

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 2 ◆ 2005

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Издаётся с 1999 г.

Главный редактор
Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора
Лучинин В. В.

Редакционный совет:
Аристов В. В.
Васильев В. В.
Гапонов С. В.
Каляев И. А.
Климов Д. М.
Лифшиц В. Г.
Мокеров В. Г.
Никитов С. А.
Чаплыгин Ю. А.

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

Отв. секретарь
Лысенко А. В.

Редакция:
Безменова М. Ю.
Григорин-Рябова Е. В.
Учредитель:
Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ

- Гапонов С. В. Экстремальная ультрафиолетовая литография — будущее наноэлектроники 2
Деспотули А. Л., Андреева А. В., Рамбабу Б. Наноионика суперионных проводников — основа создания новых приборов для МСТ. 5

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

- Бархоткин В. А., Минаков Е. И. Интеллектуальные вибродатчики 14

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

- Космодемьянская Г. Н., Сорокина С. И. Особенности определения поля давления при движении микрокапсулы в трубках малого диаметра 17

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

- Старков В. В. Структурирование с применением окисленного макропористого кремния 24
Ландышев А. В., Лаврентьев А. А., Ландышев В. А. Электронно-зондовые исследования микромодульных термоэлектрических блоков 28
Шилов И. П., Григорьянц В. В., Кочмарев Л. Ю., Ключник Н. Т., Яковлев М. Я. Высокоапertureные оптоволоконные структуры на основе кварцевого стекла, легированного фтором 33

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

- Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Манипуляционные микробототехнические системы и проблемы производства гибридных МЭМС 38
Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Гарцеев И. Б., Колядин К. С. Тенденции развития беспилотных летательных аппаратов мини- и микроклассов 44

- НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ** 49

- ИНФОРМАЦИЯ** 54

- Contents** 56

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

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

ПОДПИСКА:

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

УДК 621.3.049.77

С. В. Гапонов, чл.-корр. РАН,
ИФМ РАН

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ ЛИТОГРАФИЯ — БУДУЩЕЕ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Рассмотрены вопросы разработки литографии с использованием экспериментального ультрафиолетового излучения с длиной волны 13,5 нм

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

Создание большой интегральной схемы представляет собой сложный технологический процесс, состоящий из ряда основных технологических стадий.

1. Подготовка, включающая в себя:

- резку кремниевых подложек из болванки чистого кремния;
- обеспечение химическими материалами и газами для изготовления чипа и металлами (алюминий, медь и золото) для проводников в чипе;
- обеспечение источником УФ излучения для экспонирования фотрезистов;
- изготовление маски.

2. Изготовление, включающее в себя следующие технологические процессы:

- окисление кремния высокотемпературным нагревом в атмосфере газа;
- нанесение и растворение фотрезиста;
- облучение фотрезиста источником УФ излучения через маску с желаемой топологией чипа;
- химическое травление оксида кремния и напыляемых материалов;
- ионная имплантация (допирование) кремния;
- нанесение поликристаллического кремния и металлических пленок (проводников).

В целом, при производстве чипа описанные выше процедуры выполняются примерно на 20 слоях, формируя 3D-структуру. Общее число операций при производстве одного чипа превышает 250. Для увеличения производительности (уменьшения стоимости изделия) одновременно на одной кремниевой пластине изготавливаются сотни идентич-

ных чипов, а стандартные пластины достигают в диаметре 300 мм.

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

4. Испытания изготовленных изделий. Испытания проводятся для выяснения их надежности и вероятности отказов.

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

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

В табл. 1 приведены параметры интегральных схем, достигнутые к настоящему времени и прогнозируемые, полученных с использованием различных технологий. В табл. 2 представлены технологии экспонирования фотрезистов, которые должны в перспективе обеспечить производство интегральных схем, приведенных в табл. 1. К приведенным таблицам нужно относиться весьма осторожно, поскольку практика показала, что как раз в области совершенствования технологии микроэлектроники все происходит существенно быстрее, чем планируется. Так, ошибка в прогнозах получения минимальных размеров в рисунках на чипах, опубликованных в 1994 и в 2001 гг., составила за столь короткий срок девять лет.

Как видно из таблиц, использование УФ излучения позволило получить минимальный размер элемента чипа на уровне 0,01 мкм. Фундаментальным препятствием на пути уменьшения размеров

Таблица 1

Прогнозы параметров ультрабольших интегральных схем

Параметры	1999 г.	2001 г.	2003 г.	2006 г.	2009 г.	2012 г.	2015—2020 гг.
Минимальные размеры, нм	180	150	130	90	70	50	10
Емкость памяти на чипе (экспериментальные), бит	1 Г		4 Г	16 Г	64 Г	256 Г	
Емкость памяти на чипе (производство), бит	256 М	1 Г	1 Г	4 Г	16 Г	64 Г	
Число транзисторов в 1 см ²	6,2 М	10 М	18 М	39 М	84 М	180 М	1 Г
Частота на чипе, МГц	500—1250	600—1500	700—2100	900—3500	1200—6000	1500—10 000	5000—30 000
Максимальная рассеиваемая мощность, Вт	90	ПО	130	160	170	175	250—500
Размер чипа, мм ²	400	445	560	820	1120	1580	
Число уровней соединений	6—7	7	13	20	22—25	20—25	

элементов интегральных схем является дифракционное искажение изображения УФ излучения на линзах, апертурах и масках литографической установки. К настоящему времени увеличение размера линз практически исчерпало свои возможности как с экономической точки зрения (стоимость высокояпертурных линз), так и с технологической.

Поэтому ведущими мировыми производителями больших интегральных схем (Intel, AMD) рассматривается (и реализуется) следующая стратегия. Для корректировки изображения маски используются дополнительные прямоугольники, которые несмотря на дифракцию излучения позволяют получить желаемое распределение освещенности на подложке. Другое решение заключается в применении специальных, так называемых фазосдвигающих масок. В этих масках на их поверхность селективно наносятся материалы, перекрывающие пучки, которые приводят к размытию изображения, вызванной дифракцией.

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

Перспективной стратегией в рамках УФ литографии является уменьшение длины волны излучения, в частности, переход к длине волны 157 нм

(излучение эксимерного p2 лазера). Однако возможности этой технологии для перехода к размерам элементов нанометрового диапазона также ограничены (см. табл. 1).

Кардинальный переход, к которому реально готово мировое сообщество, связан с освоением диапазона экстремального ультрафиолетового излучения (ЭУФ) с длиной волны 13 нм. В США, учитывая практическую важность создания технологии EUV-литографии (область экстремального ультрафиолетового излучения), большую стоимость и сложность разработки, в сентябре 1997 г. для решения этой проблемы была создана так называемая

Таблица 2
Тенденции развития литографии

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

Виртуальная Национальная Лаборатория (VNL), включающая кроме национальных лабораторий Министерства энергетики (Lawrence Berkley, Livermore and Sandia National Laboratories) частные компании, такие как Intel, Motorola, Advanced Micro Devices (AMD). Уже в марте 1999 г. в фирме Motorola с применением этой технологии были получены рисунки с пространственным разрешением до 30 нм. В 2000 г. в Ливерморской национальной лаборатории был изготовлен первый вариант (a-tool) установки совмещения и экспонирования (так называемого стекпера) и в настоящее время проходит стадия p-tool-выпуска малой серии.

В Европе фирмой-координатором работ в области EUV-литографии является ASM Lithography (Нидерланды), которая в дальнейшем будет изготавливать стекперы. Можно также отметить, что основным изготовителем стекперов построен специальный корпус и проходят стадии монтажа и испытания узлы стекпера. Фирма Carl Zeiss отвечает за оптику, ASM Lithography практически отвечает за выбор источника излучения. Намечалось, что изготовление и испытания a-tool стекпера должны быть закончены в 2004 г., p-tool — в 2005 г., y-tool — в 2007 г. Предполагается, что Европа будет очень незначительно отставать в области проекционной литографии от США.

Подобные исследования активно проводятся в Японии. Существует национальная программа "EUVL Research Program at ASET", в которую включены многие исследовательские группы. Планы создания полной технологии EUV-литографии практически совпадают с планами США.

Следует отметить, что западные фирмы и фирмы Японии широко используют российских ученых (по различным контрактам), которые, без преувеличения, занимают ведущее положение в разработке техники и технологии EUV-литографии.

