели). Сравнение осуществлялось с результатами, полученными по методу Монте-Карло частиц (без учета квантования в канале), как наиболее адекватному. Вырождение носителей заряда во всех моделях учитывалось. В работе преследовали две цели. Во-первых, метод Монте-Карло (даже частиц) не очень подходит для трехмерного анализа приборов, который принципиально важен для некоторых конструктивно-технологических вариантов нанотранзисторов, вследствие огромных затрат вычислительных ресурсов ЭВМ, и для расчета подпорогового тока МОП-транзисторов. Поэтому желательно использовать другие модели. Вопрос возникает — какие? Во-вторых, необходимо проверить точность более простых и экономичных моделей при моделировании перспективного вида нанотранзистора. В целом, оказалось, что без настройки параметров более простых моделей лучше согласуются с результатами, полученными по методу Монте-Карло частиц, расчеты по диффузионно-дрейфовой модели, а не по гидродинамической. В принципе, это не является неожиданным в свете изложенного в работе [5]. Основной вывод работы: в случае использования известных моделей электрофизических характеристик с уменьшением $L_з$*** необходима подстройка численных значений параметров этих моделей при согласовании расчетов по диффузионно-дрейфовой и гидродинамической моделям с таковыми по методу Монте-Карло частиц для рассмотренного вида нанотранзисторов. Так, при согласовании диффузионно-дрейфовой модели рекомендуется корректировка скорости насыщения модели подвижности. В целом, эти выводы соответствуют традиционным рекомендациям при моделировании МОП-транзисторов обычных конструкций, в том числе и при согласовании с экспериментальными данными (см., например, [6, 39, 40]). В работе также получена аппроксимация для зависимости скорости насыщения от $L_з$, позволяющая получить хорошее соответствие с результатами расчета по методу Монте-Карло частиц. Более кардинальный, с точки зрения автора, путь — построение новых моделей подвижности, например для сильных электрических полей.

Приведем другой очень существенный аргумент в пользу диффузионно-дрейфовых моделей. Так, их с успехом применяют для многомерного численного моделирования не только сложных, например функционально-интегрированных элементов, но также и целых фрагментов ИС, как единого целого [41]. Данный подход становится особенно важным с ростом степени интеграции ИС вследствие усиления

* Этому вопросу целесообразно посвятить отдельную работу.

** Таким образом, речь в определенном смысле идет о "стандартных моделях" [38].

*** Для диффузионно-дрейфовой модели для $L_з < 40$ нм.

взаимодействия между элементами. Недавно его эффективность была показана и для оценки различных характеристик наноэлектронных ИС, в частности на туннельно-связанных наноструктурах [42]. Поэтому *многомерные дискретные диффузионно-дрейфовые модели, судя по всему, будут по-прежнему важны для анализа сложных элементов и фрагментов ИС, как единого целого, и на МДП-нанотранзисторах.*

Основное направление последующего усовершенствования (корректировки) моделей полуклассического подхода для моделирования кремниевых нанотранзисторов проводилось по пути учета других по сравнению с вырождением квантово-механических эффектов. Об их важности для детального исследования физических процессов в некоторых областях даже обычных МОП-транзисторов на кремнии указывалось в работе [6]. Здесь, прежде всего, отмечу богатую предысторию вопроса, в частности по описанию электронных свойств инверсионных 2D-слоев на границах раздела полупроводник—диэлектрик, включая МОП-структуры, описанную в отличном обзоре ранних работ [43]. Хороший обзор по достигнутым успехам и неясностям в теоретическом понимании транспорта носителей заряда в инверсионных (квантованных) слоях кремния на соответствующий момент времени дан в работе [44]. Обзор работ по учету квантовых эффектов в упрощенных моделях обычных МОП-транзисторов приведен, например, в статье [45]. Может быть важным их учет и на уровне моделирования схем [46].

Отметим следующие результаты по упрощенным моделям. Как и для субмикронных элементов ИС, при разработке моделей, применяемых при масштабировании кремниевых МДП-нанотранзисторов разнообразных конструкций, используются решения уравнения Пуассона в различных приближениях. Однако при этом, как правило, вводятся новые или дополнительные параметры масштабирования. Часто такими удобными для анализа расчетов параметрами являются различные характеристические длины (см., например, [47—50]). Модели отмеченных работ следует отнести к чисто полуклассическим (без квантовых коррекций). В связи с этим их обычно сравнивают с численными моделями, например диффузионно-дрейфовыми моделями в программах FIELDAY, TMA — MEDICI.

Однако не менее важными и здесь могут являться квантово-механические коррекции. Так, в работе [51] на основе простых моделей масштабных длин, характеризующих электростатический контроль затвором L_E и эффект квантового ограничения L_Q, было проведено оценочное сравнение трех перспективных конструкций МОП-нанотранзисторов, а именно: 1) с симметричной планарной структурой с двойным затвором; 2) на цилиндрической квантовой проволоке с окружающим затвором (с коаксиальной структурой); 3) на прямоугольной квантовой проволоке с тройным затвором. Опосредованная связь L_E и L_Q показала, что планарная и коаксиальная структуры имеют приблизительно одинаковый потенциал масштабируемости для подложки ориентации (001). При этом коаксиальная структура характеризуется лучшим электростатическим контролем, но большей чувствительностью порогового напряжения $V_{пор}$ к девиациям толщины слоя кремния. Худшей из трех является структура на прямоугольной квантовой проволоке. И в то же время для другой ориентации подложки (011) непланарные структуры намного лучше, особенно на цилиндрической квантовой проволоке. Необходимо подчеркнуть, что эти важные качественные выводы подтверждаются результатами, полученными с помощью более строгих численных моделей (см. [4] и далее).

В статье [52] разработанные авторами упрощенные модели для $V_{пор}$ и подпороговой крутизны (первая была модифицирована на случай учета пространственного квантования) использованы для оценки пределов масштабирования МОП-нанотранзисторов с двойным затвором. Было показано, что характеристики будут приемлемыми для транзисторов с $L_к$ около 10 нм. Анализировали также МДП-транзисторы с высокой диэлектрической проницаемостью. Было проведено сравнение с результатами численного моделирования по программам: FIELDAY; Medici; DESSIS, ISE TCAD. В целом, получено хорошее согласование с более строгими численными моделями.

Далее основное внимание уделим дискретным моделям кремниевых нанотранзисторов сначала полуклассического подхода с квантовыми коррекциями (базовая модель — полуклассическая), а затем непосредственно —квантово-механического подхода.

Основные общие требования к подобного рода моделям, включая только квантовые макроскопические модели, относительно непосредственно полуклассических были сформулированы в работе [53], а именно: 1) их вычислительная сложность должна быть сравнима с соответствующим аналогом; 2) они должны "переходить" в их аналог при $\hbar \to 0$ ($\hbar$ — постоянная Планка, деленная на 2π); 3) основные уравнения должны быть теми же или подобными. *Удовлетворение этим требованиям приводит к следующим преимуществам: 1) возможно моделировать приборные структуры со столь же сложной геометрией; 2) легко исследовать относительное влияние квантовых эффектов; 3) возможность использования в инженерных приложениях; 4) допустимо сформулировать подобные с полуклассическим случаем граничные условия. Не менее важным, с точки зрения автора, является также применимость во многих случаях тех же численных методов или им подобных, что значительно упрощает разработку соответствующего программного обеспечения, вплоть до незначительной модификации уже созданного.*

Влияние пространственного квантования в тонком слое кремния в 5 нм *n*-МОП-нанотранзистора с двойным затвором ($L_з$ = 30 нм) при T = 300 K на выходные вольт-амперные характеристики (ВАХ) было исследовано в работе [54]. Предварительно была выполнена соответствующая модернизация программы DAMOCLES. Расчеты проводили при использовании параболической и первого порядка непараболической аппроксимаций зонной структуры Si. Оказалось, что результаты по току стока $I_с$ отлича-

ются до 30 %. И в то же время интересно заметить, что учет квантового эффекта в сочетании с более реалистичной непараболической аппроксимацией приводит к меньшему отличию (до 15 %) с моделью, в которой пространственное квантование не учитывается. Различия же по пороговому напряжению незначительны. Моделировали также *p*-МОП-нанотранзистор с двойным затвором ($L_з$ = 30 нм), который, как оказалось, приемлем для интеграции с исследованным *n*-МОП-нанотранзистором в КМОП-схемах (комплементарных МОП). В целом, результаты численного моделирования МОП-нанотранзисторов, с одной стороны, показали целесообразность квантово-механических коррекций полуклассических моделей в рассматриваемых случаях, а с другой стороны, — важность при этом достаточно точного описания зонной структуры кремния.

Модифицированная комбинированная самосогласованная модель для моделирования электронного транспорта в инверсионном слое Si МОП-структур, реализованная в программе DAMOCLES и использованная для получения описанных выше результатов, приведена в статье [55]. Модель основана на самосогласованном решении кинетического уравнения Больцмана (КУБ) (неявном) с помощью метода Монте-Карло частиц, двумерного уравнения Пуассона и одномерных (в поперечных сечениях канала) уравнений Шредингера (в первом приближении непараболической зонной структуры). При этом учитываются рассеяния на акустических и внутри- и межзонных объемных фононах, на поверхностных оптических модах, на поверхностных шероховатостях, на ионизированных примесях и зарядах границы раздела полупроводник—оксид. Одной из самых сложных задач являлся учет перехода из 3D- в 2D-состояние (и наоборот) и воплощение этого перехода в самосогласованной схеме итерационного решения. Для ее разрешения авторы разработали эмпирические правила.

Замечу, что подобная комбинированная модель была применена в работе [56] для моделирования МОП-нанотранзистора с двойным затвором $L_з$ = 15 нм. При этом учитывались внутри- и межзонное рассеяние на объемных акустических фононах, рассеяние на примесях, а также непараболичность зонной структуры. Сравнение с трехмерной полуклассической моделью, основанной на методе Монте-Карло, показало, что в рассматриваемом случае пространственное квантование слабо влияет на сток-затворные характеристики.

Нельзя не остановиться на других интересных результатах, полученных с помощью программы DAMOCLES и описанных в работе [57], хотя в ней непосредственно и не исследовались МДП-нанотранзисторы (длина канала бралась около 0,15 мкм). В статье анализировалось влияние эффектов горячих носителей в кремниевых приборных структурах на следующие характеристики: коэффициент умножения в биполярном транзисторе; ток подложки в МОП-транзисторе; инжекцию в SiO_2 затвора. Основной вывод: ..."*мы, действительно, можем объяснить транспорт горячих электронов качественно, а в некоторых случаях — количественно*". Для получения этого результата необходимо учитывать многие механизмы, причем пересмотреть их роль и описывающие их модели. Так, качественное и в большинстве случаев количественное согласие с экспериментом получается только при корректном учете зонной структуры, всех значимых процессов рассеяния (на фононах, кулоновское, ударная ионизация) и сильно нелокальных свойств транспорта в малых кремниевых приборах. Показано, что эффекты квантования в инверсионных слоях вызывают сдвиг пороговой энергии ударной ионизации, что очень важно для вычисления тока подложки в МОП-транзисторах. Отмечается, что *количественное согласование с экспериментом достигается в результате "хрупкого баланса" между многими эффектами, причем "малое отклонение в каждой аппроксимации может приводить к чрезвычайно сильно различающемуся результату", т. е. потере этого согласования. Поэтому авторы делают вывод о том, что не могут с уверенностью утверждать, что количественное согласование с экспериментом является доказательством того, что их "модель в целом справедлива"*. Замечу, что выделенные в тексте данного абзаца места касаются одной из наиболее адекватных физико-математических моделей полупроводниковых приборов, поэтому подобного рода неуверенность можно отнести ко множеству известных моделей приборных структур микро- и наноэлектроники. Для ее устранения при проверке адекватности модели необходимо использовать набор процедур, выделенных в работах [58, 59]. К сожалению, этот набор сложно реализовать на практике в полном объеме.

Интересная модифицированная модель описана в работах [60, 61]. В ней в двумерном случае с помощью метода Монте-Карло решается (неявно) КУБ с квантовой коррекцией потенциала на основе градиента плотности (см. далее). При этом учитывается шестидолинная структура зоны проводимости кремния. В работе [60] исследовались МОП-нанотранзисторы с КНИ-структурой с $L_к$ от 50 до 5 нм при T = 300 К. Учитывалось три механизма рассеяния: на фононах в канале; на примесях в областях стока и истока. Сначала проводилось сравнение модели с одномерным решением уравнений Шредингера и Пуассона в равновесных условиях. Показано, что результаты для электронов в инверсионном слое достаточно хорошо согласуются для транзистора с $L_к$ = 50 нм. Проводилось также сравнение методов Монте-Карло с квантовой коррекцией и без при расчете стоковых ВАХ. Оказалось, что ток с учетом квантовой коррекции меньше в основном за счет уменьшения заряда инверсионного слоя. Проиллюстрировано, что многодолинная структура зоны проводимости Si играет важную роль как в неравновесном, так и в квазибаллистическом режимах транспорта МОП-нанотранзисторов. В последующей работе [61] моделировали МОП-транзисторы с двойным затвором с $L_к$ от 50 до 8 нм при T = 300 К. Отмечены преимущества используемого способа квантовой коррекции метода Монте-Карло по сравнению с другими подобными коррекциями, в частности, простота и применимость к широкому кругу

задач. При расчетах учитывали: рассеяние на примесях, шероховатостях границ раздела, внутридолинное на акустических фононах, междолинное на *f*- и *g*-фононах, электрон-электронное, а также непараболичность зонной структуры и вырождение. Для учета одной из составляющих электрон-электронного рассеяния использовали метод молекулярной динамики. Были проанализированы физические процессы в баллистическом и квазибаллистическом режимах транспорта на основе функции распределения, средней скорости и других характеристик. Показано, что средняя скорость электронов достигает у конца области истока баллистического предела при $L_К < 10$ нм в случае учета рассеяния.

В работе [62] данную модель применяли для исследования МОП-транзисторов с двойным затвором ($L_К$ от 100 до 10 нм) двух разновидностей: 1) с барьером Шоттки; 2) с легированием областей истока и стока (традиционная структура). Оказалось, что первая разновидность характеризуется лучшей баллистической эффективностью и меньшим обратным рассеянием, что делает ее предпочтительнее при масштабировании.

Отмечу также несколько работ по использованию квантовых коррекций полуклассических моделей на основе других выражений для эффективного потенциала (см. далее). Так, в работе [63] получено соотношение для эффективного потенциала в случае учета электрон-электронного взаимодействия для применения в сочетании с полуклассическим методом Монте-Карло. Было проведено трехмерное моделирование МОП-нанотранзистора с КНИ-структурой с $L_З = 10$ нм. В результате расчета выходных характеристик установлено, что включение квантовой коррекции существенно снижает ток, крутизну и увеличивает пороговое напряжение транзистора. Однако, судя по приведенным результатам, различие между полуклассической моделью и моделью с учетом эффективного потенциала в области насыщения ВАХ не превышало 25 %. Подобные результаты (около 20 % по току открытого состояния) были получены в более ранних работах для квантовых коррекций на основе двух других выражений эффективного потенциала для МОП-транзисторов ($L_К = 50$ нм и $L_З = 25$ нм) [53, 64, 65]. Замечу, что увеличение времени счета по сравнению с полуклассическим методом Монте-Карло без коррекции — невелико (около 10 %) [64].

Иное выражение для эффективного потенциала в сочетании с полуклассическим методом Монте-Карло было использовано в работе [66]. Моделировали *n*-МОП-нанотранзистор с двойным затвором с КНИ-структурой с $L_К = 25$ нм. Учитывалось рассеяние на фононах, шероховатостях и кулоновском потенциале. Исследованы средняя энергия, дрейфовая скорость, зависимость тока стока от толщины канала. Проведено моделирование переходных процессов в нанотранзисторе при подаче различных ступенчатых сигналов на нижний и верхний затворы. Возможность анализа нестационарных процессов с учетом квантовой коррекции представляется особенно ценной в данной модели.

МОП-нанотранзисторы с двойным затвором с $L_З$ от 40 до 5 нм на напряженных слоях кремния канала (одно- и двухосные сжатия и растяжения, различные ориентации канала) исследовали в работе [67]. Был использован комплекс программ FALCON, в котором реализован метод Монте-Карло с учетом рассеяния на фононах, примесях и шероховатостях. Проведена также корректировка в целях учета квантовых эффектов и произвольного угла направления токов относительно кристаллографических осей. Зонную структуру напряженного кремния рассчитывали с помощью первопринципного (псевдопотенциала) метода, реализованного в программе PHASE. Установлено, что наиболее предпочтительной комбинацией для *n*-МОП-нанотранзисторов является двухосное растяжение и <100> направление канала, а для *p*-МОП-нанотранзистора — одноосное сжатие и <110> направление канала.

В баллистических приборах ток и шумовые характеристики во многом определяются инжекционными процессами из контактов. В работах [68, 69] предложена инжекционная модель электронов для полевых нанотранзисторов с учетом (или без) квантового ограничения и вырождения для использования в сочетании с методами Монте-Карло. С помощью модели были исследованы шумовые характеристики МОП-нанотранзисторов с двойным затвором и следующими размерами каналов: 15 × 10 × 8 нм; 15 × 10 × 2 нм; 15 × 5 × 2 нм. Рассеяние не учитывалось. Оказалось, что с уменьшением размеров канала шумовые характеристики ухудшаются. Частично ухудшение ослабляется с увеличением числа подзон.