В России технология субмикрометровой микроэлектроники осталась на уровне середины 80-х годов. Если в мире изготавляются интегральные схемы с топологическим размером 0,13—0,16 мкм (см. табл. 1), то в нашей стране — на уровне 0,8—1,2 мкм. Ситуация существенно изменится в 2005 г. с запуском в Зеленограде ("Ангстрем") линии по производству чипов с топологией 0,25 мкм, однако и это будет соответствовать мировому уровню лишь 1996—1998 гг.

Из-за 20 лет практического отсутствия эволюции в области создания интегральных схем для вывода России на передовой мировой уровень единственно возможным вариантом является закупка современного завода по производству чипов с топологией 0,1—0,13 мкм. Этот шаг позволит:

- наладить производство современных уже на данный момент чипов;
- нашим технологам и разработчикам как электронных компонентов, так и производителей аналогичного оборудования напрямую "приобщиться" к самым передовым технологиям в области производства чипов;
- совершить мощный скачок в исследованиях в области нанотехнологий в стране.

Ведь не секрет, что в настоящее время из-за физической невозможности созданияnanoструктур в России многие научные идеи и разработки отечественных ученых приходится осуществлять в западных фирмах, что приводит к потере как интеллектуальной собственности самими этими учеными, так и самых передовых технологий Россией.

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

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

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

По прогнозам SEMITECH, основным направлением, которое будет определять развитие электроники (nanoэлектроники) с 2010 г., будет EUV-литография на длине волн 13,5 нм. Это направление очень динамично развивается в США, Европе и Японии. В научной части проектов задействована значительная группа российских институтов и отдельных ученых. Многие годы ИФМ РАН принимает участие в зарубежных проектах и сейчас имеет передовые позиции и понимание проблемы. С 2003 г. в ИФМ РАН ведется проект по созданию макета литографа. Сейчас проектируется литограф малой производительности для спецпроизводства. В случае приобретения передового микроэлектронного производства можно будет начать разработку литографа, который впоследствии заменит штатный.

Литература

1. Алферов Ж. И., Асеев А. Л., Гапонов С. В., Копьев П. С., Панов В. И., Полторацкий Э. А., Сибельдин Н. Н., Сурис Р. А. Наноматериалы и нанотехнологии // Микросистемная техника, 2003. № 8. С. 3—13.

УДК 544.6.018.42—16:544.636:544.72.023

А. Л. Деспотули, канд. физ.-мат. наук,
А. В. Андреева, д-р физ.-мат. наук, проф.
 Институт проблем технологии микроэлектроники
 и особых чистых материалов РАН,
 г. Черноголовка, Россия
Б. Рамбабу, д-р, проф.,
 Southern University and A&M College, Baton Rouge,
 Louisiana, 70813 US
 E-mail: despot@ipmt-hpm.ac.ru
 andreeva@ipmt-hpm.ac.ru

НАНОИОНИКА СУПЕРИОННЫХ ПРОВОДНИКОВ — ОСНОВА СОЗДАНИЯ НОВЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ МСТ

Выделен новый класс суперионных проводников (СИП) — передовые суперионные проводники (ПСИП) с энергией активации ионной проводимости $E \approx 0,1$ эВ. Предложено новое направление наноионики — наноионика ПСИП. Наносистемы твердотельных ионных проводников разделены на два класса, различающихся противоположным влиянием разупорядочения "приповерхностных" слоев на ионную проводимость σ_i и E : 1) наносистемы на основе соединений с исходно малой σ_i (большие значения E); 2) наносистемы на основе ПСИП (nanoПСИП). Фундаментальную проблему наноионики — сохранение быстрого ионного транспорта (БИТ) в nanoПСИП — предлагается решать путем создания структурно-упорядоченных (когерентных) гетерограниц ПСИП/индифферентный электрод (ИнЭл). Для nanoПСИП введены: (i) характерный параметр $P = d/\lambda_Q$ (d — толщина слоя ПСИП с разупорядоченной кристаллической структурой в области гетерограницы, λ_Q — длина экранирования заряда подвижными ионами в объеме ПСИП) и (ii) критерий сохранения быстрого ионного транспорта (БИТ). Рассмотрены условия установления ион-электронного равновесия в nanoПСИП и показано, что контактные потенциалы, возникающие при выравнивании уровней Ферми на гетеропереходах ПСИП/металл, удовлетворяют условию $V \ll k_B T/e$. Показана возможность разработки на основе когерентных гетеропереходов ПСИП/ИнЭл наноионных суперконденсаторов (НСК) субмикрометровых размеров с удельной емкостью $\sim 10^{-4}$ Ф/см² и рабочей частотой $\sim 10^8$ — 10^9 Гц для емкостной DRAM объемом более 5 Гбит, гибридных источников энергии и мощности микросистемной техники (МСТ) и беспроводных сенсорных сетей.

Введение

Дисперсоиды ионных проводников [1—3] и гетеропереходы твердый электролит/электрод [4] — классические объекты ионики твердого тела, электрохимии твердых электролитов [5] и, одновременно, наноионики. Термин и концепция наноионики впервые даны в работе [6]. Предмет наноиони-

ки — быстрый ионный транспорт (БИТ) в наносистемах. В последние годы наноионика быстро развивается. Термин "наноионика" все более широко применяется в научных публикациях и используется для обозначения области интересов научных сообществ и организаций. Обзор развития наноионики в период 1992—2003 гг. дан в [7]. Основные приложения наноионики связаны с созданием новых материалов, функциональных структур и приборов для хранения и преобразования энергии и информации.

Известно, что особые свойства наносистем определяются наноразмерами составляющих их подсистем. Согласно [8, 9], "комплексные наносистемы могут быть макроскопических размеров". В макроскопических образцах дисперсоидов ионных проводников подсистемами являются отдельные наночастицы. В ячейках с гетеропереходами твердый электролит/электрод граничную область нанометровых размеров, отличающуюся структурой и расположением подвижных ионов, также можно рассматривать как наноподсистему. Наноподсистемы можно выделить в суперконденсаторах с двойным электрическим слоем (ДЭС), а также в электрохимических системах на основе твердых электролитов. Суперконденсаторы и электрохимические приборы субмикрометровых размеров имеют большой потенциал для использования в микросистемной технике (МСТ). На основе таких приборов могут быть созданы эффективные автономные гибридные источники энергии и мощности для питания микроботов и узлов беспроводных сенсорных сетей.

В настоящей работе вводится новое направление наноионики — "наноионика передовых суперионных проводников" (ПСИП) и формулируется ряд основных положений наноионики ПСИП. На этой основе рассматривается возможность создания тонкопленочных приборов нового класса — наноионных суперконденсаторов (НСК) с когерентными гетеропереходами ПСИП/электронный проводник.

Передовые суперионные проводники

Твердые тела с высокой униполярной ионной проводимостью σ_i (уровень электронной проводимости σ_e произвольный), превышающей при 300 К условную границу $\sigma_i \sim 10^{-3}$ Ом⁻¹ см⁻¹, называют суперионными проводниками (СИП), а при выполнении неравенства $\sigma_i \gg \sigma_e$ — твердыми электролитами (ТЭЛ). Среди СИП мы выделяем подкласс "передовые суперионные проводники" (в английской терминологии "Advanced superionic conductors" [10]) с $\sigma_i > 10^{-2}$ Ом⁻¹ см⁻¹ и низкой энергией активации ионной проводимости ($E \approx 0,1$ эВ). Классификация твердотельных ионных проводни-

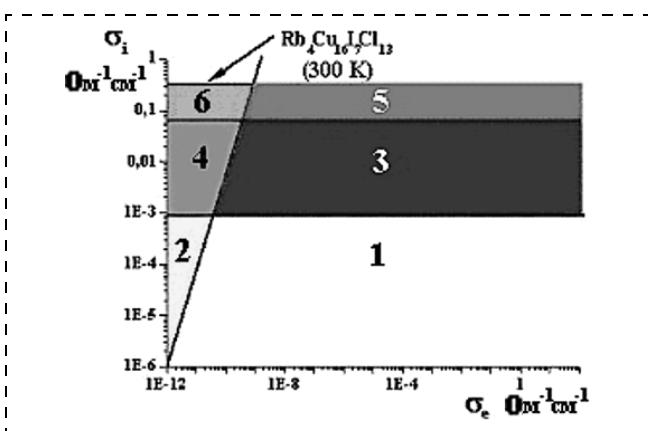


Рис. 1. Области существования твердотельных ионных проводников на σ_i — σ_e диаграмме:

1 — твердотельные ионные проводники; 2, 4, 6 — ТЭЛ (твердые электролиты, $\sigma_i \gg \sigma_e$); 3 — СИП (суперионные проводники $\sigma_i > 0,001 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$, σ_e — произвольное значение); 4 — пересечение областей СИП и ТЭЛ (суперионные проводники — твердые электролиты, $\sigma_i > 0,001 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$, $\sigma_i \gg \sigma_e$); 5 — ПСИП (передовые суперионные проводники, $\sigma_i > 0,1 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$, σ_e — произвольное значение); 6 — пересечение областей ПСИП и ТЭЛ (передовые суперионные проводники — твердые электролиты, $\sigma_i > 0,1 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$, $\sigma_i \gg \sigma_e$)

ков, предложенная в [10], представлена на диаграмме (рис. 1), где в координатах "ионная проводимость—электронная проводимость" (σ_i — σ_e) показаны области существования ионных проводников разных типов.

Два класса наносистем твердых ионных проводников

На границах ионных кристаллов вследствие разности энергий выхода ионов разных знаков формируются ДЭС с высокой концентрацией дефектов [11]. Толщина ДЭС (порядка радиуса Дебая λ_D) определяется концентрацией подвижных ионов n_i . В работе [1] обнаружено увеличение ионной проводимости σ_i в нанокомпозитах (дисперсоидах), содержащих компоненты с исходно малой σ_i , что объясняется большой плотностью ДЭС с повышенным значением σ_i .

Существует два класса ионных проводников, различающихся кристаллической структурой. В классе веществ с малой ионной проводимостью ("плохие" ионные проводники), например в LiI (300 K) $\sigma_i \sim 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$, энергия активации $E \sim 0,434 \text{ эВ}$ [12], а значение λ_D (~60 нм) сравнимо с размером зерна в нанокомпозитах. Интегральные значения σ_i в нанокомпозитах "плохих" ионных проводников при размерах кристаллитов, соизмеримых с толщиной ДЭС, значительно выше, чем у составляющих компонентов. Однако ион-транспортные свойства (σ_i , E , n_i) нанокомпози-

тов "плохих" ионных проводников значительно хуже, чем у веществ класса ПСИП ($\alpha\text{-AgI}$, $\alpha\text{-RbAg}_4\text{I}_5$). Кристаллическая структура ПСИП близка к оптимальной для БИТ ($\sigma_i \approx 0,3 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ при 300 K, $E \approx 0,1 \text{ эВ}$). Поэтому в ПСИП дефекты кристаллической структуры будут, как правило, нарушать условия БИТ. Таким образом, при высокой концентрации дефектов в наносистемах "плохих" ионных проводников возникает повышенная интегральная проводимость, а для ПСИП влияние дефектов будет, как правило, противоположно.

В [6] предложен общий подход наноионики к описанию свойств наносистем ионных проводников, основанный на использовании безразмерного параметра $P = d/L \sim 1$, где d — ширина области с особыми свойствами, а L — характерный размер наноприбора (nanoструктуры). Если особые свойства наносистем "плохих" ионных проводников определяются областью ДЭС (шириной $\sim \lambda_D$), то параметр $P = \lambda_D/L$. Однако в качестве d могут использоваться и иные величины. Например, катализатор топливного элемента работает эффективно, когда ширина обогащенной протонами области (длина диффузии протонов d_p) сравнима со средним размером наночастиц катализатора L и параметром наносистемы будет $P = d_p/L$, а при твердофазном синтезе новых соединений в наносистемах типа металл- AgI (CuI) [13–16] растворение металлов в пленках ионных проводников нанометровой толщины L сопровождается одновременным вводом электронных носителей и ионов (электронейтральность в слое с особыми свойствами сохраняется), поэтому в качестве d следует использовать такие величины, как критический радиус зародыша новой фазы r_c , средний размер кристаллита r_{cr} и др.

Вычисления λ_D для ПСИП $\alpha\text{-RbAg}_4\text{I}_5$ (300 K) с концентрацией подвижных Ag^+ -ионов $n_i \approx 10^{28} \text{ м}^{-3}$ по формуле Дебая

$$\lambda_D \sim (\epsilon \epsilon_0 k_B T / e^2 n_i)^{1/2}, \quad (1)$$

(где ϵ_0 — электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость, равная 1 для вакуума; k_B — постоянная Больцмана ($1,4 \cdot 10^{23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$); T — температура СИП по шкале Кельвина (300 K); e — заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$) дают значения $\lambda_D \sim 0,05 \text{ нм}$ (меньше размера иона), что указывает на необходимость использования другой формулы для расчета длины экранирования заряда λ_Q [17].

В ПСИП семейства RbAg_4I_5 при 300 K частота колебаний подвижных ионов Ag^+ в потенциальных ямах составляет $f_0 \sim 10^{12} \text{ с}^{-1}$ и перескоки ионов Ag^+ между соседними позициями через барьеры высотой 0,1 эВ происходят с частотой $\sim 10^{10} \text{ с}^{-1}$. Соглас-

но [18], в RbAg_4I_5 концентрация "парящих" над барьерами ионов $\text{Ag}^+ \sim 10^{26} \text{ м}^{-3}$. Для "парящих" над барьерами ионов формула (1) дает $\lambda_D \sim 0,5 \text{ нм}$ и, поскольку размер иона Ag^+ в несколько раз меньше указанного значения, то (1) можно использовать для оценки длины экранирования заряда. При изменении потенциала индифферентного электрода (ИнЭл) на границе $\text{RbAg}_4\text{I}_5/\text{ИнЭл}$ ионы Ag^+ , находящиеся над потенциальными барьерами, сформируют в течение интервала времени $\Delta t \sim 10^{-10} \text{ с}$ ДЭС толщиной $\lambda_D \sim 0,5 \text{ нм}$, а при $\Delta t \gg 10^{-10} \text{ с}$ в формировании ДЭС примут участие все ионы Ag^+ с концентрацией 10^{28} м^{-3} , так что длина экранирования поверхностного заряда ИнЭл λ_Q должна быть меньше 0,5 нм. Для описания свойств наносистем ПСИП ($\lambda_Q \leq 0,5 \text{ нм}$) безразмерный параметр P ранее не использовался, поскольку не было понятно с какими характерными величинами системы можно сравнивать столь малые значения λ_Q . Это, на наш взгляд, существенно ограничивало развитиеnanoионики СИП.

Если к настоящему времени влияние ДЭС на σ_i в наносистемах "плохих" ионных проводников исследовано сравнительно подробно (см., например, [19–27]), то работ по свойствам ДЭС в наносистемах на основе ПСИП (наноПСИП) гораздо меньше [7, 28–35]. Таким образом, выполненный анализ показывает, что дефекты кристаллической структуры увеличивают проводимость σ_i в наносистемах "плохих" ионных проводников и, как правило, должны понижать σ_i в наноПСИП, поскольку нарушаются условия для БИТ. Отсюда следует, что рассматриваемые наносистемы можно разделить на два класса с принципиально различным характером структурного дизайна для получения БИТ:

- наносистемы на основе веществ с малой ионной проводимостью σ_i и характерным параметром $P = \lambda_D/L \sim 1$;
- наносистемы на основе ПСИП, для которых характерный параметр неизвестен.

Структурно-совершенные (когерентные) гетерограницы в ПСИП

Гетеропереходы электрод/твердый ионный проводник — классические объекты исследования. В [4] для объяснения медленных релаксационных процессов на электроде введено представление об адсорбции заряженных ионов на границе. Понятие дефектной структуры поверхности границы дано в [36], а понятие эффективной толщины переходного дефектного слоя — в [37]. Развитию модели адсорбционной релаксации двойного слоя в СИП посвящена работа [38]. Медленные диффузионные процессы на электроде (большие значения энергии активации E) в модели адсорбции связываются с

движением ионных дефектов. Однако, все перечисленные модели являются феноменологическими и не учитывают конкретную атомную структуру гетерограниц, которая в ряде случаев может иметь протяженность, соизмеримую с λ_Q в объеме ПСИП и, по нашему мнению, определяет БИТ в наноПСИП.