Для полуклассических методов Монте-Карло с квантовыми коррекциями на основе эффективного потенциала характерно два существенных недостатка [53]: 1) нарушение принципа неопределенности Гейзенберга; 2) положительная определенность получаемых функций распределения, хотя известно, что функция Вигнера может принимать и отрицательные значения. Интересный подход устранения, по крайней мере, второго недостатка был предложен в работе [70]. В ней полуклассический многочастичный метод Монте-Карло используется для неявного решения кинетического уравнения для функции Вигнера. С этой целью вводится дополнительная характеристика, названная авторами сродство частиц (*particle affinity*). Метод был применен для моделирования резонансно-туннельных диодов (РТД). Замечу, что в работе [71] проиллюстрирована полезность подхода для физического понимания декогеренции, вызванной взаимодействием с фононами, на нескольких примерах, включая РТД. В моделях данного подхода учтено подобие квантового кинетического уравнения для функции Вигнера и КУБ. Механизмы рассеяния, однако, в них по-прежнему трактуются полуклассически. И тем не менее, их целесообразно отнести к квантовым моделям (см. далее).

Комбинированная модель МОП-нанотранзистора с двойным затвором с тонким слоем кремния предложена в статье [72]. В модели в поперечном сечении канала самосогласованно решаются одномерное уравнение Шредингера и двумерное уравнение

Пуассона. Далее в электрическом квантовом пределе вдоль канала решаются одномерные уравнения, аналогичные уравнениям диффузионно-дрейфовой модели и полученные из КУБ для баллистического режима работы нанотранзисторов. Важным моментом является то, что при построении дискретной модели в этом случае можно использовать физическую конечно-разностную аппроксимацию типа Шарфеттера—Гуммеля (см. [6]). Моделирование стоковой характеристики нанотранзистора с $L_к$ = 10 нм показало очень хорошее согласие с моделью, в которой для описания баллистического транспорта применено непосредственно КУБ. Подобные результаты получены и для внутренних характеристик. Замечу, что при этом не были использованы какие-либо согласующие параметры. Интересные результаты были также получены в работе [73] с помощью другой комбинированной модели, в которой для описания транспорта вдоль канала используется одномерная упрощенная модель на основе КУБ в баллистическом режиме в электрическом квантовом пределе. Анализировались стоковые характеристики без учета последовательных сопротивлений стока и истока. Показано, что в открытом состоянии ток контролируется в основном не всплеском скорости, а определяется механизмом переноса у вершины потенциального барьера возле истока. При этом наблюдается охлаждение и разогрев в областях у истока и стока, соответственно. В то же время отмечается, что другие обычные полуклассические модели, основанные на моментных уравнениях (см. [5]), не могут адекватно описывать квазибаллистический транспорт в нанотранзисторах*.

Комбинированная модель МОП-нанотранзистора была предложена в работе [74]. Уравнения Пуассона и Шредингера (одномерные в сечениях с учетом анизотропии эффективной массы) решаются самосогласованно в двумерной области сильного квантового ограничения. Для этого также используется теория функционала плотности. В других областях структуры применяется полуклассическое приближение. Транспорт считается баллистическим и описывается упрощенным выражением для плотности тока подзоны. Полная плотность тока вычисляется как сумма плотностей токов всех подзон. Туннелирование между истоком и стоком не учитывается, "так как оно пренебрежимо мало даже для приборов с длиной канала до 10 нм". Для самосогласованного решения уравнений Пуассона и Шредингера после дискретизации был использован метод Ньютона—Рафсона с экстраполяцией. В результате моделирования нанотранзистора с $L_к$ = 25 нм было установлено, что фактически только нижняя подзона занята носителями, т. е. допустимо приближение электрического квантового предела. Были рассчитаны стоковые характеристики и крутизна транзистора. Сравнение с программой MEDICI (диффузионно-дрейфовая модель с квантовыми поправками) выявило различия в токе насыщения и крутизне. Программа, реализующая описанную модель, предназначена для современных ПЭВМ.

Самосовмещенные n-МОП-нанотранзисторы с двойным затвором одно-, трех- и пятиреберные (FinFET) были исследованы в работе [75]. Для этого использовали комбинированную двумерную численную модель, основанную на самосогласованном решении уравнений Шредингера и Пуассона по методу конечных разностей. Для вычисления плотности тока электронов применяли уравнения (для плотности тока и непрерывности) диффузионно-дрейфовой модели. Были рассчитаны стоковые и сток-затворные характеристики транзисторов с $L_к$ = 30 нм и толщинами ребра от 10 до 75 нм. Результаты были сопоставлены с экспериментальными данными и полученными по диффузионно-дрейфовой модели (без квантовых коррекций). Оказалось, что при расчете стоковых характеристик комбинированная модель приводит к приблизительно на 30 % более низким значениям токов по сравнению с диффузионно-дрейфовой моделью и лучше согласуется с экспериментальными данными. В целом, результаты показали необходимость использования квантовой коррекции для анализа рассмотренной конструкции нанотранзистора для $L_к \leqslant 30$ нм.

Интересная комбинированная модель, основанная на самосогласованном решении в стационарном случае одномерных КУБ (вдоль канала по подзонам), двумерных уравнений Шредингера (поперек канала) и трехмерного уравнения Пуассона, построена в работе [76]. Для упрощения и развязки для исходного КУБ применены следующие допущения: приближения времени релаксации и эффективной массы; отсутствуют взаимодействия между подзонами. При численном решении дискретных аналогов уравнений использован приближенный метод Ньютона. Модель применена для моделирования МОП-нанотранзисторов с коаксиальной структурой (окружающий затвор) на квантовой проволоке с $L_з = L_к$ от 20 до 9 нм и диаметром Si d = 3...10 нм с толщиной оксида t_{ox} = 0,8 нм при T = 300 К в квазибаллистическом режиме функционирования. Проведено сравнение с результатами квазитрехмерной модели на основе формализма неравновесных функций Грина [77] (см. далее) с учетом электрон-фононного взаимодействий. Получено хорошее согласование по стоковым ВАХ. При этом в комбинированной модели время релаксации в подзоне настраивали с привлечением эффективной подвижности (постоянная) так, чтобы получить согласование с расчетами по квазитрехмерной модели в области насыщения выходных ВАХ. Показано, что приближение эффективной массы (параболическая аппроксимация) можно использовать вплоть до диаметров кремния в 3 нм. С уменьшением d наклон подпороговой характеристики улучшается, однако пороговое напряжение $V_{пор}$ становится более чувствительным к девиациям d. Наряду с рассеянием на шероховатостях эти два фактора становятся важными при масштабировании рассмотренного вида нанотранзисторов. Определены также ток открытого и закрытого состоя-

* Другие результаты группы проф. М. Лундстрёма рассмотрены далее, хотя некоторые из них могли быть описаны в этом разделе.

ний. Интересным результатом является зависимость первого тока от длины затвора, что почти не имеет места в баллистическом режиме. Сравнение с результатами по квазитрехмерной модели показало, что прямое туннелирование между истоком и стоком незначительно при $L_з \geqslant 10$ нм, что согласуется с данными других авторов. Установлено, что для хорошего электростатического контроля в нанотранзисторе с окружающим затвором необходимо, чтобы $d < 2/3\ L_з$. В работе [78] комбинированную модель применяли для МОП-нанотранзистора с коаксиальной структурой на кремниевой квантовой проволоке с $L_з = 8$ нм при $T = 300$ К. При этом учитывали рассеяние на акустических и междолинных фононах, шероховатостях границ раздела Si/SiO_2, ионизированных примесях, а также непараболичность зон. Установлена возможность флуктуаций дифференциальной проводимости на выходных ВАХ нанотранзистора.

Флуктуации различных конструктивно-технологических параметров элементов представляют, как известно, серьезную проблему разработки и создания СБИС и УБИС (сверх- и ультрабольших ИС) микроэлектроники. Она еще более обостряется для наноэлектроники, в частности, для рассматриваемого диапазона длин каналов и затворов нанотранзисторов с МДП-структурой. Можно выделить два известных качественно различных подхода к исследованию с помощью математических моделей влияния флуктуаций конструктивно-технологических параметров на электрические характеристики элементов ИС. В первом подходе метод Монте-Карло или другой способ используется для выборки параметров, например, концентрации примеси, толщины оксида и т. п., а далее рассчитываются для выбранных параметров электрические характеристики элемента, как правило, по полуклассической модели (см. ранее). Этот подход очень неэкономичен и вряд ли может быть применен в сочетании с квантовыми моделями элементов ввиду необходимости большего числа расчетов по ним. Второй подход часто использовался в сочетании с полуклассическими моделями при исследовании чувствительности электрических характеристик к девиациям различных параметров. В этом случае на предварительном этапе осуществляется линеаризация, как правило, дискретных уравнений базовой модели, а далее проводится прямое решение соответствующих уравнений в целях определения флуктуаций анализируемых электрических характеристик в зависимости от изменения исследуемых параметров. Этот подход является намного экономичнее первого, так как исключается необходимость большого числа расчетов по базовой модели элемента.

В работе [79] рассмотрено влияние случайного распределения примеси и флуктуации толщины оксида на электрические характеристики МОП-структур. Предложена экономичная методика оценки флуктуаций порогового напряжения, основанная на линеаризации дискретных уравнений модели (второй подход). В качестве базовой для МОП-нанотранзисторов разработана комбинированная двумерная модель, в которой самосогласованно решаются уравнения диффузионно-дрейфовой модели (в предположении постоянства уровня Ферми в полупроводнике при малых прикладываемых смещениях) и в поперечных сечениях канала в инверсионном слое одномерные уравнения Шредингера. В результате значительно упрощается и вычисление порогового напряжения по сравнению с более строгими квантовыми моделями (см. далее). Расчеты показали, что квантово-механические эффекты усугубляют ситуацию и увеличивают девиации порогового напряжения в рассматриваемых случаях приблизительно на 10—15 % для транзисторов с $L_к \leqslant 25$ нм.

В заключение рассмотрения моделей полуклассического подхода не могу не отметить важные и весьма успешные усилия по разработке численных моделей, основанных на решении КУБ [80, 81], но не с помощью явного или неявного использования для численного решения методов Монте-Карло [82].

Таким образом, модели полуклассического подхода продолжают развивать и с успехом использовать для анализа кремниевых МОП-нанотранзисторов. С их помощью удается наиболее рационально разрешить одну из основных проблем моделирования — проблему компромисса "адекватность — реализуемость" (АР-проблема) модели [6, 59]. В то же время диффузионно-дрейфовая модель по-прежнему остается "рабочей лошадкой" инженера. Основным и эффективным направлением модернизации моделей полуклассического подхода становится введение разнообразных квантово-механических коррекций, в том числе в рамках комбинированных моделей. Так как, когда делать коррекции поперек канала, в общем-то, ясно, то возникает важный вопрос: "Когда их целесообразно делать вдоль канала?" Ответ на него может быть, в принципе, получен с применением более последовательных дискретных моделей, рассматриваемых в следующем номере журнала.

Продолжение статьи будет опубликовано в следующих номерах журнала.

Список литературы

1. **Goldhaber-Gordon D., Montemerlo M. S., Love J. C., Opiteck G. J., Ellenbogen J. C.** Overview of nanoelectronic devices // Proc. IEEE. 1997. V. 85, N 4. P. 521—540.
2. **Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники. IV. Квантово-механические формализмы // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 2. С. 24—32.
3. **Абрамов И. И.** Термин "элемент" в микро- и наноэлектронике // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 6. С. 2—4.
4. **Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники. VII. Структуры на квантовых проволоках // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 7. С. 14—29; № 8. С. 7—23.
5. **Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники. II. Модели полуклассического подхода // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 9. С. 26—36.
6. **Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники. III. Численное моделирование в рамках полуклассического подхода // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 1. С. 36—47.
7. **Ferry D. K.** Nanowires in nanoelectronics // Science. 2008. V. 319. P. 579—580.

8. **Шахнович И.** Технология уровня 45 нм: 45, 32, далее везде? // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2008. № 2. С. 102—109.

9. **Майская В.** Транзисторы компании Intel с тройным затвором. Закон Мура по-прежнему справедлив // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2006. № 7. С. 50—52.

10. **Likharev K.** Electronics below 10 nm. In: Nano and Giga Challenges in Microelectronics / Ed. by J. Greer, A. Korkin, J. Labanowski. Amsterdam: Elsevier. 2003. P. 27—68.

11. **Валиев К. А., Орликовский А. А.** От микро- и наноэлектроники к твердотельным квантовым компьютерам // Успехи современной радиоэлектроники. 2004. № 5—6. С. 106—117.

12. **International** Technology Roadmap for Semiconductors: 1999 edition. Austin, TX: International SEMATECH, 1999; 2001 edition; 2003 edition; 2005 edition; 2007 edition; 2009 edition.

13. **Hadley P.** Bottom-up nanoelectronics // Proc. 34th European Microwave Conference, 2004, Amsterdam. P. 141—145.

14. **Zhirnov V. V., Cavin III R. K., Hutchby J. A., Bourianoff G. I.** Limits to binary logic switch scaling — A gedanken model // Proc. IEEE. 2003. V. 91. N 11. P. 1934—1939.

15. **Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники. I. Основные положения // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 8. С. 34—37.

16. **Chang T. H. P., Kern D. P., Kratschmer E., Lee K. Y., Luhn H. E., McCord M. A., Rishton S. A., Vladimirsky Y.** Nanostructure technology // IBM J. Res. Develop. 1988. V. 32, N 4. P. 462—493.

17. **Taur Y., Mii Y.-J., Frank D. J., Wong H.-S., Buchanan D. A., Wind S. J., Rishton S. A., Sai-Halasz G. A., Nowak E. J.** CMOS scaling into the 21st century: 0,1 μm and beyond // IBM J. Res. Develop. 1995. V. 39, N 1/2. P. 245—260.

18. **Красников Г. Я.** Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. Часть 1. М.: Техносфера. 2002. 416 с.

19. **Sai-Halasz G. A., Wordeman M. R., Kern D. P., Ganin E., Rishton S., Zicherman D. S., Schmid H., Polcari M. R., Ng H. Y., Restle P. J., Chang T. H. P., Dennard R. H.** Design and experimental technology for 0,1-μm gate-length low-temperature operation FET's // IEEE Electron Device Letters. 1987. V. EDL-8, N 10. P. 463—466.

20. **Sai-Halasz G. A., Wordeman M. R., Kern D. P., Rishton S., Ganin E.** High transconductance and velocity overshoot in NMOS devices at the 0,1-μm gate-length level // IEEE Electron Device Letters. 1988. V. 9, N 9. P. 464—466.

21. **Shahidi G. G., Antoniadis D. A., Smith H. I.** Electron velocity overshoot at room and liquid nitrogen temperatures in silicon inversion layers // IEEE Electron Device Letters. 1988. V. 9, N 2. P. 94—96.

22. **Shahidi G. G., Antoniadis D. A., Smith H. I.** Reduction of channel hot-electron-generated substrate current in sub-150-nm channel length Si MOSFET's // IEEE Electron Device Letters. 1988. V. 9, N 10. P. 497—499.

23. **Laux S. E., Fischetti M. V.** Monte-Carlo simulation of submicrometer Si n-MOSFEs at 77 and 300 K // IEEE Electron Device Letters. 1988. V. 9, N 9. P. 467—469.

24. **Fischetti M. V., Laux S. E.** Monte Carlo analysis of electron transport in small semiconductor devices including band-structure and space-charge effects // Phys. Rev. B. 1988. V. 38, N 14. P. 9721—9745.

25. **Laux S. E., Fischetti M. V., Frank D. J.** Monte Carlo analysis of semiconductor devices: The DAMOCLES program // IBM J. Res. Develop. 1990. V. 34, N 4. P. 466—494.

26. **Fischetti M. V., Laux S. E.** Monte Carlo simulation of transport in technologically significant semiconductors of the diamond and zinc-blende structures. Part II. Submicrometer MOSFET's // IEEE Trans. on Electron Devices. 1991. V. 38, N 3. P. 650—660.

27. **Fischetti M. V.** Monte Carlo simulation of transport in technologically significant semiconductors of the diamond and zinc-blende structures. Part I. Homogeneous transport // IEEE Trans. on Electron Devices. 1991. V. 38, N 3. P. 634—649.

28. **Lee W., Laux S. E., Fischetti M. V., Baccarani G., Gnudi A., Storck J. M. C., Mandelman J. A., Crabbé E. F., Wordeman M. R., Odeh F.** Numerical modeling of advanced semiconductor devices // IBM J. Res. Develop. 1992. V. 36, N 2. P. 208—232.

29. **Kumar A., Fischetti M. V., Laux S. E**. Monte-Carlo simulations of performance scaling in strained-Si nMOSFETs // Proc. Int. Conf. Simul. Semicond. Process. Devices. 2005. P. 299—302.

30. **Gross W. J., Vasileska D., Ferry D. K.** Three-dimensional simulations of ultrasmall metal-oxide-semiconductor field-effect transistors: The role of the discrete impurities on the device terminal characteristics // J. Appl. Phys. 2002. V. 91, N 6. P. 3737—3740.

31. **Gross W. J., Vasileska D., Ferry D. K.** A novel approach for introducing the electron-electron and electron-impurity interactions in particle-based simulations // IEEE Electron Device Letters. 1999. V. 20, N 9. P. 463—465.

32. **Kawaura H., Sakamoto T., Baba T., Ochiai Y., Fujita J., Matsui S., Sone J.** Proposal of pseudo source and drain MOSFETs for evaluating 10-nm gate MOSFETs // Jpn. J. Appl. Phys. 1997. V. 36, Part 1. N 3. B. P. 1569—1573.

33. **Shimatani T., Pidin S., Koyanagi M.** New electrically thinned intrinsic-channel SOI MOSFET with 0,01 μm channel length // Jpn. J. Appl. Phys. 1997. V. 36, Part 1. N 3 B. P. 1659—1662.

34. **Yanagi S.-I., Nakakubo A., Omura Y.** Proposal of a partial-ground-plane (PGP) silicon-on-insulator (SOI) MOSFET for deep sub-0,1-μm channel regime // IEEE Electron Device Letters. 2001. V. 22, N 6. P. 278—280.

35. **Вьюрков В. В., Орликовский А. А., Сидоров А. А.** Моделирование характеристик полевого баллистического нанотранзистора в тонком кремнии на изоляторе // Микроэлектроника. 2003. Т. 32, № 4. С. 283—293.

36. **Сидоров А. А., Вьюрков В. В., Орликовский А. А.** Применение метода Монте-Карло для моделирования кремниевых полевых нанотранзисторов // Микроэлектроника. 2004. Т. 33, № 4. С. 243—255.

37. **Navid R., Jungemann C., Lee T. H., Dutton R. W.** High-frequency noise in nanoscale metal oxide semiconductor field effect transistors // J. Appl. Phys. 2007. V. 101, N 12. P. 124501-1—8.

38. **Granzner R., Polyakov V. M., Schwierz F., Kittler M., Doll T.** On the suitability of DD and HD models for the simulation of nanometer double-gate MOSFETs // Physica E. 2003. V. 19. P. 33—38.

39. **Абрамов И. И.** Курс лекций "Моделирование элементов интегральных схем": учеб. пособие. Минск: БГУ. 1999. 92 с.

40. **Абрамов И. И.** Лекции по моделированию элементов интегральных схем Москва—Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2005. 152 с.

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

42. **Коноплев Б. Г., Рындин Е. А.** Интегральная наноэлектроника на основе связанных квантовых областей. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ. 2008. 230 с.

43. **Андо Т., Фаулер А., Стерн Ф.** Электронные свойства двумерных систем. М.: Мир. 1985. 415 с.

44. **Ferry D. K.** Transport of hot carriers in semiconductor quantized inversion layers // Solid-State Electron. 1978. V. 21. P. 115—121.

45. **Janik T., Majkusiak B.** Quantum effects in MOS transistors // Electron Technology. 1994. V. 27, N 2. P. 3—27.

46. **Yu Z., Dutton R. W., Kiehl R. A.** Circuit/device modeling at the quantum level // IEEE Trans. on Electron Devices. 2000. V. 47, N 10. P. 1819—1825.

47. **Yan R.-H., Ourmazd A., Lee K. F.** Scaling the Si MOSFET: From bulk to SOI to bulk // IEEE Trans. on Electron. Devices. 1992. V. 39, N 7. P. 1704—1710.

48. **Suzuki K., Tanaka T., Tosaka Y., Horie H., Arimoto Y.** Scaling theory of double-gate SOI MOSFET's // IEEE Trans. on Electron Devices. 1993. V. 40, N 12. P. 2326—2329.

49. **Auth C. P., Plummer J. D.** Scaling theory for cylindrical fully-depleted, surrounding-gate MOSFET's // IEEE Electron Device Letters. 1997. V. 18, N 2. P. 74—76.

50. **Frank D. J., Taur Y., Wong H.-S. P.** Generalized scale length for two-dimensional effects in MOSFET's // IEEE Electron Device Letters. 1998. V. 19, N 10. P. 385—387.

51. **Wang J., Solomon P., Lundstrom M.** A general approach for the performance assessment of nanoscale silicon field effect transistors // IEEE Trans. on Electron Devices. 2004. V. 51, N 9. P. 1366—1370.

52. **Chen Q., Meindl J. D.** Nanoscale metal-oxide-semiconductor field-effect transistors: scaling limits and opportunities // Nanotechnology. 2004. V. 15. P. S549—S555.

53. **Ringhofer C., Gardner C., Vasileska D.** Effective potentials and quantum fluid models: A thermodynamic approach // Inter. J. High Speed Electr. Syst. 2003. V. 13. P. 771—802.

54. **Frank D. J., Laux S. E., Fischetti M. V.** Monte Carlo simulations of p- and n-channel dual-gate Si MOSFET's at the limits of scaling // IEEE Trans. on Electron Devices. 1993. V. 40, N 11. P. 2103.

55. **Fischetti M. V., Laux S. E.** Monte Carlo study of electron transport in silicon inversion layers // Phys. Rev. B. 1993. V. 48, N 4. P. 2244—2274.

56. **Saint-Martin J., Bournel A., Monsef F., Chassat C., Dollfus P.** Multi sub-band Monte Carlo simulation of an ultra-thin double gate MOSFET with 2D electron gas // Semicond. Sci. Technol. 2006. V. 21. P. L29—L31.

57. **Fischetti M. V., Laux S. E., Crabbé E.** Understanding hot-electron transport in silicon devices: Is there a shortcut? // J. Appl. Phys. 1995. V. 78, N 2. P. 1058—1087.

58. **Абрамов И. И., Харитонов В. В.** Численное моделирование элементов интегральных схем. Минск: Вышэйшая школа. 1990. 224 с.

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

60. **Tsuchiya H., Horino M., Miyoshi T.** Quantum Monte Carlo device simulation of nano-scaled SOI-MOSFETs // J. Comput. Electron. 2003. V. 2, N 2—4. P. 91—95.

61. **Tsuchiya H., Fujii K., Mori T., Miyoshi T.** A quantum-corrected Monte Carlo study on quasi-ballistic transport in nanoscale MOSFETs // IEEE Trans. on Electron Devices. 2006. V. 53, N 12. P. 2965—2971.

62. **Wang W., Tsuchiya H., Ogawa M.** Enhancement of ballistic efficiency due to source to channel heterojunction barrier in Si metal oxide semiconductor field effect transistors // J. Appl. Phys. 2009. V. 106, N 2. P. 024515-1—6.

63. **Heitzinger C., Ringhofer C., Ahmed S., Vasileska D.** 3D Monte-Carlo device simulations using an effective quantum potential including electron-electron interactions // J. Comput. Electron. 2007. V. 6. P. 15—18.

64. **Vasileska D., Knezevic I., Akis R., Ferry D. K.** The role of quantization effects on the operation of 50 nm MOSFET and 250 nm FIBMOS device // Techn. Proc. Int. Conf. on Modeling and Simul. of Microsyst. Nanotech. 2002. V. 1. P. 556—559.

65. **Ahmed S., Ringhofer C., Vasileska D.** An effective potential approach to modeling 25 nm MOSFET devices // J. Comput. Electron. 2003. V. 2. P. 113—117.

66. **Sampedro C., Gámiz F., Godoy A., Jiménez-Molinos F.** Quantum ensemble Monte Carlo simulation of silicon-based nanodevices // J. Comput. Electron. 2007. V. 6. P. 41—44.

67. **Tanabe R., Yamasaki T., Ashizawa Y., Oka H.** Analysis of nano-scale MOSFET including uniaxial and biaxial strain // J. Comput. Electron. 2007. V. 6. P. 49—53.

68. **Oriols X., Fernández-Diaz E.** Electron injection model for the particle simulation of 3D, 2D and ID nanoseale FETs // J. Comput. Electron. 2007. V. 6. P. 7—10.

69. **Oriols X., Fernández-Diaz E., Alvarez A., Alarcón A.** An electron injection model for time-dependent simulators of nanoseale devices with electron confinement: Application to the comparison of the intrinsic noise of 3D-, 2D- and ID-ballistic transistors // Solid-State Electron. 2007. V. 51. P. 306—319.

70. **Shifren L., Ringhofer C, Ferry D. K.** A Wigner function-based quantum ensemble Monte Carlo study of a resonant tunneling diode // IEEE Trans. on Electron Devices. 2003. V. 50, N 3. P. 769—773.

71. **Querlioz D., Saint-Martin J., Bournel A., Dollfus P.** Wigner Monte Carlo simulation of phonon-induced electron decoherence in semiconductor nanodevices // Phys. Rev. B. 2008. V. 78, N 16. P. 165306-1—10.

72. **Rhew J.-H., Lundstrom M. S.** Drift-diffusion equation for ballistic transport in nanoseale metal-oxide-semiconductor field effect transistors // J. Appl. Phys. 2002. V. 92, N 9. P. 5196—5202.

73. **Rhew J.-H., Ren Z., Lundstom M. S.** A numerical study of ballistic transport in a nanoseale MOSFET // Solid-State Electron. 2002. V. 46. P. 1899—1906.

74. **Fiori G., Iannaccone G.** Modeling of ballistic nanoseale metal-oxide-semiconductor field effect transistors // Appl. Phys. Letters. 2002. V. 81, N 19. P. 3672—3674.

75. **Kim K., Kwon O., Seo J., Won T.** Nanoseale device modeling and simulation: Fin field-effect transistor (FinFET) // Jpn. J. Appl. Phys. 2004. V. 43, N 6 B. P. 3784—3789.

76. **Jin S., Tang T.-W., Fischetti M. V.** Simulation of silicon nanowire transistors using Boltzmann transport equation under relaxation time approximation // IEEE Trans. on Electron Devices. 2008. V. 55, N 3. P. 727—736.

77. **Jin S., Park Y. J., Min H. S.** A three-dimensional simulation of quantum transport in silicon nanowire transistor in the presence of electron-phonon interactions // J. Appl. Phys. 2006. V. 99, N 12. P. 123719-1—10.

78. **Jin S., Fischetti M. V., Tang T.-W.** Differential conductance fluctuations in silicon nanowire transistors caused by quasiballistic transport and scattering induced intersubband transitions // Appl. Phys. Letters. 2008. V. 92, N 8. P. 082103-1—3.

79. **Andrei P., Mayergoyz I.** Analysis of fluctuations in semiconductor devices through self-consistent Poisson — Schrödinger computations // J. Appl. Phys. 2004. V. 96, N 4. P. 2071—2079.

80. **Banoo K., Lundstrom M., Smith R. K.** Direct solution of the Boltzmann transport equation in nanoscale Si devices // Proc. Int. Conf. Simul. Semicond. Process. Devices. 2000. P. 50—53.

81. **Jungemann C., Pham A. T., Meinerzhagen B., Ringhofer C., Bollhöfer M.** Stable discretization of the Boltzmann equation based on spherical harmonics, box integration, and a maximum entropy dissipation principle // J. Appl. Phys. 2006. V. 100, N 2. P. 024502-1—13.

82. **Kosina H., Nedjalkov M., Selberherr S.** Theory of the Monte Carlo method for semiconductor device simulation // IEEE Trans. on Electron Devices. 2000. V. 47, N 10. P. 1898—1908.

УДК 531.768.5; 531.787.91; 681.586.325

Б. И. Пивоненков, канд. техн. наук,
вед. науч. сотр.,
ОАО "НПО Измерительной техники",
г. Королев М. О.,
e-mail: piboiv@yandex.ru

НОВЫЙ КЛАСС ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫХ МИКРО- И НАНОСЕНСОРОВ

Предложен новый класс пьезорезистивных сенсоров, обладающих гораздо более высокими характеристиками по сравнению с существующими при более простой технологии их изготовления, описаны конструктивные решения сенсоров нового типа, представлены результаты расчета их характеристик в "объемном" и "планарном" исполнении.

Рассматриваемые сенсоры нового типа обеспечивают более высокие основные характеристики (включая возможность уменьшения размеров преобразователя до сотен микрометров), минимальный разброс чувствительности, более простую технологию изготовления и ее совместимость с технологией изготовления схем усиления и обработки сигнала.

Ключевые слова: *сенсор механических величин, пьезорезистивный сенсор, чувствительный элемент, микроэлектромеханические сенсоры, энергия деформации, микроминиатюризация, наносенсор*

Введение

Мировой рынок микроэлектромеханических (МЭМ) сенсоров механических величин, составляющий около 3 млрд долл. в год, бурно развивается, и для них находятся все новые области применения. Пьезорезистивные МЭМ сенсоры достаточно широко представлены на рынке (см., например, [1]). В то же время в основном, общепотребительском, его сегменте они явно проигрывают емкостным [2] вследствие высокой стоимости (~ 100 долл. по сравнению с 10 долл. у емкостных сенсоров AnalogDevice) и относительно невысоких характеристик при большей трудоемкости их изготовления. Достоинства пьезорезистивных сенсоров — высокая разрешающая способность и лучшие динамические характеристики (большие собственная частота и быстродействие) — востребованы в специализированном, относительно узком сегменте рынка, включающем аэрокосмическую отрасль, атомную промышленность, проведение стендовых (прежде всего динамических) испытаний изделий.

Главными тенденциями развития МЭМ сенсоров и использующих их микросистем являются:

- дальнейшая микро- и наноминиатюризация сенсоров, создание сенсоров размерами в сотни, а в перспективе в десятки микрометров вместо сегодняшних 3...4 мм;
- улучшение характеристик сенсоров;
- создание многоканальных микросистем, включающих несколько сенсоров и схемы преобразования, обработки, управления;
- изготовление этих микросистем (в рамках единого комплекса технологических процессов) на одном кристалле в виде бескорпусной микросхемы.

Существующие МЭМ сенсоры не могут и не смогут решить эти задачи.

Пьезорезистивные сенсоры, основанные на технологии объемной обработки кремния и представляющие собой многослойную структуру из профилированного чувствительного элемента (ЧЭ) изгибного типа и пластин-крышек толщинами около 500 мкм (одной в случае сенсоров давления или двух в случае сенсоров ускорения), в принципе не могут иметь размеры по вертикали и горизонтали существенно меньше 1 мм. По толщине и линейным размерам концентраторов напряжения также не следует ожидать кардинальных изменений — их размеры уже уменьшены до предельных значений (3...5 мкм). Дальнейшее их уменьшение (что крайне трудно выполнимо технологически) приведет к снижению точностных характеристик сенсора вследствие влияния поверхностных слоев (оксида металлизации), обладающих невысокими упругими свойствами. Технологические процессы объемной обработки кремния плохо совмещаются с процессами изготовления схемы, что необходимо для создания микросистем на одном кристалле.

Следует заметить, что возможности дальнейшей микроминиатюризации емкостных сенсоров также представляются весьма проблематичными.

Отсутствие видимых путей кардинального уменьшения размеров сенсоров тормозит дальнейшую миниатюризацию схем преобразования, обработки, управления — нет смысла уменьшать размеры схемы, если размеры сенсора велики и определяют размеры системы в целом.

1. Принципы построения пьезорезистивных сенсоров нового класса

1.1. Способ измерений механических величин [3]

В сенсорах нового типа сила, пропорциональная измеряемой величине, прикладывается непосредственно к верхней поверхности тензорезисторов через дополнительную структуру (на которую и действует измеряемая величина), расположенную над поверхностью ЧЭ и соединенную с тензорезисторами (рис. 1).

Тензорезисторы и участки структуры, соединенные с ними, выполнены в виде мезаструктур. Это обеспечивает приложение силы только к тензорезисторам. Для нормальной работы сенсора необходимо, чтобы сила была приложена ко всей верхней поверхности тензорезисторов и равномерно по ней распределена. Это обеспечивает одинаковые механические напряжения во всех участках тензорезистора и точно задает напряжения (равные отношению силы к площади поверхности тензорезистора).

В существующих МЭМ сенсорах тензорезисторы *p*-типа проводимости расположены в плоскости (100) пластины кремния (ЧЭ), ориентированы в направлении типа [110] и испытывают механические напряжения T_{xx}, T_{yy}, T_{xy}. Такая ориентация непригодна для сенсоров нового типа, тензорезистры в ко-

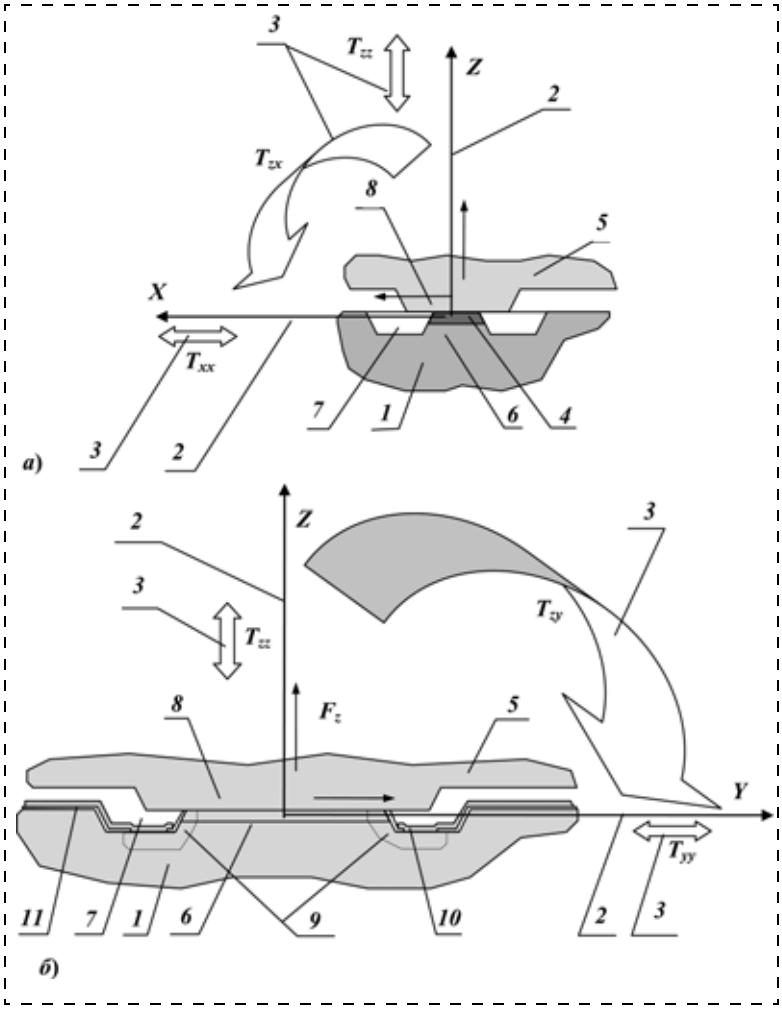

Рис. 1. Схема деформирования тензорезистора, вид сбоку в разрезе: *а* — поперечное сечение тензорезистора; *б* — продольное сечение тензорезистора; *1* — часть пластины, в которой сформирован тензорезистор; *2* — система координат; *3* — механические напряжения, которые могут возникать в тензорезисторе; *4* — тензорезистор; *5* — часть структуры (элемента); *6* — мезаструктура, в которой расположен тензорезистор; *7* — углубления в пластине, формирующие мезаструктуру; *8* — участок (мезаструктура) структуры, передающий усилие на тензорезистор; *9* — сильнолегированные области тензорезистора, соединяющие его с металлизированными дорожками *10*; *11* — оксидная пленка

торых испытывают механические напряжения T_{zz}, T_{zx}, T_{zy} (рис. 1). В общем случае приложенная к тензорезисторам сила может быть направлена в любом направлении: вдоль одной из осей *X*, *Y*, *Z* или под углом к ним. Считаем, что во всех рассматриваемых сенсорах на тензорезисторы действует сила, направленная вдоль оси *Z*. Для этого направления силы при использовании тензорезисторов *p*-типа проводимости максимальная чувствительность достигается при их расположении в плоскости (110) или (111) кремния и ориентации в направлении типа [110].