Несмотря на исключительно важную роль поверхностей в современных приборах подход к явлениям и процессам на гетерограницах ПСИП остается таким же, как и несколько десятилетий назад, что препятствует созданию новых классов приборов на основе наноПСИП. Суперконденсаторы на основе ПСИП разрабатываются в течение нескольких десятилетий. Однако и в настоящее время конструкторы этих приборов опираются на результаты, сформулированные в [5]: "В $\alpha\text{-AgI}$, RbAg_4I_5 емкость экспоненциально зависит от температуры, что соответствует представлению о достаточно высокой энергии их поверхностного разупорядочения (большие значения энергии активации σ_i)". Таким образом, в существующих конструкциях суперконденсаторов уникальные ионтранспортные свойства ПСИП фактически не используются для значительного повышения емкостно-частотных характеристик и к этим конструкциям не применим современный подход: "от передовых материалов к передовым приборам" [33, 34].

Атомная структура гомо- и гетерофазных границ раздела и анализ процессов, протекающих на границах, находятся в фокусе материаловедения в течение нескольких десятилетий. Термины и подходы, такие как "кристаллоинженерия границ зерен" и "граничный дизайн", впервые введенные в работах Ватанабе [39], были успешно применены для создания перспективных микро(нано)структурированных композитных материалов со значительно улучшенными механическими свойствами [39–41], а в последние годы — для создания перспективных микро(нано)электронных и магнитных материалов [42–44]. В отличие от других дисциплин, электрохимия твердых электролитов лишь в самых последних работах [45–47] фокусирует свое внимание на кристаллохимии и кристаллографии когерентных и полукогерентных границ электролит — электрод в целях прогнозирования и контроля электрохимических процессов.

Проблема дизайна гетерограниц ПСИП/электрод для сохранения БИТ, впервые сформулированная в работах [9, 31–35, 48, 49], выполненных в ИПТМ РАН в 2003 г., является центральной в nanoионике ПСИП. По нашему мнению, фундаментальная научная задача nanoионики ПСИП — теоретическое и экспериментальное наноконструирование новых материалов, микроструктур и моделей наноприборов на базе ПСИП с сохранением БИТ.

В основе решения лежит оригинальная гипотеза формирования структурно-упорядоченных когерентных гетерограниц ПСИП/ИнЭл с определенным расположением "каналов БИТ" в ПСИП, где потенциальные барьеры для движения подвижных ионов $\sim 0,1$ эВ.

Методологической основой наноконструирования ПСИП должны стать принципы синергетики, в соответствии с которыми эффективное управление неравновесными системами может осуществляться при условии адекватности (резонанса) внешних управляющих воздействий и внутренних коллективных свойств системы (результат самоорганизации). К внутренним параметрам исследуемых наносистем ПСИП относятся:

- кристаллохимия гетерограниц;
- решеточное сопряжение;
- граничная поляризация связей;
- ионные и электрические характеристики гетеропереходов и др.

К внешним параметрам относятся:

- изменение химического состава ПСИП;
- симметрия внешних полей (деформационного, электрического, магнитного и др.).

Теоретическое и экспериментальное исследование факторов влияния граничного дизайна на синтез наносистем, анализ управляющих внешних воздействий, согласующихся с анизотропными внутренними свойствами и процессами самоорганизации системы, позволят выполнить модельную генерацию и экспериментальную селекцию наносистем с БИТ и уникальными свойствами (пленочные гетероструктуры ПСИП/электрод, многослойные и порошковые электродные композиты на основе ПСИП и др.).

С точки зрения термодинамики и кристаллографии границ адсорбционная релаксация [4] означает формирование более плотно упакованных (низкоэнергетических) границ. Границы, которые генерируют высокие концентрации дефектов, нарушают условия для БИТ в наноПСИП. В [50] обнаружено резкое возрастание энергии активации E в пленках RbAg_4I_5 толщиной менее 50 нм, которое объяснено нарушением кристаллической структуры RbAg_4I_5 в слоях, прилегающих к подложке из плавленого кварца или стекла. Данные [50] свидетельствуют о подавлении БИТ в системе с большой долей в микроструктуре неупорядоченных гетерограниц (границ общего типа). Поэтому для обеспечения БИТ в наноПСИП нужны структурно-совершенные гетерограницы. Актуальной проблемой наноионики ПСИП является поиск условий формирования бездефектных границ.

В работах [9, 31–35, 48, 49] впервые сформулировано представление о кристаллографически совершенных гетерограницах ПСИП, которые по-

зволяют сохранять объемную концентрацию подвижных ионов и БИТ в ДЭС. Гетеропереходы ПСИП/электрод со структурно-совершенными (когерентными) границами должны отличаться высокой электрической емкостью и рекордно малым временем отклика на изменение потенциала. С кристаллографической точки зрения низкоэнергетические когерентные границы отвечают плотной атомной упаковке и экстремуму свободной энергии, определяемому симметрией [51–54].

В [55] представлен пример системы металл (Pd) — сегнетоэлектрик (SrTiO_3) с когерентной границей (решеточное несоответствие 1,5 %). Сверхтонкие слои с когерентными границами получены также в [56], где в условиях сверхвысокого вакуума ($\sim 10^{-7}$ Па) методом гетероэпитаксии при скорости осаждения примерно один монослой в минуту на плоскости (001) Си были выращены пленки LiCl (001) толщиной 1–5 монослоев (взаимный поворот кристаллов для наилучшего решеточного сопряжения составлял 45°). Локальную электронную структуру на гетерогранице определяли по особенностям на краях спектров поглощения при регистрации потерь энергии электронов (EELS) [56]. Согласно данным (EELS), при наличии когерентности уже первые монослои диэлектрика, выращенного эпитаксиально на ориентированной металлической подложке, могут иметь такую же, как в объеме, электронную структуру. Таким образом, актуальными задачами наноионики СИП является поиск условий образования и изучение свойств когерентных гетерограниц в СИП.

Параметр сохранения БИТ в наноПСИП и ион-электронные процессы на гетеропереходах ПСИП/индифферентный электрод

В настоящей работе вводится параметр сохранения БИТ в наноПСИП — P . Пусть d — толщина переходного слоя ПСИП в области гетерограницы с разупорядоченной кристаллической структурой, а λ_Q — длина экранирования заряда подвижными ионами в объеме ПСИП. Величина d кратна периоду кристаллической решетки ПСИП a ($\sim 0,5$ нм), а значение λ_Q в объеме ПСИП (например, $\alpha\text{-AgI}$ или $\alpha\text{-RbAg}_4\text{I}_5$) меньше 0,5 нм. Тогда отношение $P = d/\lambda_Q$ является параметром, у которого диапазон значений, представляющих практический интерес, ограничен несколькими единицами. При $P \sim 1$ кристаллическая структура ПСИП будет нарушена только в первом монослое на гетерогранице. Формирование гетеропереходов с $P \approx 1$ представляет комплексную проблему, включающую задачи теоретического и экспериментального характера. Этот случай наиболее интересен для приложений (сохранение БИТ), поскольку при больших значе-

ниях P дефектная область простирается на несколько периодов кристаллической решетки. Следует отметить, что упругие напряжения, всегда присутствующие на эпитаксиально выращенной гетерогранице, в общем случае будут влиять на БИТ в наноПСИП. Однако, если напряжения небольшие (что определяется соответствием решеточных параметров) и существенным образом не изменяют диаметр и распределение каналов БИТ в структуре ПСИП, то их влияние будет значительно меньше, чем вклад от различного рода локальных поверхностных дефектов, преципитатов фаз и др.

При создании гетероперехода ПСИП/ИнЭл происходит выравнивание уровней Ферми и перенос носителей заряда через границу. Для объемных ПСИП ион-электронные процессы на гетерограницах впервые подробно рассмотрены в [57]. Пожалуй, что в наноионике ПСИП выравнивание уровней Ферми не сопровождается появлением заметных изгибов зон и контактных потенциалов.