1.2. Расположение тензорезисторов и точки приложения силы, момент силы

На рис. 2 показано направление силы F_0 в общем случае — под углом к плоскости *XY*, в рассматриваемых в статье сенсорах она направлена перпендикулярно плоскости ЧЭ вдоль оси *Z*.

Одинаково ориентированные тензорезисторы *12* и *13* моста расположены на противоположных сторонах условного прямоугольника *14* на расстоянии l_1 друг от друга, а точка приложения силы F_0 смещена относительно центра *15* условного прямоугольника в направлении, перпендикулярном ориентации тензорезисторов на расстояние l_2. В результате на тензорезисторы действуют как сила F_0, так и момент силы, причем при $l_2/l_1 \gg 1$ деформации тензорезисторов, обусловленные моментом, многократно превышают деформации, вызванные самой силой, так что последними можно пренебречь. Деформации в тензорезисторах *12* и *13* при воздействии момента одинаковы и противоположны по знаку.

1.3. Два варианта реализации сенсоров нового класса

Возможны два варианта реализации сенсоров нового класса:

- "квазипланарные" сенсоры, представляющие собой квазипланарную композицию,

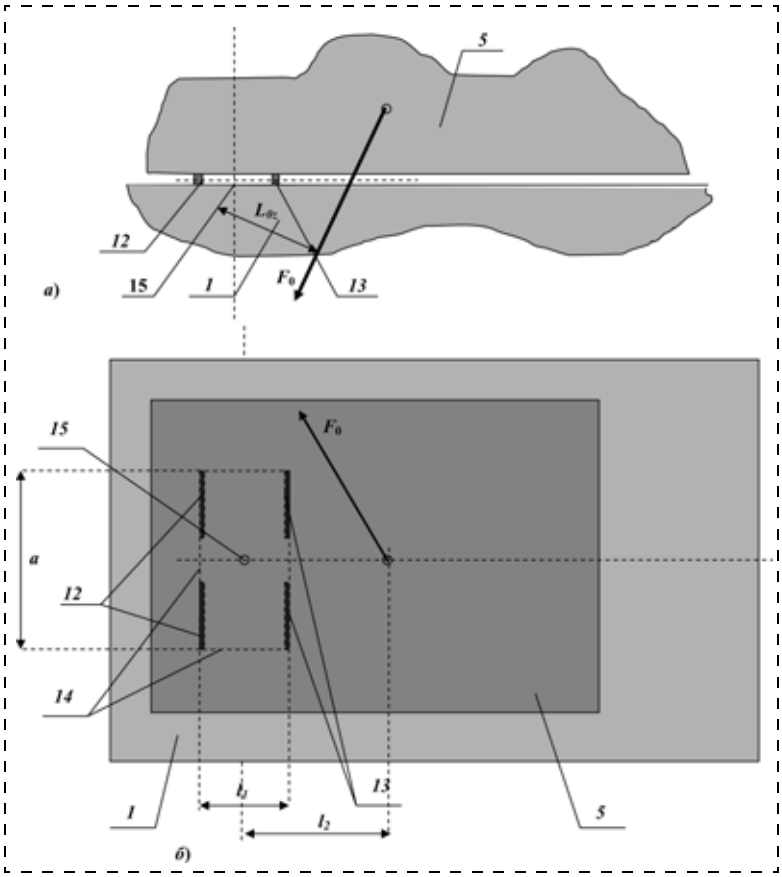

Рис. 2. Общая для сенсоров нового класса основа конструкции: *а* — вид сбоку; *б* — вид сверху; *1* — пластина, *5* — структура; *12*, *13* — тензорезисторы; *14* — условный прямоугольник, на противоположных сторонах которого расположены тензорезисторы; *15* — центр условного прямоугольника, F_0 — сила, действующая на структуру в общем случае

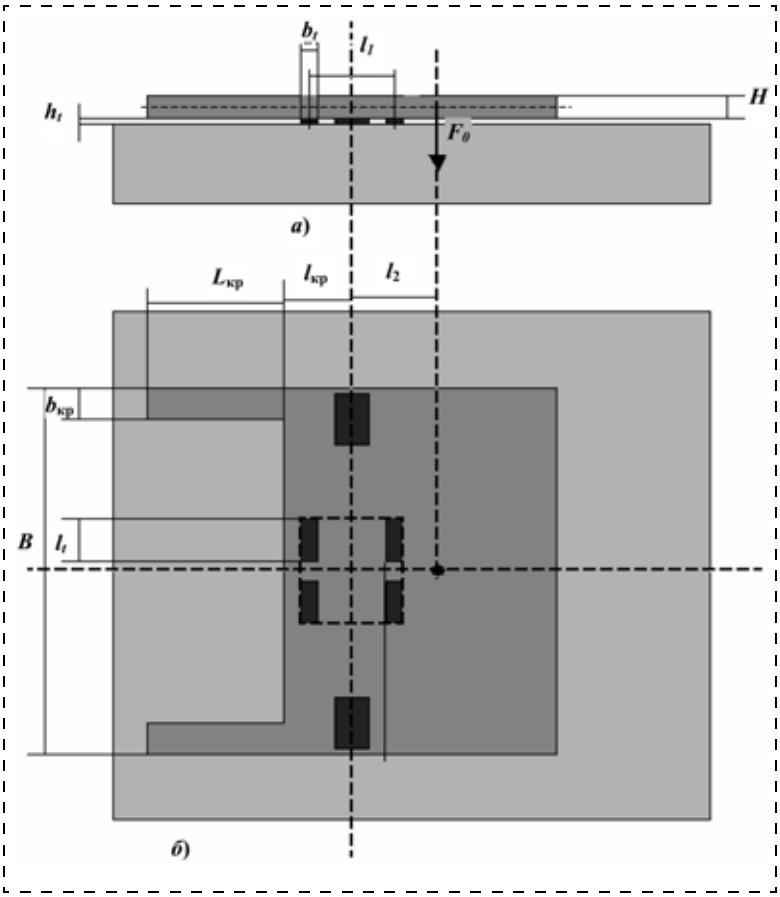

Рис. 3. Сенсор ускорения a_z нового класса: *а* — вид спереди; *б* — вид сверху; l_1 — расстояние между тензорезисторами, лежащими в смежных плечах (ширина условного прямоугольника); b_t и l_t — ширина и длина тензорезистора; F_0 — сила инерции, действующая на структуру (инерционную массу); h_t — толщина мезаструктуры с тензорезисторами; H — толщина структуры (инерционной массы); l_2 — расстояние от точки приложения силы инерции до центра условного прямоугольника (плечо силы инерции F_0); $L_{кр}$, $B_{кр}$ и $l_{кр}$ —соответственно длина и ширина "крыльев" (ограничителей перемещения структуры при перегрузках по ускорению) и длина оставшейся части структуры слева от тензорезисторов до центра условного прямоугольника; B — сторона квадратной структуры

созданную с использованием технологии "жертвенных слоев", селективного травления, тонко- и толстопленочных технологий (рис. 3, 4). Именно они способны обеспечить "наноисполнение" сенсоров и их объединение со схемами в единый кристалл;

- более близкие к существующим МЭМ сенсорам "объемные" сенсоры, представляющие собой двухслойный "бутерброд", в котором структура выполнена в виде стеклянной пластины, соединяемой с тензорезисторами диффузионной сваркой.

Ниже проводится сравнение характеристик и возможностей "объемных" сенсоров нового класса и существующих МЭМ сенсоров.

2. Оценка и сравнение характеристик "объемных" сенсоров обоих классов

Некоторые принципиальные преимущества сенсоров нового класса не нуждаются в подкреплении расчетами, обусловлены их конструктивными особенностями и очевидны.

2.1. Очевидные преимущества сенсоров нового класса

Высокая, на уровне десятых долей процента, воспроизводимость чувствительности. Разброс чувствительности в существующих МЭМ сенсорах при малых толщинах концентраторов достигает десятков процентов.

Чувствительность "объемных" сенсоров ускорения нового класса определяется силой (силой инерции, пропорциональной массе груза), плечом момента силы, площадью тензорезисторов (т. е. их длиной и шириной), расстоянием между ними и коэффициентом

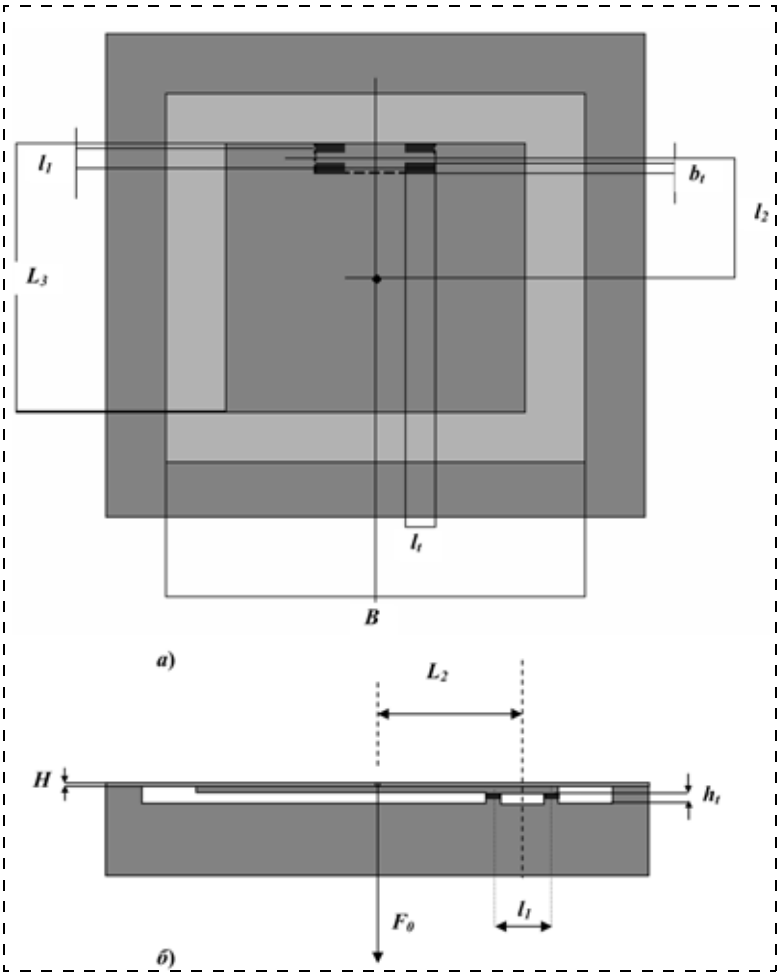

Рис. 4. Сенсор давления нового класса: *а* — вид сверху; *б* — вид сбоку; l_1 — расстояние между тезорезисторами смежных плеч моста (ширина условного прямоугольника); l_3 — сторона квадратной структуры; h_t, b_t и l_t — толщина (мезаструктуры с тензорезистором), ширина и длина тензорезистора; l_3 — расстояние от точки приложения силы на структуру до тензорезисторов (центра условного прямоугольника); B — сторона квадратной "рабочей" области ЧЭ (без бортика жесткости); H — толщина тонкой области (мембраны)

тензочувствительности тензорезисторов. Все эти величины воспроизводятся при изготовлении сенсоров с точностью до десятых долей процента.

В сенсорах давления ситуация аналогична в случае, если жесткость структуры (стеклянной профилированной пластины, воспринимающей давление) достаточно мала (так что практически вся сила передается на тензорезисторы).

Лучшие временная и температурная стабильность нулевого сигнала. Временная и температурная стабильности нулевого сигнала моста из нетензочувствительных резисторов, расположенных рядом и одинаково ориентированных, весьма высока — на уровне $1 \cdot 10^{-6}...5 \cdot 10^{-6}$ от напряжения питания, что при сигнале на диапазон измерения в 1 % от напряжения питания соответствует аддитивной временной и температурной погрешности сенсора в 0,01...0,05 %. На практике эта величина существенно больше. Основная причина этого — "паразитные" неконтролируемые и меняющиеся со временем и температурой деформации тензорезисторов, обусловленные самыми разными причинами: деформированным состоянием соединения кремний—стекло, деформациями в пленках оксида и металлизации и т. д. В существующих МЭМ сенсорах тензорезисторы смежных плеч моста разнесены на значительное расстояние и испытывают разные "паразитные" деформации не только из-за "разнесенности", но и потому, что находятся в разных условиях — одни испытывают деформации непосредственно, а другие — через ослабляющую деформации "прокладку" в виде концентратора напряжений. Это приводит к высокой чувствительности сенсора к "паразитным" деформациям.

В сенсорах нового класса тензорезисторы расположены на малом расстоянии (как правило, не более 30...40 мкм) друг от друга и одинаково ориентированы, так что они воспринимают практически одни и те же "паразитные" деформации и одинаково реагируют на них. В результате выходной сигнал сенсора не должен меняться, поэтому в сенсорах нового класса можно ожидать существенного уменьшения аддитивной погрешности.

Более высокое быстродействие. В сенсорах нового класса абсолютная деформация (номинальное перемещение груза в акселерометре или смещение центра мембраны в сенсоре давления) при толщине мезаструктуры с тензорезистором 3 мкм и ширине тензорезисторов 20 мкм составляет порядка $9 \cdot 10^{-3}$ мкм, уменьшается пропорционально уменьшению ширины тенорезисторов и составляет порядка $1 \cdot 10^{-3}$ мкм (1 нм !!) при ширине тензорезистора в 1 мкм, что намного меньше абсолютных деформаций ЧЭ в традиционных МЭМ сенсорах, где эти величины составляют 0,1 мкм и больше, и сравнимо (а возможно и существенно меньше) абсолютных деформаций в пьезоэлектрических датчиках.

Это означает, что быстродействие (собственная частота) новых сенсоров гораздо выше, чем у существующих МЭМ сенсоров и сравнимо (а возможно, в некоторых случаях и выше) быстродействия пьезоэлектрических датчиков.

2.2. Общие параметры сенсоров, используемые при расчетах и сравнении

Сигнал сенсора на диапазон измерения определяется тензочувствительностью тензорезисторов и относительной деформацией ε_0 тензорезисторов. В расчетах ε_0 принималась равной $\varepsilon_0 = 2 \cdot 10^{-4}$. Это соответствует выходному сигналу в 1,5...2 % от напряжения питания при прямом подключении моста к источнику питания или примерно 1 % от напряжения питания при использовании традиционной схемы компенсации чувствительности, когда последовательно с мостом подключается пассивный резистор с сопротивлением, равным сопротивлению тензорезистора.

Чувствительность и быстродействие сенсоров возрастают, абсолютные деформации уменьшаются и возможности уменьшения толщины концентраторов возрастают при уменьшении размеров (ширины, длины, толщины) тензорезисторов. Для этого необходимо делать минимальными размеры (ширину и длину) концентраторов напряжения и менять их в соответствии с размерами тензорезисторов. Поэтому для сравнения брались сенсоры с минимальными размерами (ионнолегированных) тензорезисторов, имеющих следующие характеристики:

- удельное сопротивление . . . . $9 \cdot 10^{-2}$ Ом · см;
- толщина h_t. . . . . 1 мкм, т. е. поверхностное сопротивление $R_s = 900$ Ом/□;
- сопротивление R . . . . . 3 кОм, т. е. отношение длины собственно тензорезистора к ширине b_t равно 3,3;
- длина l_t тензорезистора с контактными площадками . . $5{,}3b_t = b_t + 3{,}3b_t + b_t$ (брались квадратные контактные площадки со стороной b_t).

В МЭМ сенсорах, используемых для сравнения, в расчетах использовались минимальные размеры концентраторов напряжения, что обеспечивало наиболее высокие их характеристики.

2.3. Ограничения на параметры сенсоров и их отбор для сравнения

Формально для любого диапазона a_0 ускорений или давлений p_0 для сенсоров обоих типов существуют конструктивно-технологические решения (КТР), т. е. наборы конструктивных параметров, обеспечивающие требуемый диапазон, однако с учетом технологических и "физических" ограничений часть рассчитанных КТР сенсоров необходимо отбросить.

МЭМ сенсоры. В случае МЭМ сенсоров есть ограничения снизу на толщину $H_{конц}$ и ширину $b_{конц}$ концентратора напряжений. При уменьшении толщины, когда она становится сравнимой с толщиной тензорезистора, необходимо учитывать распределение изгибных деформаций по толщине концентратора напряжений и уменьшение деформаций нижних участ-

ков тензорезистора, что приводит к уменьшению выходного сигнала и чувствительности сенсора. Считая приемлемыми потери в чувствительности до 20 %, получаем ограничение (при используемой при сравнении толщине тензорезистора в 1 мкм) на толщину $H_{конц} \leqslant 5$ мкм.