Пусть работа выхода ИнЭл больше, чем у ПСИП ($\Phi_{\text{ИнЭл}} > \Phi_{\text{СИП}}$). Тогда электроны ПСИП переходят на ИнЭл, создавая контактный потенциал с предельным значением $V = (\Phi_{\text{ИнЭл}} - \Phi_{\text{СИП}})/e$, а на поверхности ПСИП индуцируется противоположный по знаку заряд подвижных ионов. Глубина проникновения электрического поля в ПСИП и толщина возникшего ДЭС будут $\sim \lambda_Q$. Последняя величина задается концентрацией подвижных ионов на границе ПСИП (для когерентных гетеропереходов в RbAg_4I_5 $n_{\text{Ag}} \approx 10^{28} \text{ м}^{-3}$). Электрическая емкость единицы площади ДЭС $C \approx \epsilon \epsilon_0 / \lambda_Q$. Используя формулу $C = \delta/V$ и выражение для V получим, что поверхностная плотность ионного заряда δ на обкладке ДЭС будет

$$\delta \sim \epsilon \epsilon_0 (\Phi_{\text{ИнЭл}} - \Phi_{\text{СИП}}) / (e \lambda_Q). \quad (2)$$

Пусть концентрация электронных носителей в ПСИП имеет обычные для широкозонных материалов значения ($n_e \sim 10^{21} - 10^{22} \text{ м}^{-3}$). Тогда для создания на поверхности металла электронного заряда с плотностью δ образец должен иметь толщину l , удовлетворяющую соотношению

$$l = l n_e e. \quad (3)$$

Приравнивая выражения для δ (2) и (3), получим

$$l \sim \epsilon \epsilon_0 (\Phi_{\text{ИнЭл}} - \Phi_{\text{СИП}}) / (n_e e^2 \lambda_Q). \quad (4)$$

Если $V = (\Phi_{\text{ИнЭл}} - \Phi_{\text{СИП}})/e \sim 0,3 \text{ В}$, то $l \sim 1 - 10 \text{ мкм}$, что невозможно в микро- и наноэлектронике.

Таким образом, основное положение физики гетеропереходов — условие выравнивания в равно-

весии уровней Ферми для электронных носителей — выполняется в наноПСИП без образования заметных изгибов зон и контактных потенциалов ($eV \ll k_B T$), что является следствием малости значений l (плёнки) и λ_Q (высокие концентрации подвижных ионов).

Если в тонкопленочной структуре ($l \ll 1 - 10 \text{ мкм}$) ($\Phi_{\text{ИнЭл}} - \Phi_{\text{СИП}}$), то перетекание электронов из ИнЭл в ПСИП формирует поверхностный положительный заряд на ИнЭл. Перешедшие в ПСИП электроны перераспределяются однородно в пленке ПСИП и поднимают уровень Ферми ПСИП до уровня Ферми ИнЭл без возникновения контактного потенциала измеримой величины ($eV \ll k_B T$). Проникновение поля в ПСИП экранируется оттоком подвижных ионов от поверхности ПСИП и в области гетероперехода формируется ДЭС толщиной $\lambda_Q \sim 0,5 \text{ нм}$ (для RbAg_4I_5). Изменение концентрации электронных носителей в пленке ПСИП Δn_e компенсируется увеличением концентрации подвижных ионов Δn_i , что не должно заметно влиять на ион-транспортные свойства структуры ПСИП, поскольку $\Delta n_{\text{Ag}} = \Delta n_e \ll n_{\text{Ag}} \approx 10^{28} \text{ м}^{-3}$ (для RbAg_4I_5). Характерное время τ установления равновесных состояний на гетерограницах в наноПСИП можно оценить, используя данные [57] для коэффициента диффузии самозахваченных электронов D_e в ПСИП RbAg_4I_5 ($D_e \approx 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$ при 300 К). Для наноПСИП размером $l \sim 10^{-5} \text{ см}$ время перехода в равновесное состояние составит $\tau \sim l^2/D_e \approx 10^{-2} \text{ с}$.

Создание новых типов наноионных приборов

Выше было показано:

- длина экранирования заряда λ_Q в ПСИП ($\alpha\text{-RbAg}_4\text{I}_5$, 300 К, $n_{\text{Ag}} \approx 10^{28} \text{ м}^{-3}$) меньше $\sim 0,5 \text{ нм}$;
- на когерентных гетеропереходах ПСИП/ИнЭл должен сохраняться БИТ в ДЭС ПСИП (n_{Ag} и высота потенциальных барьеров для перескоков подвижных ионов близки к значениям в объеме).

Отсюда следует, что на основе когерентных гетеропереходов, обладающих высокими значениями удельной емкости и малыми временами переходных процессов, могут быть созданы новые типы наноионных приборов (суперконденсаторы и сенсоры [31—35]). Оценки электрической емкости и максимальной рабочей частоты наноионных суперконденсаторов (НСК) на основе ПСИП семейства RbAg_4I_5 впервые сделаны в [31—35]. Было показано, что находящиеся над потенциальными барьерами подвижные ионы $\alpha\text{-RbAg}_4\text{I}_5$ с концентрацией $n_{\text{Ag}} \approx 10^{26} \text{ м}^{-3}$ за время $\Delta t \sim 10^{-10} \text{ с}$ формируют ДЭС толщиной $\lambda_D \sim 0,5 \text{ нм}$ и емкостью $C \sim \epsilon A / \lambda_D \sim 20 \text{ мкФ/см}^2$ (A — площадь электрода,

ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость, равная 1 для вакуума). Полная концентрация Ag^+ -ионов в RbAg_4I_5 равна $\approx 10^{28} \text{ м}^{-3}$ и при частоте перескоков $\sim 10^{10} \text{ с}^{-1}$ все ионы Ag^+ смогут принять участие в формировании ДЭС при $\Delta t > 10^{-10} \text{ с}$. Толщина такого ДЭС будет меньше $\lambda_D \sim 0,5 \text{ нм}$. Поэтому когерентные гетеропереходы позволяют создать высокочастотные конденсаторы с ДЭС (НСК) с удельной емкостью выше $\sim 20 \text{ мкФ/см}^2$. Полагаем, что значений удельной емкости $\sim 1000 \text{ мкФ/см}^2$ можно достичь, если на поверхности электродов формировать системы наноразмерных кристаллографических ступенек и/или фасеток, не нарушающих когерентную структуру гетерограниц. При рабочем напряжении 0,5 В максимальная энергия, запасаемая рассматриваемыми пленочными НСК составит $CV^2/2 \sim \sim 10^{-3} \Phi (0,5 \text{ В})^2/2 \approx 10^{-4} \text{ Дж/см}^2$. Если толщина пленки прибора $\sim 10^{-5} \text{ см}$, а средняя плотность 5 г/см^3 , то удельная энергия будет $\sim 2 \text{ Дж/г}$. Это в 20 раз меньше, чем у лучших таблеточных суперконденсаторов [33, 58], в которых используются распределенные электроды изnanoструктурированного углерода, жидкие электролиты и рабочее напряжение 3 В.

В приборах таблеточного типа высокие удельные характеристики достигаются путем рационального использования объема. В микро(нано)приборах отношение *поверхность/объем* в 10^3 — 10^5 раз больше, чем у таблеточных аналогов, поэтому остается единственный путь увеличения удельных характеристик — рациональное использование поверхности. Получение гетеропереходов с когерентными границами — ключевой момент при создании новых типов наноионных приборов (сенсоров, эффективных микроисточников энергии и мощности и др.) для микро(нано)электромеханических сис-

тем (МЭМС и НЭМС) [9, 31—35, 48, 49] и беспроводных сенсорных сетей.

На рис. 2 показано электронно-микроскопическое изображение матрицы ячеек ($100 \times 100 \text{ нм}$), сформированных методом прямой электронно-лучевой литографии в пленках ПСИП (RbAg_4I_5) толщиной 40 нм на углеродной подложке [6]. На основе подобныхnanoструктур могут быть созданы матрицы НСК высокой плотности.