Кроме того, при предельном уменьшении толщины и ширины концентратора задача неразрушения сенсора в процессе изготовления и сборки становится все более трудновыполнимой.

Поэтому КТР МЭМ сенсоров с $H_{конц} \leqslant 5$ мкм отбрасывались и не учитывались при сравнении сенсоров.

"Объемные" (новые) сенсоры. В "объемном" сенсоре есть ограничения снизу на ширину l_1 условного прямоугольника (расстояние между осями тензорезисторов смежных плеч).

Во-первых, она должна быть больше $4b_t$: $l_1 \geqslant 4b_t$ для того, чтобы обеспечить не большее чем на 20 % падение чувствительности из-за линейного распределения деформаций по ширине условного прямоугольника и конечной ширины тензорезистора.

Во-вторых, она должна быть меньше половины плеча момента l_2. При $l_1/l_2 \approx 1$ деформации тензорезисторов, обусловленные силой, становятся сравнимыми с деформациями, обусловленными моментом силы. Это приводит к неодинаковой деформации тензорезисторов смежных плеч: одни испытывают деформации, бóльшие ε_0, другие — меньшие, что невыгодно, поскольку снижает прочность сенсора. При $l_1/l_2 \leqslant 0{,}5$ отклонение деформаций тензорезисторов от номинального значения не превышает 50 %.

Поэтому КТР "объемных" сенсоров с $l_1 < 4b_t$ и с $l_1/l_2 > 0{,}5$ отбрасывались и не учитывались при сравнении сенсоров.

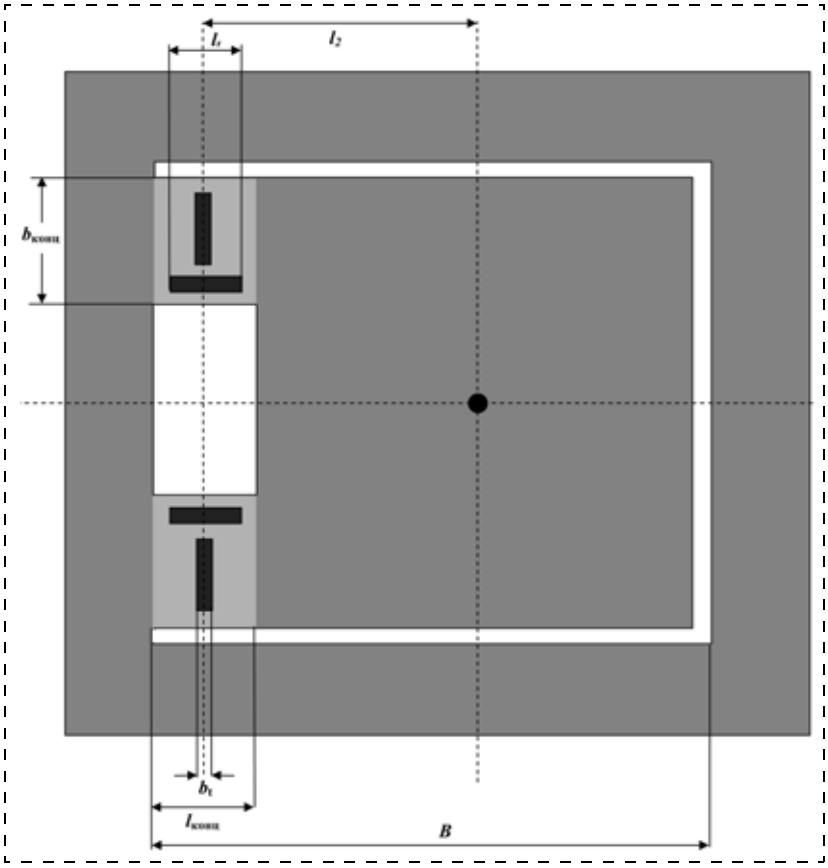

Рис. 5. Балочный ("консольный") сенсор ускорения a_z "старого" класса, вид сверху: l_2 — плечо силы инерции (расстояние от точки приложения силы до тензорезисторов); l_t и b_t — длина и ширина тензорезистора; $l_{конц}$ и b_t — длина и ширина концентратора напряжений (утоненной области, над которой располагаются тензорезисторы); B — сторона квадратной "рабочей" области ЧЭ (без бортика жесткости)

2.4. Объемные сенсоры ускорения, сравнение с традиционными сенсорами

Сенсор ускорения нового класса показан на рис. 3, "традиционный" МЭМ сенсор в виде консоли [4] — на рис. 5.

Исходные данные и объем расчетов. В расчетах сравнивались конструктивные параметры, требуемые для обеспечения диапазонов измерений в 10, 20, 50, 100, 200, 500 *g*, а также получаемая при этом собственная частота сенсоров. Параметры сенсора:

- толщина груза H, равная толщине пластины кремния $H = 450$ мкм;
- ширина тензорезисторов $b_t = 10$, 5, 2 и 1 мкм;
- "рабочая" часть ЧЭ в виде квадрата со стороной $B = 1$ мм, 500 и 250 мкм (что ставило сенсор нового типа, не имеющий бортиков жесткости, в заведомо менее выгодные условия — реальные размеры "традиционного" сенсора с учетом бортиков жесткости существенно больше).

Остальные конструктивные параметры сенсоров оптимизировались (выбирались величины, обеспечивающие наивысшие характеристики с учетом технологических ограничений). При расчетах принималось:

для МЭМ сенсоров

- ширина концентратора напряжения $b_{конц}$ составляет $b_{конц} = 4b_t + l_t = 9{,}3b_t$ (отступы на краях концентратора и зазор между тензорезисторами по b_t, ширина продольного тензорезистора b_t, длина поперечного тензорезистора l_t);
- длина концентратора $l_{конц}$ складывается из длины продольного тензорезистора l_t и запаса по 5 мкм на неточность двустороннего совмещения и равна $l_{конц} = l_t + 10$ мкм;

для "объемного" (нового) сенсора

- ширина $B_{кр}$, длина $L_{кр}$ "крыльев" (ограничителей перемещения груза) и длина оставшейся части структуры $l_{кр}$ слева от тензорезисторов до центра условного прямоугольника равны для разных B:
  — $B = 1000$ мкм — соответственно 100, 450, 50 мкм;
  — $B = 500$ мкм — соответственно 50, 220, 30 мкм;
  — $B = 250$ мкм — соответственно 25, 110, 15 мкм.

Этих данных достаточно для однозначного расчета всех конструктивных параметров сенсоров обоих типов. В качестве выходных ("ключевых") конструктивных характеристик сенсоров, представленных в табл. 1 для каждого диапазона ускорений a_0, выступают толщина $H_{конц}$, ширина $b_{конц}$ концентратора напряжений и собственная частота $\nu_{0МЭМ}$ для

Таблица 1

Расчетные толщина концентратора и собственная частота для традиционного МЭМ сенсора и расстояние между осями тензорезисторов и собственная частота для сенсора нового типа при разных диапазонах ускорения и разной ширины тензорезисторов

a_0, g	МЭМ сенсор (традиционный)					"Объемный" сенсор (новый)				$\nu_{0нов}/\nu_{0МЭМ}$
	B, мкм	b_t, мкм	$H_{конц}$, мкм	$b_{конц}$, мкм	$\nu_{0МЭМ}$, Гц	B, мкм	b_t, мкм	l_1, мкм	$\nu_{0нов}$, Гц	
10	1000 500	1 1	18,9 6,6	9 9	$3{,}40 \cdot 10^3$ $2{,}90 \cdot 10^3$	1000 500	1 1	40 40	$2{,}6 \cdot 10^4$ $6{,}3 \cdot 10^4$	7,6 2,2
1	1000	1	6,3	9	$0{,}68 \cdot 10^3$	1000	11	4	$2{,}6 \cdot 10^3$	3,8
20	1000 500	1 1	26,7 9,4	9 9	$5{,}80 \cdot 10^3$ $4{,}90 \cdot 10^3$	1000 500	1 1	80 4	$5{,}3 \cdot 10^4$ $1{,}1 \cdot 10^4$	9,1 2,2
50 100 200	1000 1000 1000	1 1 1	42,3 84,5 133,7	9 9 9	$1{,}20 \cdot 10^4$ $3{,}30 \cdot 10^4$ $6{,}50 \cdot 10^4$	500 500 500	1 1 1	11 21 42	$3{,}8 \cdot 10^4$ $7{,}30 \cdot 10^4$ $1{,}5 \cdot 10^5$	3,2 2,1 2,3

МЭМ сенсора, а также расстояние l_1 между тензорезисторами смежных плеч моста и собственная частота $\nu_{0нов}$ для "объемного" (нового) сенсора.

В отличие от МЭМ сенсора, где собственная частота может быть подсчитана достаточно точно, в "объемном" сенсоре ее точный расчет достаточно трудоемок, поэтому использовалась грубая ее оценка, которой, однако, вполне достаточно для сравнения характеристик сенсоров. Считалось, что при деформации тензорезистора те же деформации испытывают области мезаструктуры, в которой расположен тензорезистор, а также структуры и пластины — на глубину, равную ширине тензорезистора, а деформации в остальных областях равны нулю.

Анализ и обсуждение результатов расчетов. Из табл. 1 видно, что "объемные" (новые) сенсоры ускорения обладают (помимо сформулированных разделе в 2.1) следующими принципиальными преимуществами перед МЭМ сенсорами:

- собственная частота (а значит, и рабочий диапазон частот) в сенсорах нового класса при одном и том же диапазоне ускорений в 2...10 раз больше, чем в традиционных МЭМ сенсорах. Несомненно, на практике собственная частота сенсоров нового класса будет существенно меньше из-за конечной жесткости структуры (груза), пластины, закрепления сенсора, однако то что в сенсорах нового класса при равном диапазоне измеряемых ускорений достигается во много раз большая собственная частота, а значит, и гораздо более широкий рабочий диапазон частот, не вызывает сомнений;
- столь высокие собственные частоты сенсоров нового класса делают возможным их успешную конкуренцию с пьезоэлектрическими акселерометрами. По сравнению с ними они обладают рядом принципиальных преимуществ:

— измерение ускорений от 0 Гц, включая постоянные ускорения;

— гораздо меньшие габаритные размеры и масса (соответственно 0,25...1,0 мм и менее 3 мг);

— большая помехозащищенность ввиду малого выходного сопротивления;

- в 3...4 раза меньшие (с учетом размеров жесткого периметра в МЭМ сенсоре) размеры, т. е. в 9...16 раз меньшая площадь и масса, и в 9...16 раз большее число сенсоров на пластине при их изготовлении;
- отсутствие необходимости профилирования вообще, во всяком случае профилирования прецизионного (для формирования "крыльев"), т. е. более простая технология изготовления.

Технологические задачи при изготовлении "объемных" сенсоров ускорения. Основными технологическими задачами, которые необходимо решить при изготовлении "объемных" сенсоров ускорения нового класса являются:

1. Разработка (доработка) техпроцесса электростатического соединения кремний — стекло (соединения структуры (груза) с тензорезисторами), обеспечивающего:

- соединение со всей поверхностью тензорезисторов и их однородное нагружение;
- высокую прочность соединения (в настоящее время, по информации НИИФИ, г. Пенза, предельные деформации, выдерживаемые соединением, составляют около $2 \cdot 10^{-4}$. Это позволяет создать сенсор, но с невысокими характеристиками — малым сигналом на диапазон и невысокой стойкостью к перегрузкам). Приемлемые предельные деформации — $5 \cdot 10^{-4}$ и выше.

2. Разработка "щадящего" техпроцесса разделения пластины на отдельные сенсоры (ЧЭ), обеспечивающего их неразрушение в результате разделения (абсолютная прочность соединения тензорезисторов со структурой (грузом), учитывая малую площадь соединения, весьма мала и не выдержит прямого разделения резанием диском).

3. Разработка техпроцесса объемной обработки (травление или лазерное разделение и т. д.) стекла (структур-грузов) для формирования "крыльев" (см. рис. 3). При этом в равной степени приемлемо как формирование "крыльев" в соответствии с рис. 3, так и стравливание левой части (относительно тензорезисторов на рис. 3) структуры-груза до толщины, меньшей или равной 0,3 толщины структуры-груза.

4. Разработка комплекса техпроцессов, в котором последовательное выполнение операций по пп. 1...3 не ухудшает характеристики и не делает невозможным проведение следующей технологической операции.

Разработка комплекса перечисленных техпроцессов является непростой, но реальной и выигрышной по ожидаемым результатам задачей.

Есть ограничение (и пока неясно, насколько оно реально) на возможности повышения чувствительности сенсоров нового класса — на увеличение плеча l_2 силы инерции F_0 (расстояния от точки приложения силы инерции до центра условного прямоугольника) и уменьшение l_1 — расстояния между тензорезисторами, лежащими в смежных плечах (ширина условного прямоугольника). Оно связано с тем, что структура (груз) после соединенная с тензорезисторами может оказаться не параллельной поверхности пластины, в которой сформированы тензорезисторы. Это может быть вызвано неплоскостностью (сферичностью) пластины, в которой сформированы тензорезисторы, или случайными флуктуациями толщины мезаструктуры, на которой сформирован тензорезистор. Непараллельность структуры-груза поверхности пластины, в которой сформированы тензорезисторы, приводит: при малой ее величине — к неодинаковости микрозазоров между структурой-грузом и пластиной на краях структуры, что ухудшает защиту сенсора от перегрузок; при значительной ее величине — к необходимости уменьшения сигнала сенсора на диапазон; наконец, при касании структурой-грузом пластины — к невозможности измерений. Оценки, однако, показывают несущественность непараллельности при $l_1 \geqslant 10$ мкм и при $l_2 \leqslant 1$ мм, что охватывает все варианты сенсора нового класса, представленные в табл. 1.

2.5. Объемные сенсоры давления

Квазипланарный сенсор давления нового класса показан на рис. 4, "традиционный" МЭМ сенсор — на рис. 6.

Отличие объемного сенсора от квазипланарного заключается в том, что вместо структуры, представляющей собой объединение тонкой пленки толщиной H (рис. 4, *б*), воспринимающей давление, и кремниевого участка, соединенного одной своей частью с пленкой, а другой с тензорезисторами, структура имеет вид профилированной стеклянной пластины толщиной H и жестким центром в виде квадрата со стороной l_3, соединенной с тензорезисторами и с периферией пластины, в которой сформированы тензорезисторы (электростатическое соединение). С равным успехом можно использовать непрофилированную стеклянную пластину, а профилировать кремниевую, в которой расположены тензорезисторы, либо профилировать обе пластины.

Влияние профилированных областей структуры на характеристики сенсора. В традиционных МЭМ сенсорах чувствительность обратно пропорциональна квадрату толщины концентраторов напряжения, т. е. при разбросе толщины в 1 % разброс чувствительности составит 2 %. Это обусловливает большой ее разброс в традиционных сенсорах, особенно при малых толщинах концентраторов.

Для нормальной работы традиционных сенсоров необходимо обеспечить жесткое закрепление собственно ЧЭ, для чего необходимо, чтобы ширина жесткого бортика ЧЭ была достаточно большой, на уровне 1,5...2 толщин пластины (т. е. порядка 700...900 мкм).

В сенсорах давления нового класса чем меньше жесткость профилированной пластины, тем лучше

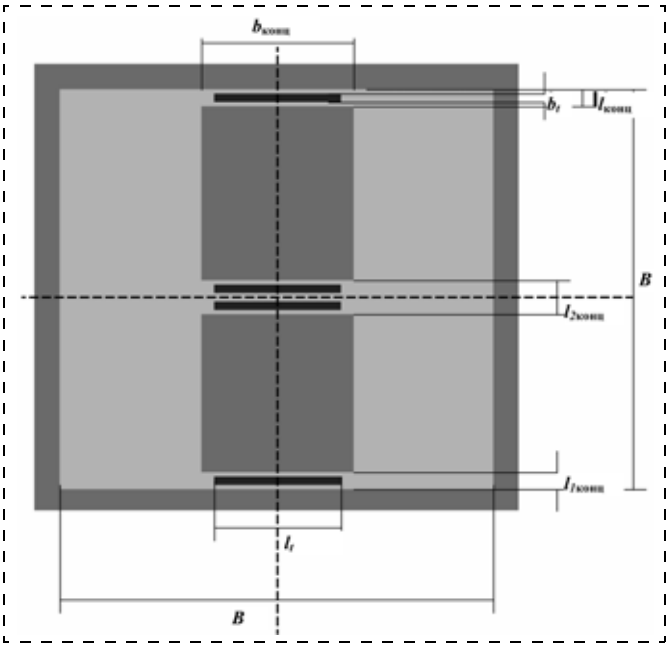

Рис. 6. Мембранный (мембрана с жестким центром) сенсор давления "традиционного" класса, вид сверху: $b_{конц}$ и $l_{конц}$ — ширина и длина концентратора напряжений; b_t и l_t — ширина и длина тензорезистора; B — сторона квадратной "рабочей" области ЧЭ (без бортика жесткости)

передается усилие на структуру. Влияние параметров структуры (профилированной пластины) на чувствительность сенсора можно задать коэффициентом $k_{тонк}$, который равен отношению жесткости профилированной пластины к сумме жесткостей собственно сенсора (жесткости тензорезисторов, умноженной на отношение плеча момента к ширине условного прямоугольника) и может меняться от 0 до 1. В случае, если $k_{тонк}$ близок к единице, влияние разброса толщины профилированной пластины на чувствительность сенсора будет таким же, что и в традиционном сенсоре, а в гистерезис или в нелинейность градуировочной характеристики сенсора в качестве составляющих целиком входят гистерезис и нелинейность профилированной пластины. В случае, если $k_{тонк}$ близок к нулю, то и влияние параметров профилированной пластины на выходные характеристики сенсора (в частности, на чувствительность) будет пренебрежимо мало. Так, при $k_{тонк} = 0{,}01$ при изменении толщины профилированной пластины на 1 % ее жесткость изменится на 2 %, а чувствительность сенсора изменится лишь на 0,02 % (!). Это же относится и к гистерезису, нелинейности и другим составляющим, которые обусловливают погрешность сенсора. Это позволяет использовать в "объемных" и квазипланарных сенсорах давления нового класса структуру и пленки с низкими упругими свойствами без снижения метрологических характеристик сенсора.