Известно [59], что для нормального функционирования емкостной памяти любой плотности отдельные ячейки должны иметь емкость не менее 25 фФ. В 5-гигабитной DRAM отдельные ячейки памяти будут иметь площадь менее $0,1 \text{ мкм}^2$, поэтому удельная емкость ячеек должна быть выше 250 фФ/мкм^2 (25 мкФ/см^2). Такие и более высокие значения удельной емкости могут обеспечить когерентные гетеропереходы ПСИП/ИнЭл. В ячейках памяти субмикрометровых размеров толщина слоя ПСИП может быть $\sim 10^{-5}$ — 10^{-6} см . Слой RbAg_4I_5 ($\sigma_i \approx 0,3 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ при 300 К) толщиной 10^{-5} — 10^{-6} см и площадью 1 см^2 будет иметь сопротивление $R \approx 3 \cdot 10^{-5} \div 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$. Поэтому постоянная времени отдельной ячейки с удельной емкостью 100 мкФ/см^2 будет $\sim 3 \cdot 10^{-9} \div 3 \cdot 10^{-10} \text{ с}$ (максимальная частота функционирования 0,3—3 ГГц). Достигнутое в результате многолетних разработок фирм-лидеров электронной промышленности (NEC, SAMSUNG, MITSUBISHI, TOSHIBA) максимальное значение удельной емкости для сегнетоэлектрической памяти DRAM составляет $\approx 150 \text{ фФ/мкм}^2$. Данные обзоров [59, 60] и пресс-релизы высокотехнологичных корпораций [61] показывают отсутствие заметного прогресса в создании высокоплотной сегнетоэлектрической DRAM (площадь отдельных ячеек превышает $0,5 \text{ мкм}^2$) в период 1995—2003 гг. Таким образом, когерентные гетеропереходы ПСИП/ИнЭл представляют интерес для разработки НСК субмикрометровых размеров с удельной емкостью $\sim 10^{-4} \text{ Ф/см}^2$ и рабочей частотой $\sim 10^8$ — 10^9 Гц для емкостной DRAM объемом более 5 Гбит.

Вследствие рекордно высоких рабочих частот НСК с когерентными гетеропереходами по удельной мощности должны значительно превосходить таблеточные суперконденсаторы существующих типов [33, 58].

Диаграмма соотношения удельных энергии и мощности для различных источников питания и проектируемых тонкопленочных НСК показана на рис. 3. Область параметров проектируемых НСК выделена эллипсом (1 — удельная емкость 300 мкФ/см^2 , $V_{\text{раб}} \approx 0,5 \text{ В}$, рабочая частота 1 МГц; 2 — удельная емкость 300 мкФ/см^2 , $V_{\text{раб}} \approx 0,5 \text{ В}$, рабочая частота 10 МГц; 3 — удельная емкость 300 мкФ/см^2 , $V_{\text{раб}} \approx 3 \text{ В}$, рабочая частота 1 МГц).

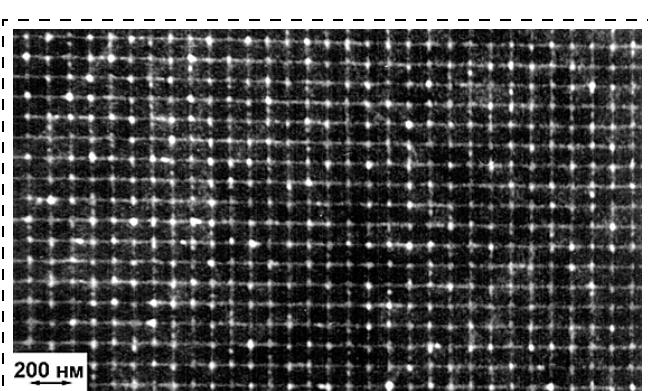


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение матрицы ячеек ($100 \times 100 \text{ нм}$), сформированных методом прямой электронно-лучевой литографии в пленках ПСИП (RbAg_4I_5) толщиной 40 нм на углеродной подложке

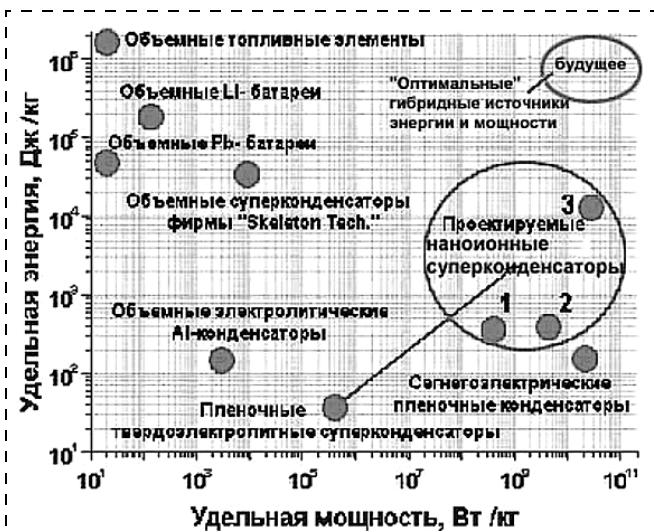


Рис. 3. Удельные энергия и мощность различных типов источников тока, суперконденсаторов и "оптимальных" гибридных источников

Проведем оценку значений потенциальных барьера U для перескоков ионов в области ДЭС на гетеропереходах ПСИП семейства $\text{RbAg}_4\text{I}_5/\text{In}\text{Эл}$ в НСК с рабочей частотой 1–10 МГц. Частота перескоков ионов между минимумами потенциального кристаллического рельефа определяется формулой

$$v = v_0 \exp(-U/kT), \quad (5)$$

где $kT \approx 0,026$ эВ для 300 К, а частота попыток перескоков барьера для ионов серебра $v_0 \sim 10^{12}$ Гц. Для проектируемых НСК значения емкости должны реализоваться в течение $t \approx 10^{-6} \div 10^{-7}$ с, поэтому частота перескоков $v \approx 10^6 \div 10^7$ Гц. Логарифмирование формулы (5) дает

$$U = kT(\ln v_0 - \ln v). \quad (6)$$

Подстановка числовых значений в (6) приводит к значениям $U \approx 0,36 \div 0,30$ эВ, что примерно в три раза больше, чем энергия активации σ_i в RbAg_4I_5 и соответствует значениям энергии активации обычных СИП.

В последние годы наблюдается возрастающая активность в исследованиях и применениях (в том числе военных) беспроводных сенсорных сетей (WINS — Wireless Sensor Networks) [62]. На основе компьютерных технологий WINS будут обеспечивать связь между физическим миром и растущей по экспоненте информационной инфраструктурой. Беспроводные сети будут встраиваться в вещи, продукты, людей, придавая им качественно новые свойства, функциональность, возможности и способности, обеспечивая следующие поколения ре-

волюционных технических инноваций. Беспроводные сети будут широко применяться в военной и гражданской сферах: интеллектуальное оружие и информационные системы поля боя, военные системы разведки и оповещения, "умные" постройки (smart buildings), транспорт, информационная безопасность, автоматизация производства, робототехника и др. Действие WINS основывается на полностью автоматизированных, автономных и свободно расположенных в пространстве узлах, действующих в условиях сильного дефицита энергии. Энергия в узлы WINS, как правило, будет поступать непосредственно из окружающей среды.

МСТ требуются источники с "оптимальным" соотношением энергия—мощность. Рассмотрим это положение на примере беспроводных сенсорных сетей, где мощность отдельного импульса W в сеансе радиопередачи сенсорного узла определяется расстоянием уверенного приема и зависит от расстояния в степени 2–6 (в зависимости от окружающей среды). Энергия, излучаемая в сеансе радиосвязи сенсорным узлом, определяется выражением

$$\epsilon = Wn\Delta t, \quad (7)$$

где n — число импульсов в сообщении; Δt — длительность отдельного импульса.

Таким образом, источник питания сенсора должен обеспечивать заданное соотношение энергии и мощности.

Функционирование беспроводных сенсорных сетей предполагает использование гибридных источников. Например, большое значение придается развертыванию в космическом пространстве WINS с тысячами автономных узлов, базирующихся на пикоспутниках, чья масса не будет превышать нескольких сот граммов. Энергопитание пикоспутников будет осуществляться от миниатюрных гибридных источников, содержащих фотоэлемент, основную батарею (Li-батарея) и НСК, обеспечивающий режим радиокоммуникаций. Солнечная энергия, накапливаясь в Li-батарее, по мере необходимости расходуется НСК, который должен обеспечить высокую мощность в режиме передачи, определяемую расстоянием уверенного приема. Энергия, запасаемая в НСК, определяется протоколом сообщения.

Предполагается, что миниатюрные НСК обеспечат рекордно высокие удельные характеристики (мощность—энергия) и будут значительно устойчивее по сравнению с другими типами конденсаторов в сильных полях проникающих ионизирующих излучений. На диаграмме "удельная энергия—удельная мощность" (рис. 3) "оптимальный" гиб-

ридный источник, содержащий НСК, попадает в правый верхний угол.