Исходные данные и объем расчетов. При расчете характеристик сравнивались конструктивные параметры сенсоров, требуемые для обеспечения диапазонов измерений в 10^{-1}, 10^0, 10^1, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5 Па (высокие давления не рассматривались — они менее интересны, поскольку сенсоры обоих типов в равной степени работоспособны). При этом применя-

Таблица 2

Расчетные толщина концентратора и диапазон давления для традиционного МЭМ сенсора и сенсора нового типа при разных ширинах тензорезисторов

P, 10^5 Па	"Объемный" сенсор (новый)						МЭМ сенсор (традиционный)		
	B, мкм	H, мкм	b_t, мкм	l_1, мкм	l_2, мкм	$k_{тонк}$, б/р	B, мкм	H, мкм	b_t, мкм
$1{,}4 \cdot 10^{-6}$ $5{,}0 \cdot 10^{-6}$	4000 3000	15 20	0,5 0,5	1,2 1,4	100 50	0,27 0,15	— —	— —	— —
$1{,}0 \cdot 10^{-5}$	3000 4000	30 25	0,5 1,0	1,5 2,5	27 100	0,13 0,16	— —	— —	— —
$1{,}0 \cdot 10^{-4}$	3000 3000	25 50	2,0 1,0	5 13	140 100	0,14 0,14	4000 3000	9,29 6,04	1,0 1,0
$1{,}0 \cdot 10^{-3}$	1000 2000	30 50	1,0 2,0	3 14	21 100	0,14 0,17	4000 3000	29,39 19,10	1,0 1,0
$1{,}0 \cdot 10^{-2}$	500 1000	30 50	1,0 2,0	4,4 15	15 50	0,13 0,11	3000 2000	60,39 32,90	1,0 1,0
$1{,}0 \cdot 10^{-1}$	2000 1000	30 30	20,0 10,0	95 30	600 220	0,04 0,20	1000 500	36,88 13,11	1,0 1,0
$1{,}0 \cdot 10^{0}$	1000 500	50 30	20,0 10,0	75 35	250 120	0,09 0,15	1000 500	52,65 31,04	20,0 5,0

лись сенсоры с "рабочей" частью ЧЭ в виде квадрата со стороной $B = 0{,}5$; 1; 2; 3; 4 мм; шириной тензорезисторов b_t 40, 30, 20, 10, 5, 2 и 1 мкм.

Конструктивные параметры МЭМ сенсора оптимизировались (выбирались величины, обеспечивающие наивысшие характеристики с учетом технологических ограничений), именно считалось, что:

- ширина концентраторов напряжения $b_{конц} = l_t + 4b_t$ (две ширины тензорезистора — на контактной площадки и две — запас по несовмещению по краям концентратора);
- длины концентратора $l_{1конц}$ на краях ЧЭ и $l_{2конц}$ в центре ЧЭ равны соответственно $l_{1конц} = b_t + 2 \cdot 5$ мкм ($2 \cdot 5$ мкм — запас на неточность двустороннего совмещения) и $l_{2конц} = 2b_t + 2 \cdot 5$ мкм + 10 мкм ($2 \cdot 5$ мкм — запас на неточность двустороннего совмещения, 10 мкм —расстояние между тензорезисторами).

Определяемые параметры. В традиционном сенсоре рассчитывалась необходимая для реализации требуемого диапазона ускорения толщина $h_{конц}$ концентратора напряжений.

В новом сенсоре рассчитывалась ширина l_1 условного прямоугольника (расстояние между осями тензорезисторов смежных плеч) и подбором находились оптимальные величины l_3 (длина стороны квадратного жесткого центра) и H (толщины тонких областей ЧЭ), обеспечивающие выполнение ограничений на параметры сенсора (см. раздел 2.3) $b_t \ll l_1 \ll l_2$ (l_2 — плечо момента силы) и минимальное (не более 0,2) значение коэффициента ослабления $k_{тонк}$ влияния тонких областей.

Результаты расчетов. Результаты расчетов представлены в табл. 2. Прочерки в ячейках таблицы означают невозможность реализации МЭМ сенсора на данный диапазон давлений (см. ограничения на параметры сенсора в разделе 2.3).

Анализ и обсуждение результатов расчетов. Из табл. 2 видно, что "объемные" (новые) сенсоры давления обладают принципиальными преимуществами (помимо указанных в разделе 2.1) перед МЭМ сенсорами, именно:

- они способны обеспечить (при условии освоения необходимых технологий) измерения сверхмалых давлений вплоть до $1 \cdot 10^{-1}$ Па (!), т. е. на 2...3 порядка меньших, при использовании МЭМ сенсоров;
- при малых (менее 10^4 Па) диапазонах давлений они имеют примерно в 2 раза меньшие размеры (т. е. в 4 раза меньшую площадь), что обеспечивает как миниатюризацию сенсоров, так и увеличение в 4 раза числа ЧЭ на пластине при изготовлении ЧЭ;
- для их реализации не требуются сверхмалые толщины профилированных областей (характерные требуемые толщины профилирования — 30...50 мкм);
- они обладают малой чувствительностью к изменению жесткости и упругих характеристик тонких областей — характерные величины $k_{тонк}$, как видно из таблицы, лежат в интервале 0,04...0,27, т. е. ослабление влияния тонких областей составляет не менее 7 раз. Это означает, в частности, возможность использования в качестве структуры и гибких областей в сенсорах давления нового класса полимерных композиций, что может оказаться гораздо технологичней.

Технологические задачи при изготовлении "объемных" сенсоров давления нового класса. Основными технологическими задачами, которые необходимо решить при изготовлении "объемных" сенсоров давления нового класса, как и в случае сенсоров ускорения, являются:

- разработка (доработка) техпроцесса электростатического соединения кремний—стекло (см. раздел 2.4);
- разработка техпроцесса объемной обработки (травления и др.) стекла (структур-грузов) и/или кремния, совместимого с остальными процессами изготовления ЧЭ;

- разработка комплекса техпроцессов, в котором последовательное выполнение вышеприведенных операций не ухудшает характеристики и не делает невозможным проведение следующей операции.

3. Оценка характеристик квазипланарных сенсоров ускорения и давления

3.1. Квазипланарный сенсор ускорения на 100 и 10*g*

Исходные данные. Оценим ожидаемые характеристики "квазипланарного" сенсора ускорений при двух вариантах исходных данных:

- диапазон a_0 измерений сенсора . . 100 *g*
- деформации ε_0 тензорезисторов на диапазон . . . . . $2 \cdot 10^{-4}$
- модуль упругости *E* материала тензорезисторов . . . . . $2 \cdot 10^{10}$ Па
- поверхностное сопротивление тензорезисторов . . . . . 1000 Ом/□ (удельное сопротивление 0,1 Ом · см, толщина тензорезисторов 1 мкм — ионнолегированные тензорезисторы)
- ширина тензорезисторов
  в первом варианте . . . . . 5 мкм (предельные возможности отечественной технологии)
  во втором варианте . . . . . 1 мкм (реальные — с запасом — возможности зарубежных фирм)
- длина тензорезисторов
  в первом варианте . . . . . 15 мкм
  во втором варианте . . . . . 3 мкм (что соответствует сопротивлению резисторов около 3 кОм — переходные контактные площадки для коммутации тензорезисторов будут утоплены относительно поверхности тензорезисторов и поэтому не учитываются)
- ширина условного прямоугольника (расстояние между тензорезисторами смежных плеч моста)
  в первом варианте . . . . . 15 мкм
  во втором варианте . . . . . 4 мкм

При этом считаем, что

- масса "крылышек-ограничителей", расположенных слева (см. рис. 3) пренебрежимо мала по сравнению с инерционной массой;
- толщина инерционной массы равна 20 мкм при плотности ее материала 20 г/см^3 (толстая пленка золота);
- ширина *B* инерционной массы в 2 раза больше ее длины (протяженности инерционной массы, начиная от центра условного прямоугольника вправо до края массы), а длина "крылышек-ограничителей" равна длине инерционной массы (так что сенсор представляет собой квадрат со стороной, равной *B*).

Результаты расчетов. Определялись величина *B*, необходимая для обеспечения указанного диапазона измерений и собственная частота ν_0 сенсора:

b_t = 5 мкм → a_0 = 100*g*; *B* = 1,2 мм; ν_0 = 13 кГц.
b_t = 1 мкм → a_0 = 100*g*; *B* = 270 мкм; ν_0 = 22 кГц.
b_t = 1 мкм → a_0 = 10*g*; *B* = 580 мкм; ν_0 = 4,8 кГц.

Анализ и обсуждение результатов, технологические задачи. Полученные результаты расчетов позволяют сделать следующие выводы.

- Квазипланарные сенсоры ускорения позволяют реализовать "наноминиатюризацию" сенсоров ускорения на диапазоны ускорений от 10*g* и выше. Размеры сенсора менее 300 мкм позволяют разместить три (по числу осей) сенсора ускорений вместе со схемой обработки на одном кристалле размерами порядка 2 × 2 мм.
- При этом они обеспечивают получение достаточно высокой собственной частоты, как минимум, не меньшей, чем у выпускаемых пьезорезистивных и емкостных МЭМ сенсоров.
- Для их реализации необходимо разработать совместимый с остальными техпроцессами изготовления квазипланарного сенсора технологический процесс получения толстых (порядка 10 мкм и больше) металлических пленок из металлов со значительной (~ 20 г/см^3) плотностью.

3. Квазипланарный сенсор давления на 10^5 и 10^4 Па

Для расчетов были выбраны те же исходные параметры, что и в случае квазипланарного сенсора ускорений. Результаты вычислений приведены в табл. 3 и 4 (см. также рис. 4).

Таблица 3

Квазипланарный сенсор давления с *B* = 100 мкм

B_t, мкм	l_1, мкм	*B*, мкм	l_3, мкм	*H*, мкм	$K_{тонк}$, б/р	*P*, 10^5 Па
2	15	100	40	2	0,03	1
2	15	100	80	0,5	0,14	0,5
1	10	100	40	2	0,2	0,17
1	20	100	80	0,5	0,18	0,16
0,5	20	100	80	0,5	0,38	0,05
0,2	20	100	80	0,2	0,15	0,06
0,1	20	100	80	0,2	0,38	0,002

Таблица 4

Квазипланарный сенсор давления с *B* = 30 мкм

B_t, мкм	l_1, мкм	l_3, мкм	*H*, мкм	$k_{тонк}$, б/р	*P*, 10^5 Па
0,5	4	6	0,5	0,001	1,53
0,5	2	6	0,5	0,008	0,77
1	4	22	0,25	0,170	1,51
0,5	4	14	0,25	0,016	0,47
0,2	4	6	0,25	0,001	0,17
0,1	4	6	0,25	0,003	0,04

Полученные результаты расчетов позволяют сделать следующие выводы:

- квазипланарные сенсоры давления позволяют реализовать "наноминиатюризацию" сенсоров давления на диапазоны давлений от 10^3 Па и выше при наноразмерах сенсора (30...100 мкм);
- при этом они обеспечивают минимизацию влияния упругих характеристик тонких областей на выходные характеристики сенсора (коэффициент ослабления не меньше 10), что позволяет использовать для формирования структуры и тонких областей в сенсоре неметаллические пленки с низкими упругими характеристиками.

Выводы

- ◆ Предложенный и описанный в статье новый класс пьезорезистивных сенсоров с энергией деформации, близкой к энергии деформации тензорезисторов, обладает принципиальными преимуществами по сравнению с существующими пьезорезистивными сенсорами и обеспечивает:
- более высокие, близкие к предельным достижимым теоретически, основные характеристики сенсоров (чувствительность, быстродействие, минимальные габаритные размеры, включая возможность уменьшения размеров сенсора давления до нескольких десятков, а ускорения — до нескольких сотен микрометров);
- минимальный разброс чувствительности;
- более простую технологию изготовления, не требующую профилирования вообще либо резко упрощающую выполнение этой операции — допустимы гораздо большие отклонения и разброс по толщине профилированных областей, а сами толщины могут быть гораздо большими;
- совместимость технологии изготовления преобразователя с технологией изготовления схем усиления и обработки сигнала, что делает целесообразным их одновременное изготовление в одном технологическом цикле в виде одного кристалла (микросхемы) и снижает их стоимость.
- ◆ В случае успешной разработки и серийного освоения (изготовления) сенсоров нового типа они могут занять значительную часть быстро развивающегося мирового рынка сенсоров механических величин, составляющего в настоящее время (по разным оценкам) от 2 до 4 млрд долл. (в год).
- ◆ Новый класс пьезорезистивных сенсоров (в отличие от существующих пьезорезистивных и емкостных сенсоров) обеспечивает решение перспективных задач развития сенсоров механических величин и микросистем на их основе:
- микро- и наноминиатюризацию сенсоров (реальные размеры сенсора ускорений 200 мкм, а давления — 30 мкм) при одновременном повышении их характеристик;
- создание многоканальных (включающих несколько сенсоров) микросистем;
- выполнение микросистем с сенсорами и схемами обработки на одном кристалле в виде бескорпусной микросхемы.

Заключение

В статье кратко описаны сенсоры нового класса. Детальное изложение оптимальных конструктивно-технологических решений сенсоров ускорения и давления, защиты сенсоров от перегрузок, а также технологических проблем и возможных путей их решения автор предполагает дать в очередной статье.

В настоящее время проводится патентование нового класса пьезорезистивных преобразователей (поданы российская и международная заявки).

Автор заинтересован в организационном, финансовом и техническом сотрудничестве с фирмами и специалистами, готовыми решать организационные, финансовые и технические вопросы по патентованию, организации выполнения и проведению ОКР и НИР, подготовке и организации серийного выпуска сенсоров нового класса.

Список литературы

1. **Балакирев А**. Акселерометры компании Measurement Specialties // Компоненты и технологии. 2007. № 7.
2. **Сайт** Analog Devices: http://www.analog.com.
3. **Пивоненков Б. И.** Способ измерений физических величин пьезорезистивными преобразователями и преобразователь. Российская заявка от 22.12.2009, регистрационный номер 2009147327, международная заявка от 22.12.2009, номер PCT/RU 2009/000706.
4. **Шелепин Н. А., Брехов Р. С.** Интегральный кремниевый тензоакселерометр. Патент РФ № 2072728 от 24.02.1994 (G01P15/12).
5. **Пивоненков Б. И.** Критерий качества сенсоров механических величин // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 10 (в печати).

УДК 621.315.522

А. В. Войцеховский, д-р физ.-мат. наук, проф.;
А. П. Коханенко, д-р физ.-мат. наук, ст. научн. сотр.;
А. Г. Коротаев, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр.;
Д. В. Григорьев, канд. физ.-мат. наук, доц.,
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный университет",
e-mail: 745-denn@elefot.tsu.ru,
Н. А. Кульчицкий, д-р техн. наук, проф.;
А. А. Мельников, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики" (технический университет, г. Москва),
e-mail: n.kulehitsky@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОДЕТЕКТОРОВ ИЗ HgCdTe

Приведен обзор имеющихся данных по влиянию облучения на характеристики фотодетекторов из HgCdTe. Рассмотрено влияние облучения γ-квантами и электронами. Показано, что фотоприемники с пассивацией CdTe имеют высокую радиационную стойкость.

Ключевые слова: *теллурид кадмия-ртути, радиационные дефекты, фотодетектор*

Введение

В настоящее время для создания ИК фотоприемников наиболее широко используют полупроводниковое соединение $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (КРТ) прежде всего, потому что оно позволяет получать детекторы с рабочими характеристиками, близкими к теоретически возможным, и изменять граничную длину волны в диапазоне 1,5...20 мкм путем варьирования соотношения ртути и кадмия.

В связи с широким применением КРТ-фотодетекторов основная масса работ по исследованию радиационных воздействий посвящена влиянию облучения на пороговые характеристики как дискретных, так и матричных фотоприемников различного типа. В данной статье на базе литературных данных рассмотрены вопросы радиационной стойкости фотодетекторов, созданных на основе узкозонных полупроводниковых соединений HgCdTe.

Влияние облучения на одноэлементные фотодетекторы

В первых одноэлементных ИК детекторах пассивирующие покрытия применяли для сохранения характеристик прибора, но не включали диэлектрик в качестве неотъемлемой части активного элемента. В этом случае долговременная деградация определялась дефектами решетки. Установлено, что в фоторезисторах дефекты решетки влияют, в основном, на концентрацию электронов [1—7]. Радиационно-индуцированные доноры увеличивают концентрацию электронов, что приводит к деградации фоточувствительности. Так, введение концентрации радиационных доноров, равной $1 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$, уменьшает фотоотклик в 2 раза.

Подробный анализ имеющихся представлений о механизмах радиационного дефектообразования при различных воздействиях на КРТ проведен в работе [8].

Число смещений атомов на один электрон для первичных смещений $N_{перв}$ слабо изменяется в интервале энергий 1...2 МэВ для исследуемых соединений (табл. 1) и составляет для энергии смещения атома 4,0 эВ значение 36...38 см$^{-1}$. С учетом каскадных соударений число смещений $N_{полн}$ составляет 46...61 см$^{-1}$ для E_d = 4,0 эВ. При расчете с другой энергией смещения атома (8,0 эВ) число смещений атомов уменьшается в 2—2,5 раза.