Выводы

◆ Предложена новая классификация твердотельных ионных проводников. Выделен новый класс "передовых суперионных проводников" (ПСИП).

◆ Предложено новое направление наноионики — наноионика ПСИП.

◆ Наносистемы твердых ионных проводников разделены на два класса:

- наносистемы на основе веществ с малой ионной проводимостью σ_i и параметром $P = d/L \approx 1$ (d — толщина граничной области с особыми свойствами, L — характерный размер наноструктуры). Для наносистем с ДЭС $d \approx \lambda_D$, где λ_D — радиус Дебая, $P = \lambda_D/L$;
- наносистемы на основе ПСИП.

◆ Для наноионики ПСИП введены:

- характерный параметр наноПСИП $P = d/\lambda_Q$ (d — толщина слоя с разупорядоченной дефектной кристаллической структурой в области гетерограницы, λ_Q — длина экранирования заряда подвижными ионами в объеме ПСИП);
- критерий сохранения быстрого ионного транспорта (БИТ) на гетерограницах ПСИП/электрод.

◆ Фундаментальную проблему наноионики — сохранение быстрого ионного транспорта (БИТ) в наноПСИП — предлагается решать путем создания структурно-упорядоченных (когерентных) гетерограниц ПСИП/индифферентный электрод (ИнЭл).

◆ Для решения задачи сохранения БИТ в наноПСИП предложена идея формирования структурно упорядоченных когерентных гетерограниц ПСИП/индифферентный электрод (ИнЭл).

◆ На основе анализа ион-электронных процессов на гетеропереходах ПСИП/ИнЭл показано, что в наноионике ПСИП выравнивание уровней Ферми на гетеропереходах не сопровождается заметным изгибом зон и появлением контактных потенциалов измеримой величины ($eV \ll k_B T$).

◆ Показано, что когерентные гетеропереходы ПСИП/ИнЭл должны обладать высокой удельной электрической емкостью и рекордно малым временем отклика на изменение потенциала, что открывает возможности для создания новых типов наноионных приборов: ячейки памяти для DRAM объемом более 5 Гбит, НСК гибридные источники питания для МЭМС и беспроводных сенсорных сетей, пленочные сенсоры и др.

Авторы выражают благодарность В. В. Аристову и П. П. Мальцеву за поддержку работы.

Список литературы

1. Liang C. C. Conduction characteristics of the lithium iodide-aluminum oxide solid electrolytes // J. Electrochem. Soc. 1973. V. 120. P. 1289—1292.
2. Shahi K., Wagner J. B. Fast ion-transport in silver-halide solid-solutions and multiphase systems // Appl. Phys. Lett. 1980. V. 37. P. 757—759.
3. Maier J. Enhancement of the ionic conductivity in solid-solid-dispersions by surface induced defects // Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 1984. V. 88. P. 1057—1062.
4. Raleigh D. O., Crowe H. R. // J. Electrochem. Soc. 1971. V. 1. 18. P. 79.
5. Чеботкин В. Н., Перфильев М. В. Электрохимия твердых электролитов. М.: Химия, 1978.
6. Despotuli A. L., Nikolaichic V. I. A step towards nanoionics // Solid State Ionics. 1993. V. 60. P. 275—278.
7. Despotuli A. L., Andreeva A. V. Nanoionics as a way towards new discoveries and applications. E-publication. 2003 // <http://preprint.chemweb.com/physchem/0309001>
8. Drexler K. E. Nanosystems: molecular machinery, manufacturing, and computation. Wiley Interscience, 1992. 576 p.
9. http://www.foresight.org/Nanosystems/glossary/glossary_n.html
10. Despotuli A. L., Andreeva A. V., Rambabu B. Nanoionics of Advanced Superionic Conductors // Book of Abstracts "Patras Conference on Solid State Ionics-Transport Properties" September 14—18, 2004. P. 66.
11. Lehovec K. J. Space-charge layer and distribution of lattice defects at the surface of ionic crystal // J. Chem. Phys. 1953. V. 21. P. 1123.
12. Chandra S. Superionic solids. North—Holland Publishing Company, 1981. 404 p.
13. Деспотули А. Л., Деспотули Л. А. Влияние Sm на оптическое поглощение в тонких пленках твердого электролита RbAg₄I₅ // ФТТ. 1997. Т. 39. С. 1544—1549.
14. Despotuli A. L. Insertion of rare-earth metals into AgI-based compounds. First evidence of disordering and strong modification of β - and α -AgI crystal structures // New Trends in Intercalation Compound for Energy Storage. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academic Publishers. NATO Science Series II. Mathematics, Physics and Chemistry / Eds. C. Julien et al. 2002. V. 61. P. 455—462.
15. Despotuli A. L., Levasov V. I. Insertion transition, rare-earth and actinoid elements into AgI and CuI E-publication. 2002 // <http://preprint.chemweb.com/inorgchem/0208001>
16. Деспотули А. Л., Левашов В. И., Матвеева Л. А. Внедрение 3d- и 4f-элементов в AgI // Электрохимия. 2003. Т. 39. С. 526—532.
17. Kebinski P., Eggebrecht J., Wolf D., Phillipot S. R. Molecular dynamics study of screening in ionic fluids // J. Chem. Phys. 2000. V. 113. P. 282—291.
18. Волков А. А., Козлов Г. В., Мирзоев Г. И., Гофман В. Г. Субмиллиметровые колебательные спектры суперионного проводника RbAg₄I₅ // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 38. С. 182—184.
19. Maier J. Crystalline solid electrolytes and defect chemistry: some novel thermodynamic and kinetic results // Solid State Ionics. 1996. V. 86-88. P. 55—67.
20. Lee J.-S., Adams St., Maier J. A mesoscopic heterostructure as the origin of the extreme ionic conductivity in AgI:Al₂O₃ // Solid State Ionics. 2000. V. 136—137. P. 1261—1266.
21. Maier J. Point-defect thermodynamics and size effects // Solid State Ionics. 2000. V. 131. P. 13—22.
22. Maier J. Thermodynamic aspects and morphology of nanostructured ion conductors. Aspects of nano-ionics. Part I // Solid State Ionics. 2002. V. 154—155. P. 291—301.
23. Maier J. Defect chemistry and ion transport in nano-structured materials. Part II. Aspects of nano-ionics // Solid State Ionics. 2003. V. 157. P. 327—334.
24. Maier J. Nano-sized mixed conductors. Aspects of nano-ionics. Part III // Solid State Ionics. 2002. V. 148. P. 367—374.