Если считать, что число смещений атомов соответствует числу введенных дефектов (или числу носителей заряда) при низких температурах, когда могут существовать первичные дефекты типа вакансий и междоузельных атомов, рассчитанное значение скорости введения дефектов удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными [3, 5].

При рассмотрении воздействия гамма-квантов предполагалось, что взаимодействие облучения с полупроводниковыми кристаллами складывается из следующих основных процессов: фотоэффект; когерентное или томсон-рэлеевское рассеяние; некоге-

Таблица 1

Число смещений атомов соединения $Hg_{1-x}Cd_xTe$ в расчете на один падающий электрон

Элементы	Число атомов $\times 10^{-22}$, см$^{-3}$	E_d = 4,0 эВ				E_d = 8,0 эВ	
		E = 2,0 МэВ		E = 1,0 МэВ		E = 2,0 МэВ	
		$N_{перв}$	$N_{полн}$	$N_{перв}$	$N_{полн}$	$N_{перв}$	$N_{полн}$
Hg	1,18	19,79	32,68	20,94	25,24	10,09	13,93
Cd	0,296	2,49	4,87	2,52	3,34	1,22	1,84
Te	1,48	13,29	22,15	13,23	17,79	6,38	9,05
$Hg_{1-x}Cd_xTe$	2,98	35,57	59,70	36,69	46,37	17,69	24,46

Таблица 2

Пороги деградации для различных типов излучения

Тип излучения	Температура облучения, К	Пороговый поток
Нейтроны деления	78	3×10^{14} см$^{-2}$
14 МэВ нейтроны	78	1×10^{14} см$^{-2}$
2 МэВ электроны	78	6×10^{14} см$^{-2}$
Гамма-излучение Co^{60}	78	2×10^{7} рад

рентное или комптоновское рассеяние; рождение пар электрон—позитрон в поле ядра и в поле атомных электронов (учитывалось лишь при энергиях, превышающих 1,022 МэВ).

Из расчета следует, что для энергии менее 1 МэВ в основном характерен фотоэффект, более 1 МэВ превалирующим механизмом поглощения является эффект комптоновского рассеяния, а для энергий свыше 5 МэВ основной вклад вносит эффект образования пар.

Расчет возможности введения электрически активных примесей путем облучения узкозонного полупроводникового твердого раствора КРТ ($x = 0{,}20$) тепловыми нейтронами показал, что элементный состав КРТ может изменять довольно значительно, однако эффективности ядерных реакций в КРТ невелики.

В работе [9] разработаны модели дефектообразования при воздействии сильноточных ионных пучков, однако такие режимы ионного облучения возможны лишь в искусственных условиях.

Необходимо отметить, что, несмотря на большой накопленный экспериментальный материал, до сих пор нет однозначных моделей радиационного дефектообразования в КРТ. Большинство исследователей считают, что наблюдаемые изменения электрофизических параметров облученного материала можно объяснить преимущественным образованием радиационных дефектов в металлической подрешетке HgTe.

В фотовольтаических детекторах основным параметром, на который влияют дефекты решетки, является время жизни неосновных носителей заряда [10].

Оценки порога деградации, определяемого как поток излучения, при котором чувствительность падает в 2 раза, для фотодетекторов на основе HgCdTe (КРТ) приведены в табл. 2 [11].

Влияние облучения на матричные фотодетекторы

С конца 70-х годов прошлого века развитие фотодетекторов было направлено на создание многоэлементных матриц, для которых требуется пассивация поверхности между отдельными чувствительными элементами. Для матриц на КРТ наиболее распространенной конструкцией являются *n—p*-фотодиоды, пассивированные диэлектриком ZnS, который эффективно захватывает носители заряда, и процессы ионизации становятся более существенными, чем образование дефектов решетки. Поэтому большинство работ посвящено этому эффекту и борьбе с ним, в частности, применению альтернативных пассивирующих покрытий [12—19].

Изучение вольт-фарадных характеристик МДП-структур показывает, что ZnS захватывает и электроны, и дырки, причем результирующий заряд определяется полярностью приложенного смещения [12—16]. Значение приложенного смещения и качество поверхности КРТ определяют значение захваченного заряда и, следовательно, сдвиг поверхностного потенциала. Таким образом, индуцированный облучением заряд в ZnS может вызывать или обогащение, или обеднение (и, в конечном итоге, инверсию, приводя к возрастанию взаимных помех ввиду наличия проводящего канала между чувствительными элементами) поверхности КРТ между диодами. В любом случае это приводит к увеличению поверхностных токов утечки и деградации рабочих характеристик (рис. 1) [12].

ZnS настолько эффективно захватывает заряд, что в пассивированных этим диэлектриком КРТ-матрицах деградация наблюдается при небольших экспозициях в диапазоне $3 \cdot 10^3 ... 5 \cdot 10^4$ рад. Вообще говоря, исходно более качественные детекторы (например, имеющие более высокое значение R_0A) менее чувствительны к ионизационным воздействиям, но к концу 80-х годов XX века стало ясно, что ZnS не подходит для пассивации КРТ-матриц.

В некоторых случаях радиационную стойкость матриц КРТ фотодетекторов позволяло повысить применение альтернативных диэлектриков, но проблему это не решило. Было обнаружено, что в ряде случаев приборы без пассивирующего покрытия даже более устойчивы к радиации (рис. 2).

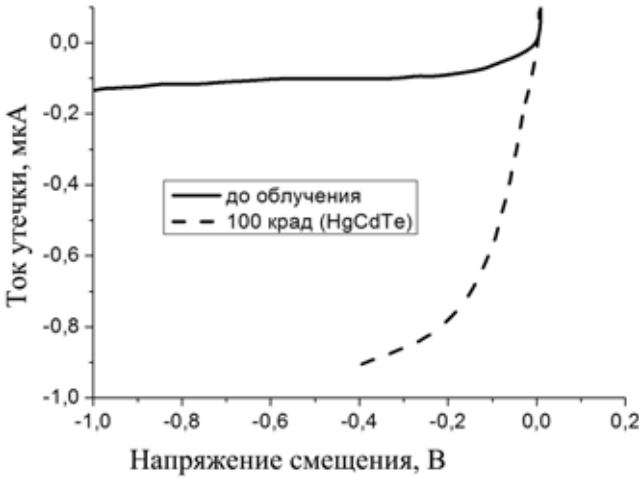

Рис. 1. Радиационно-индуцированное увеличение тока утечки в КРТ фотодиоде, пассивированном ZnS. Доза облучения 1×10^5 рад, $T = 125$ К [12]

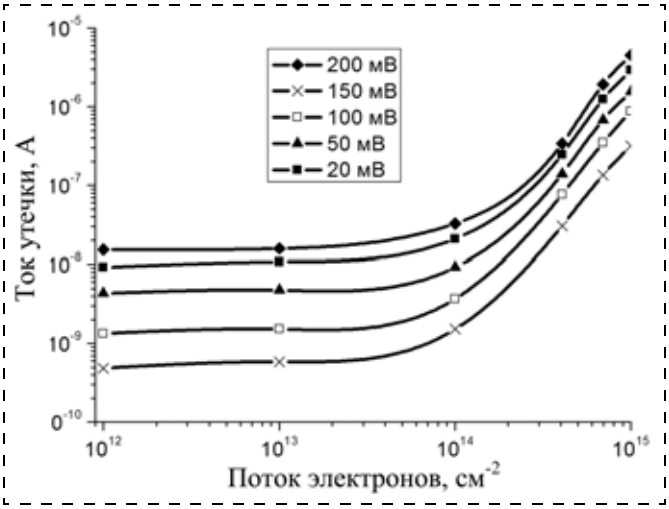

Рис. 2. Увеличение тока утечки КРТ-фотодиода без пассивирующего покрытия при электронном облучении для различных значений напряжения смещения. Температура облучения — 77 К [13]

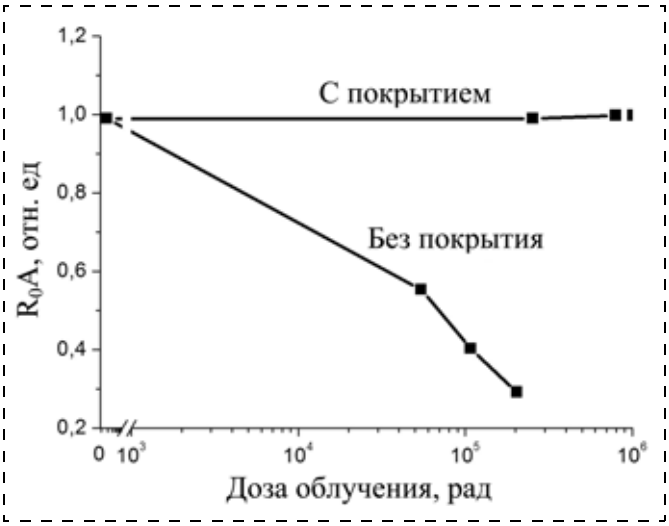

Рис. 3. Радиационная стойкость КРТ-матрицы с CdTe пассивирующим покрытием; T = 80 К [24]

Однако пассивация для обеспечения стабильности работы приборов на основе КРТ весьма существенна, поэтому устранение пассивирующего покрытия — не лучшее решение.

В конце 70-х — начале 80-х годов прошлого века большинство производителей КРТ-матриц освоили методику нанесения CdTe пассивирующего покрытия, которое подходит для КРТ намного лучше, чем ZnS или любое другое ранее использовавшееся. Применение CdTe позволило получать матрицы с высокими характеристиками и большой однородностью. В настоящее время большинство производителей переходят также от конструкции типа *n*—*p*-перехода к конструкции *p*—*n*-переходов для фотодиодов. Использование такой конструкции в сочетании с покрытием CdTe приводит к существенному улучшению рабочих характеристик приборов. Одним из первых результатов применения CdTe стало значительное увеличение радиационной стойкости [20—23]. КРТ-фотодетекторы с пассивирующим покрытием из CdTe сохраняют работоспособность до доз облучения более 1 Мрад (рис. 3). Это означает, что радиационная стойкость гибридных матриц теперь определяется не реакцией на облучение матрицы чувствительных элементов, а реакцией схемы считывания.

Гибридные матрицы с незащищенными схемами считывания выходят из строя при облучении дозой несколько десятков килорад. Можно получить защищенную схему считывания, сохраняющую работоспособность до одного мегарада при криогенных температурах, но стоимость таких изделий высока. Однако современная тенденция использования микросхем с высокой плотностью элементов благоприятна для повышения радиационной стойкости, так как толщина оксидных слоев в таких устройствах меньше, и значение порога инверсии в плотноупакованных схемах выше. Субмикронные технологии позволяют создавать радиационно-стойкие схемы считывания, необходимые для многих применений в условиях космоса, в коммерческих масштабах.

Благодаря методу молекулярно-лучевой эпитаксии появилась возможность создавать в одном технологическом процессе КРТ-пленки с переменной по толщине шириной запрещенной зоны и качественным пассивирующим покрытием из CdTe, которое должно иметь высокую радиационную стойкость [25, 26].

Постоянная деградация является важным аспектом реакции ИК-детектора на облучение, но нестационарности, порождаемые ионизационными процессами часто оказываются более важной проблемой. В частности, нестационарности, вызываемые воздействием космических лучей, представляют существенную проблему для ИК матриц фотодетекторов, используемых в астрономии космического базирования. Этот эффект схож с одиночной волной нестационарности, создаваемой тяжелым ионом в обычной интегральной микросхеме, но в высокочувствительном ИК фотодетекторе он вызывается даже одиночным электроном.

Воздействие гамма-излучения на КРТ-фотодетекторы рассматривается в работах [15, 16, 22—24]. При воздействии гамма-излучения в детекторе генерируется последовательность импульсов, причем большинство импульсов не являются следствием прямого воздействия излучения на детектор. Скорее всего, за счет фотоэлектрического эффекта и комптоновского рассеяния в окружающем материале генерируются вторичные электроны, которые и взаимодействуют с детектором. Основная причина получаемого распределения импульсов заключается в разбросе длин свободного пробега вторичных электронов в объеме детектора. Другой причиной является разная скорость потерь энергии вторичных электронов с различной исходной энергией.

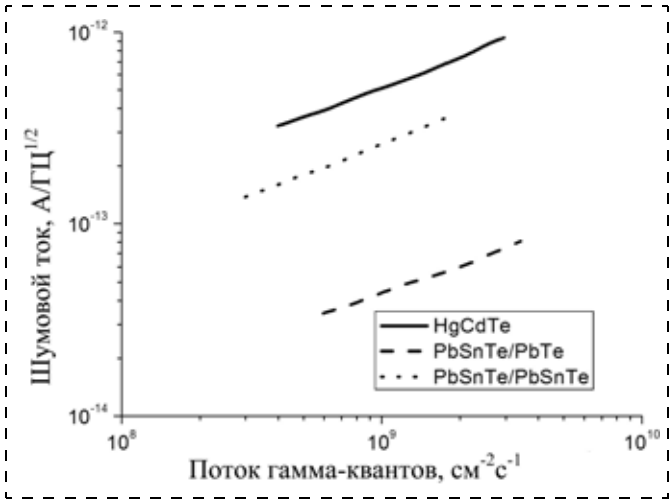

Рис. 4. Шумовые токи, индуцированные гамма-облучением в КРТ и PbSnTe-фотодетекторах; T = 77 К [12]

В работе [27] получено выражение для точного расчета распределения амплитуд индуцированных облучением импульсов, но его аналитическая форма довольно сложна, и для решения требуется компьютерное моделирование. Поэтому обычно в расчетах считается, что распределение амплитуд импульсов приблизительно экспоненциальное, и оно рассчитывается с использованием значений средней амплитуды и средней общей вероятности. Это приводит к недооценке числа импульсов малой амплитуды и переоценке числа импульсов большой амплитуды. Экспериментальные значения шумов для КРТ-фотодетектора приведены на рис. 4.

Предлагается несколько вариантов отделения оптически индуцированного заряда от заряда, индуцированного ионизацией атомов при облучении. Эти методы называются внутренней селекцией событий. Предпосылкой для этих методов является то, что для заряда, индуцированного ионизацией, энергетические состояния лежат в валентной зоне и зоне проводимости, в то время как энергетические состояния оптически индуцированного заряда — связанные. Однако никаких реальных конструкций, основанных на этих методах, явка не создано, и пока еще вопрос, насколько хорошо (и даже возможно ли это в принципе) такое устройство будет устранять отклик, индуцированный ионизацией.

Есть несколько довольно успешных попыток применения микролинз, чтобы снизить электрическую площадь детектора, не уменьшая оптической. При этом уменьшается объем, в котором генерируются токи утечки, а полный фотоотклик остается таким же, даже в отсутствие защиты от ионизирующего излучения. В дополнение к этому, поскольку ионизирующие частицы не фокусируются микролинзами, число радиационно-индуцированных импульсов также снижается.

В случае быстрого набора дозы наблюдается большой импульс тока [12, 24]. Время отклика ИК детектора на такое воздействие обычно определяется параметрами электрической цепи, а не самого детектора.

Заключение

Радиационные эффекты в ИК фотодетекторах продолжают привлекать внимание, так как совершенствуются технологии изготовления и растет спрос на приборы данного типа. Деградация за счет дефектов смещения атомов была проблемой для ранних дискретных приборов. Для современных ИК матриц эти дефекты не являются основной проблемой, так как основное ограничение обусловлено ионизационными эффектами. Но эта проблема для детекторов на КРТ была решена применением пассивирующего покрытия из CdTe. Однако во всех конструкциях детекторов, даже имеющих устойчивые к радиации чувствительные элементы, есть подверженная радиационному воздействию схема считывания сигнала. Тенденция к использованию технологий высокой плотности в схемах считывания способствует увеличению их стойкости к воздействию ионизирующей радиации, поскольку оксидный слой становится тоньше и порог поверхностной инверсии выше. Применение технологии обеспечения радиационной стойкости конструктивно-схемными решениями (*hardening-by-designe*) позволит создавать в коммерческих масштабах схемы считывания с подходящей радиационной стойкостью.

Важной проблемой остаются также нестационарности и шумы, порождаемые воздействием отдельных гамма-квантов и космических частиц (электроны, протоны, тяжелые ионы). Для борьбы с этими явлениями требуется разработка новых конструкций детекторов и алгоритмов обработки сигнала

Список литературы

1. **Mallon C. E., Naber J. A., Colwell J. F., Green B. A.** Effects of electron irradiation on the electrical and optical properties of HgCdTe // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1973. Vol. 20. P. 214—217.

2. **Shepherd F. D.** Radiation effects on the spectral response of HgCdTe // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1974. Vol. 21. P. 34—38.

3. **Leadon R. E., Mallon C. E., Naber J. A.** Effects of radiation on the low-temperature carrier recombination lifetimes in HgCdTe // Proc. Int. Conf. Radiation Effects in Semiconductors. London, U. K.: Inst. Phys. 1977. P. 514—519.

4. **Voitsekhovskii A. V., Lilenko Yu. V., Kokhanenko A. P., Petrov A. S.** High temperature electron irradiation and isochronal annealing of p-Type HgCdTe crystals // Rad. Eff. 1982. Vol. 66. P. 79—82.

5. **Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Коверчук С. Ф., Лиленко Ю. В., Петров А. С.** Характеристики облученного электронами HgCdTe при различных температурных обработках // ФТП. 1983. Т. 17. С. 1119—1124.

6. **Voitsekhovskii A. V., Kokhanenko A. P., Petrov A. S., Lilenko Yu. V., Pogrebnyak A. D.** Investigation of radiation defects in electron irradiated HgCdTe crystals using positron annihilation // Cryst. Res. Technol. 1988. Vol. 23. P. 237—241.

7. **Ivanov-Omskii V. I., Kutekhov N. V., Smirnov V. A., Yuldashev Sh. U., Gadaev O. A.** Neutron irradiation of CdHgTe // Sov. Phys. — Semiconduct. 1992. Vol. 26. P. 238—246.

8. **Kalma A. H.** Nuclear and space radiation effects in infrared detectors // Proc. SPIE. 1980. Vol. 217. P. 186—197.

9. **Voitsekhovskii A. V., Kokhanenko A. P., Shulga S. A., Smith Roger.** A model for the prediction of radiation defect profiles in the semiconductor target (HgCdTe) subjected to high power short pulsed ion beams // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2005. V. 227. P. 531—544.

10. **Reine M. B., Sood A. K., Tredwell T. J.** Photovoltaic infrared detectors // Semiconductors and Semimetals / R. K. Willardson and A. C. Beers, Eds. New York: Academic, 1981. Vol. 18. P. 201—311.

11. **Pickel J. C., Kalma A. H., Hopkinson G. R.** Radiation effects on photonic imagers — a historical perspective // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2003. Vol. 50, N 3. P. 671—686.

12. **Kalma A. H., Cesena R. A.** Radiation testing of trimetal infrared detectors // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1979. Vol. 26. P. 4833—4838.

13. **Domkowski D. W., Feller D. G., Johnson L. R., Westmark C. I., Norris C. B., Fuller C. T., Bajaj J.** Effects of 6 MeV electron irradiation on the electrical characteristics of LPE HgCdTe mesa photodiodes // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1986. Vol. 33. P. 1471.

14. **Kalma A. H., Hopkins M. A.** Ionizing radiation effects in HgCdTe MIS capacitors // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1981. Vol. 28. P. 4083—4089.

15. **Williams G. M., Vanderwyck A. H. B., Blazejewski E. R., Ginn R. P., Li C. C., Nelson S. J.** Gamma radiation response of MWIR and LWIR HgCdTe photodiodes // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1987. Vol. 34. P. 1592—1598.

16. **Hubbs J. E., Dole G. A., Gramer M. E., Arrington D. C.** Radiation effects characterization of infrared focal plane arrays using the Mosaic array test system // Opt. Eng. 1991. Vol. 30. P. 1739—1742.

17. **Kalma A. H., Hartmann R. A., Janousek B. K.** Ionizing radiation effects in HgCdTe MIS capacitors containing a photochemically deposited SiO@2 layer // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1983. Vol. 30. P. 4146—4151.

18. **Moriwaki M. M., Srour J. R., Strong R. L.** Charge transport and trapping in HgCdTe MIS devices // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1992. Vol. 39. P. 2265—2271.

19. **Waterman J. R., Schiebel R. A.** Ionizing radiation effects in *n*-channel (Hg,Cd)Te MISFET's with anodic sulfide passivation // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1987. Vol. 34. P. 1597—2002.

20. **Finkman E., Schacham S. E.** Interface properties of various passivations of HgCdTe // Proc. SPIE. 1989. Vol. 198. P. 1106—1111.

21. **Blazejewski E. R., Williams G. M., Vanderwyck A. H., Edwall D. D., Gertner E. R., Ellsworth J., Fishman L., Hampton S. R., Vydynath H. R.** Advanced LWIR HgCdTe detectors for strategic applications // Proc. SPIE. 1994. Vol. 278. P. 2217—2225.

22. **Hu X., Li X., Lu H., Zhao J., Gong H., Fang J.** Effect of gamma irradiation on room-temperature SWIR HgCdTe photodiodes // Proc. SPIE. 1998. Vol. 85. P. 3553—3558.

23. **Hu X., Li K. X., Fang J.** Influence of gamma irradiation on the performance of HgCdTe photovoltaic devices // Proc. SPIE. 1999. Vol. 920. P. 3698—3702.

24. **Divita E. L., Holtzman M. J., Mills R. E., Walsh D. T.** Methodology for testing IR detectors in simulated nuclear radiation environments // Proc. SPIE. 1989. Vol. 274—279. P. 1108.

25. **Патент № 2244365 (РФ).** Фотоприемное устройство / Гусаров А. В., Володин Е. Б., Ларцев И. Ю., Смолин О. В., Сусов Е. В. 2003.

26. **Патент № 2244365 (РФ).** Фоторезистор на основе гетероэпитаксиальной структуры (CdHgTe) (Варианты) / Гусаров А. В., Ларцев И. Ю., Смолин О. В., Сусов Е. В. 2003.

27. **Pickel J. C., Petroff M. D.** Nuclear radiation induced noise in infrared detectors // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1975. Vol. 22. P. 2456—2461.

СОЗДАН МНОГОВОЛНОВОЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ РЕФЛЕКТОМЕТР ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НАНОСТРУКТУР

Физики и инженеры-электронщики из Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) и конструкторы из ООО "Институт рентгеновской оптики" (ИРО) совместно создали многоволновой рентгеновский рефлектометр для диагностики наноструктур. Разработка оказалась удачной и оправдала себя, начинается изготовление второго коммерческого образца установки.

Рентгеновская рефлектометрия применяется для бесконтактной неразрушающей диагностики слоистых тонкопленочных наноструктур. Этот метод позволяет определить толщину слоев пленок нанометровой толщины или шероховатость поверхностей, период многослойных наноструктур и диффузионное размытие внутренних границ раздела.

Разработка ФИАН совместно с ИРО — многоволновой рефлектометр "*X-Ray MiniLab-N*" (*N* — число исходно возможных аналитических функции). По сравнению с существующими одноволновыми рефлектометрами многоволновой рефлектометр "*X-Ray MiniLab-N*" имеет более высокие метрологические характеристики, впервые позволяет проводить одновременные измерения на нескольких длинах волн и обеспечивает новые диагностические возможности анализа поверхности слоев. Под аналитическими функциями, по совокупности которых установка не имеет мировых аналогов, имеются в виду такие методики исследований, как рефлектометрия, дифрактометрия, рефрактометрия, малоугловое рассеяние, рентгено-флуоресцентный анализ и др. Из-за совмещения большого числа методик исследований в одной установке система и называется минилабораторией. При этом число необходимых аналитических функций определяется конкретно под каждого заказчика в соответствии с его задачами и потребностями.

Родоначальником идеи является Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН в лице специалистов ФИАН — доктора физ.-мат. наук Александра Турьянского (руководитель проекта), доктора физ.-мат. наук Александра Виноградова и канд. техн. наук Игоря Пиршина. В начале 2000-х годов эти фиановские физики запатентовали разработанную ими измерительную схему двухволнового рефлектометра и создали экспериментальный макет установки (на котором, кстати говоря, работают до сих пор). Идея была коммерциализована с помощью сотрудников Института рентгеновской оптики.

"Мы являемся активными экспериментаторами, поэтому и система проектировалась так, чтобы была возможность модернизации с целью постановки дополнительных экспериментов. Так что оператор, работающий на установке, может установить на прибор необходимые дополнительные устройства, наращивающие аналитические возможности", — комментирует Александр Турьянский.

Это существенно отличает многоволновой рефлектометр "*X-Ray MiniLab-N*" от "принципиально подобных" зарубежных систем (не от аналогов, так как их нет), потому что зарубежные компании на сегодняшний день менять в своих установках ничего не разрешают. Пойти наперекор предписанным ими правилам означает возможность оказаться снятым не только с гарантийного обязательства, но и с технического обслуживания. При коммерциализации многоволнового рефлектометра было решено пойти иным путем — определять окончательную конфигурацию системы вместе с заказчиком. Так, первым заказчиком, уже работающим на установке, стал Московский институт электронной техники (МИЭТ). Их установка, ставшая первым коммерческим образцом, имеет пять аналитических функций и поэтому, согласно условленному правилу названия установки, называется "*X-Ray MiniLab-5*".

"Насколько мне известно, система работает безотказно и заказчик очень доволен. В настоящее время получен заказ Южного федерального университета, для них мы начнем изготовление второго коммерческого образца. Там пока определяются с количеством необходимых аналитических функций", — рассказывает Турьянский.

Представляется, что разработанная минилаборатория будет востребована для диагностики наноструктур российского производства.

"Недавно мы проводили сравнительные испытания с одним из лучших образцов зарубежного представителя, который поставляет похожее оборудование. Название говорить не буду, но могу сказать, что система установлена в Институте стали и сплавов. Испытания проводились независимо, то есть никто из представителей обеих сторон не участвовал. В итоге, по рентгенооптическим измерениям тонких пленок наша минилаборатория имела лучше результаты, чем зарубежная, существенно более дорогая система", — делится Александр Турьянский.

Таким образом, на рынок выведена многофункциональная установка для исследования наноструктур, что можно считать еще одним шагом в развитии нанотехнологий и приборостроения.

СОЗДАНЫ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВЫСОКОСТЕХИОМЕТРИЧЕСКИЕ ОКСИДЫ ДЛЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

В Физическом институте им. П. Н. Лебедева в сотрудничестве с Московским инженерно-физическим институтом созданы перспективные материалы на основе оксидов переходных металлов, необходимые для изготовления функциональных элементов наноэлектроники.

Стремительный процесс миниатюризации полупроводниковых приборов требует новых материалов. Ключевой элемент таких приборов — так называемые МДП-структуры (МДП — металл/диэлектрик/полупроводник). Диэлектрические слои абсолютно необходимы для их работы, но чем они тоньше, тем сложнее их получить. Рабочие параметры используемого в качестве диэлектрика в настоящее время диоксида кремния (SiO_2) сегодня практически доведены до предельных значений. Представляем первую, только что завершенную часть работы, в которой получены и исследованы на предмет пригодности для наноэлектроники четыре группы оксидов на основе переходных металлов (элементов побочных подгрупп Периодической системы Д. И. Менделеева с переменной валентностью).

"Получить оксиды переходных металлов — это не просто взять и присоединить кислород к металлу. Это достаточно специфический, строго контролируемый процесс, требующий решения целого ряда как физических, так и практических задач", — объясняет руководитель группы разработчиков зам. директора ФИАН по научной работе, доктор физ.-мат. наук, профессор Владимир Неволин.

Молодым ученым из МИФИ под руководством проф. В. Н. Неволина удалось не только показать, что одним из самых перспективных для наноэлектроники диэлектриков будет оксид европия, но и исследовать особенности технологического процесса получения этого материала. "*Проблема в том,* — продолжает свой рассказ Владимир Неволин, — *что оксид состава EuO, который нужен для решения подобных задач, не может просто так существовать, он неустойчивый и тут же начнет дополнительно присоединять кислород и переходить в конечную фазу — Eu_2O_3. Значит, нужно так изобразить технологический процесс, чтобы получить EuO, строго дозируя количество осаждаемых атомов (!) европия и участвующих в этом атомов кислорода, чтобы получился именно EuO. Но при этом нужно иметь возможность тут же, в сверхвысоком вакууме, как только получится EuO, во-первых, in situ показать, что это именно так, и, во-вторых, накрыть его каким-то слоем для того, чтобы не дать кислороду дополнительно зайти туда"...*

Такую задачу удалось решить методом импульсного лазерного прецизионного осаждения, осуществляемого при достаточно неравновесных условиях. Этот метод не является ни промышленным, ни даже полупромышленным, но именно он позволяет отработать конкретную технологию получения конкретного слоя или комбинации слоев. В сверхвысоковакуумном объеме у вас есть возможность введения лазерного излучения, осуществления прецизионного лазерного осаждения слоев, и кроме этого исследователь располагает, скажем, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией, которая будет в реальном масштабе времени наблюдать за ростом и давать информацию о нем. Лишь по результатам таких работ, как представляемая в настоящем сообщении, можно далее переходить к отработке технологии на полупромышленных установках и получать опытные образцы, которые уже затем получат широкое распространение.

Владимир Неволин убежден, что *"метод импульсного лазерного осаждения очень интересен с точки зрения отработки технологии, выяснения физики процесса и рекомендаций и условий к технологии. А в такой полупромышленной установке, как молекулярно-лучевая эпитаксия сочетать это нельзя, там другие условия, там нет сверхвысокого вакуума именно в той зоне, где нужно проводить исследования, а те методы исследования, которые нужно проводить, нужно и можно проводить именно в сверхвысоком вакууме. Это, с одной стороны, фундаментальная наука, но в то же время, она по существу дает практический результат, потому что в результате фундаментальной работы получены конкретные требования к тому, как должен быть реализован технологический процесс получения идеальных параметров данного слоя, а следовательно, это уже практическая наука, это уже прикладная вещь, которая предоставляет возможность давать рекомендации и организовывать полупромышленные или даже промышленные технологии".*

ФИАН и МИФИ давно и плодотворно сотрудничают по ряду направлений. Несколько десятков лет работает Высшая школа физиков ФИАН-МИФИ. Подобная интеграция ведущих исследовательских институтов и вузов является одним из наиболее эффективных путей достижения научных результатов, в ходе которых осуществляется подготовка научных кадров высшей квалификации.

По материалам АНИ "ФИАН-информ"

CONTENTS

Arakelian S. M., Korostelev V. F., Kutrovskya S. V., Kucherik A. O., Kirilina A. N. *Nanoindentation of Carbon Nanotubes, Impregnated by Liquid Aluminium under Pressure* 2
In the given work the process of compactation is carried out by impregnation of the capsule filled UNT, in liquid aluminum at temperature 8500 °C under the pressure of 400 MPa. For research of properties by a method of nanoindentation the scanning probe microscope (SPM) Solver NEXT, manufactures NT-MDT Zelenograd city of Moscow region was used.
Results of the measurements are resulted. Their comparison with the literary data, gives the important information for synthesis of new materials.
Keywords: a technique of resonant self-oscillations, isostatic pressing in liquid metal, properties of a surface, formation of fragments of nanostructure

Nepomnvashy O. V., Alekminsky S. Yu. *Problems of Project Verification During the trough Designing of Computer Systems on Chip* 4
The article deals with modern problems of functional and system verification of very large scale integrated (VLSI) circuits and systems on a chip in particular. There is a review of existing methods of verification and propose ways to solve the aforesaid problems.
Keywords: functional verification, system verification, CAD, VLSI, system on chip

Zhuravleva L. M., Plekhanov V. G. *Isotopical Nanotechnolgy Low Dimensional Structures*. 8
In our paper we are shown the perspectives of the new direction of nanoscience — isotoptronics. Isotoptronics bases on the method of the neutron irradiation of isotope — mixed crystals. The main subject of the isotoptronics is creation and investigation of the low — dimensional structures which used at the transmission and elaboration of the information. In this paper there are briefly described the results of the application of the isotoptronics in nano- and optoelectronics.
Keywords: isotopes, nanotechnology, low-dimensional structures, information

Shautsukov A. G., Hatukaev H. M. *Application of Processes Ion Doping 2-Drifts ADD Diodes with a Flat and Step Profile Doping*. 13
In work it is offered to obtain 2-drifts of structure silicon ADD with using epitaxial normalization in reactor of the lowered pressure, multiple ion doping, implantation of doping impurity through a tape photon annealing ion doped later. The application of the developed technology provides serial release of a sort perspective 2-drifts ADD mm-range.
Keywords: perspective 2-drifts ADD mm-range, ion doping, method epitaxial normalization

Smolin V. K. *Thin-Film Resistive Elements of Sensors Primary Converters* 16
Review of design characteristics of sensors primary converters production for different functionality, using thin-film resistors as sensing elements.
Keywords: resistor, thermal resistor, resistive-strain sensor, adsorption sensitive resistor, magnetoresistor, thin film, formation technology, primary converters

Bobrov A. A., Dyuzhev N. A., Mednikov A. M., Makhiboroda M. A., Popkov A. F., Shkuropat I. G., Matveeva N. K. *Analysis of the Gas Flow Membrane Anemometer output Signal in Stationry and Pulse Heating Mode*. 23
Construction and functioning principles of the developed thermoresistive gas flow sensor of the membrane type are described un the paper. Results of studying of differential output signal measurements of the this anemometer in a stationary and pulse mode regimes are discussed. Estimations of its dynamic range of flow measurements

and resource of its working in the autonomic regime are presented.
Keywords: MEMS-technology, gas flow sensor, temperature-compensated membrane, dynamic range of measurements, flow speed

Abramov I. I. *Problems and Principles of Physics and Simulation of Micro- and Nanoelectronics Devices. VIII. Nanoscale MOSFETs* 27
The models of silicon nanoscale metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (MOSFETs) were analyzed. The perspectives of electronics beyond MOSFET "era" were considered.
Keyword: nanotransistors, metal-oxide-semiconductor, nanoelectronics

Pivonenkov B. I. *The New Type of Piezoresistive Sensors* 38
There are suggested the new type of piezoresistive sensors with essentially better characteristics and more simple technology of manufacture by author.
There are described constructions of sensors, are given results of calculation there characteristics in different versions of manufacture. Sensors have essentially better characteristics and minimal dispersion sensitivity.
Keywords: sensor of mechanical quantities, piezoresitive sensor, sensitive element, MEM (microelectromechanical), energy of deformation, microminiaturization, nanosensor

Voitsekhovskii A. V., Kokhanenko A. P., Korotaev A. G., Grigor'ev D. V., Kulchitsky N. A., Melnikov A. A. *Radiation Effects in HgCdTe Photodetectors* 48
Radiation effects in MCT photonic detectors are observed. Electron and γ-ray irradiation are in consideration. The radiation hardness HgCdTe detectors with various surface passivations is compared.
Keywords: mercury cadmium telluride, radiation effects, photonic detector

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 19.07.2010. Подписано в печать 20.08.2010. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,99. Заказ 650. Цена договорная

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