25. Maier J. Nano-Ionics: Trivial and Non-Trivial Size Effects on Ion Conduction in Solids // Z. Phys. Chem. 2003. V. 217. P. 415—436.
26. Sata N., Eberman K., Eberl K., Maier J. Mesoscopic fast ion conduction in nanometerscale planar heterostructures // Nature. 2000. V. 408. P. 946—949.
27. Jannink J., Maier J. Nanocrystallinity effects in lithium battery materials. Aspects of nano-ionics. Part IV // Phys. Chem. 2003. V. 5. P. 5215—5220.
28. Despotuli A. L., Shestakov A. A., Lichkova N. V. An external electric field effect in electron-beam lithography of RbAg₄I₅ solid electrolyte film // Solid State Ionics. 1994. V. 70/71. P. 130—133.
29. Choy J. H., Park N. G., Kim Y. I., Hwang S. H., Lee J.-S., Yoo H.-I. Molecular layer by layer engineering of superconducting and superionic materials in the (AgI)Br₂Sr₂CaCu₂O_y system // J. Phys. Chem. 1995. V. 99. P. 7845—7848.
30. Choy J. H., Kim Y. I., Hwang S. J. Superionic and superconducting nanohybrids with heterostructure, Ag_xBi₂Sr₂Ca_{n-1}Cu_nO_y (0.76 < x < 1.17, n = 1, 2, and 3) // J. Phys. Chem. B 1998. V. 102. P. 9191—9202.
31. Despotuli A. L., Andreeva A. V. Double-layer thin-film supercapacitors for nano-electro-mechanical systems (NEMS) // Proc. IARP International workshop "Micro Robots, Micro Machines, Micro Systems", Moscow, April 24—25. 2003. P. 129—141.
32. Despotuli A. L., Andreeva A. V. The design of solid electrolyte/electrode interface as a way nanoionics and thin-film double electric layer supercapacitors for micro (nano) electronics and microsystem technology. E-publication. 2003 // <http://preprint.chemweb.com/physchem/0306011>.
33. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Создание новых типов тонкопленочных твердоэлектролитных суперконденсаторов для микросистемной техники и микро(нано)электроники. Ч. 1 // Микросистемная техника. 2003. № 11. С. 2—10.
34. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Создание новых типов тонкопленочных твердоэлектролитных суперконденсаторов для микросистемной техники и микро(нано)электроники. Ч. 2 // Микросистемная техника. 2003. № 12. С. 2—6.
35. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Наноионика суперионных проводников // Материалы 7-го Совещания "Фундаментальные проблемы ионики твердого тела". Черноголовка, 16—18 июня. 2004. С. 22.
36. Лифшиц И. М., Гегузин Я. Е. Поверхностные явления в ионных кристаллах // ФТТ. 1965. Т. 7. С. 62—74.
37. Чеботин В. Н., Соловьева Л. М. Строение и емкость двойного электрического слоя в твердых электролитах // Электрохимия. 1968. Т. 4. С. 858—862.
38. Укше Е. А., Букун Н. Г. Развитие модели адсорбционной релаксации двойного слоя в суперионных проводниках // Электрохимия. 1990. Т. 26. С. 1373—1381.
39. Watanabe T. An approach to grain boundary design for strong and ductile polycrystals // Res Mechanica. 1984. V. 11. P. 47—84.
40. Watanabe T., Tsurekawa S. The control of brittleness and development of desirable mechanical properties in polycrystalline systems by grain boundary engineering // Acta mater. 1999. V. 47. P. 4171—4185.
41. Watanabe T. A new approach to grain boundary engineering for structural and functional materials in the 21st century // Int. Conf., "Interfaces in advanced materials", Book of abstracts, Chernogolovka, 26—30 May, 2003. P. 2.
42. Il'lin A. I., Andreeva A. V., Tolkunov B. N. Characteristic features of grain structure and electron properties of thin bismuth films // Mat. Sci. Forum. 1996. V. 207—209. Part 2. P. 625—628.
43. Андреева А. В., Ильин А. И., Кононенко О. В. Процессы самоорганизации и граничный дизайн в субмикронных пленках Bi, Bi-Sb, полученных методами конденсации из молекулярно-го и частично ионизированного потока испаряемого материала в высоком вакууме // Труды международного междисциплинарного симпозиума "Фракталы и прикладная синергетика". Москва. 2003. С. 118—122.
44. Andreeva A. V., Talijan N. M., Milutinovic A. at el. Interface design of high coercive sintered permanent magnets of the SmCo₅-type. E-publication. 2003 // <http://preprint.chemweb.com/inorgchem/0302001>.
45. Backhaus-Ricoult M., Trichet M.-F. Interfacial chemistry at metal electrode — oxide electrolyte contacts // Solid State Ionics. 2002. V. 150. P. 143—156.
46. Roettger R., Schmalzried H. Chemical kinetics at solid/solid interfaces // Solid State Ionics. 2002. V. 150. P. 131—141.
47. Kolb D. M. An atomistic view of electrochemistry // Surface Science. 2002. V. 500. P. 722—740.
48. Andreeva A. V., Despotuli A. L. The interface design of thin film system based on solid state electrolyte (RbAg₄I₅) as a way towards supercapacitors // hit. Conf. "Interfaces in advanced materials", Book of abstracts, Chernogolovka, 26—30 May. 2003. P. 32.
49. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Тонкопленочные твердоэлектролитные суперконденсаторы для микро(нано)электроники и микросистемной техники // Материалы международной научно-практической конференции INTERMATIC-2003. Москва. 9—12 июня. 2003. С. 156—160.
50. Деспотули А. Л., Личкова Н. В., Миненкова Н. А., Носенко С. В. Получение и некоторые свойства тонких пленок твердых электролитов CsAg₄Br_{3-x}I_{2+x} и RbAg₄I₅ // Электрохимия. 1990. Т. 26. С. 1524—1528.
51. Андреева А. В. Симметрия межкристаллитных границ: приложение к задачам гетероэпитаксии // Поверхность. Физика, химия, механика. 1990. № 46. С. 117—123.
52. Андреева А. В., Фирсова А. А. Симметрия межкристаллитных границ: алгоритмы, программы, таблицы // Препринт ИПТМ АН СССР, Черноголовка, 1990. 44 С.
53. Andreeva A. V. The interface symmetry and heteroepitaxy // Material Science Forum. 1991. V. 69. P. 111—115.
54. Andreeva A. V., Meiler D. L. The interface symmetry and epitaxy in NiGaAs system // Crystal properties and preparation. 1991. V. 35—38. P. 358—363.
55. Benthem K., Pennycook S. J. High resolution EELS with the aberration corrected STEM: determining interfacial electronic structures with high accuracy // Microscopy and Microanalysis. Annual meeting of the Microscopy Society of America. Savannah, Georgia. August 1—5. 2004 (<http://www.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/pres/119941.pdf>).
56. Kiguchi M., Inoue H., Sasaki T. at el. Electronic structure of alkali halide-metal interface: LiCl(001)/Cu(001) // Surf. Sci. 2003. V. 522. P. 84—89.
57. Bredikhin S., Hattori T., Ishigame M. Schottky barriers and their properties in superionic crystals // Phys. Rev. B. 1994. V. 50. P. 2444—2449.
58. <http://www.skeleton-technologies.com>
59. Ezhilvalavan S., Tseng T. Progress in the developments of (Ba, Sr)TiO₃ (BST) thin films for Gigabit era DRAMs // Materials Chemistry and Physics. 2000. V. 65. P. 227—248.
60. Jones R. E., Zurcher P., Chu P. at el. Memory application based on ferroelectric and high-permittivity dielectric thin films // Microelectronic Engineering. 1995. V. 29. P. 11—15.
61. <http://www.applianceweb.com/story/oeg20030624s0046.htm>
62. Levis F. L. Wireless Sensor Networks // Smart Environments: Technologies, Protocols, and Applications / Eds. D. J. Cook and S. K. Das. John Wiley. New York. 2004.

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

УДК 681.586

В. А. Бархоткин, д-р техн. наук, проф.,
Московский институт электронной техники,
Е. И. Минаков, канд. техн. наук,
Тульский государственный университет

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ВИБРОДАТЧИКИ

Рассматриваются необходимость и некоторые пути интеллектуализации датчиков на примере одной из задач для датчиков вибрации.

Своими последними достижениями сенсорная техника обязана быстродействующим и недорогим электронным схемам, новым задачам, новым методам обработки сигналов и передовым производственным технологиям. Проведение новых разработок в этих областях требует использования совершенно новых подходов для эффективного улучшения характеристик технических изделий, включая разработку новых структур датчиков, обеспечивающих их самоконтроль и самокалибровку. Быстрый прогресс в технологиях производства должен использоваться для создания недорогих, имеющих минимальные массу и габаритные размеры, но в то же время очень надежных, сложных и высокачественных систем и компонентов. Возможность колossalного усложнения схем и программного обеспечения позволяет применить цифровую обработку сигналов и сложнейшие современные алгоритмы обработки, включая алгоритмы слияния данных и т. п.

Принципами работы всех измерительных и управляющих систем является обработка полученных результатов от различных сенсоров системы и обеспечение данных для принятия решения. В зависимости от количества информации, ее достоверности, алгоритмов ее обработки, а также от степени их реализации в про-

граммном обеспечении зависит качество работы бытовых систем, технологического оборудования, точность обнаружения, самонаведения, наведения, качество контроля параметров систем, эффективность проведения ремонтных, регламентных и настроочных работ. Причем полнота и точность обеспечения функциональных задач вступает в противоречие с обеспечением массогабаритных характеристик, надежности и стоимости. Поэтому во всех странах мира ведется непрерывная борьба за реализацию максимального количества функциональных задач при обеспечении высокой надежности, минимальных габаритных размеров, массы и стоимости.

Рассмотрим основные вопросы, стоящие перед разработчиками вибродатчиков в системах обнаружения движущихся объектов (людей, техники и т. п.).

Первыми к разработке разведывательных систем приступили США, в частности, для создания системы заграждений "Дуэл Блейд", получившую в прессе название "Линия Макнамары".

В настоящее время существует более 100 типов систем для идентификации боевой обстановки и условий применения с различными принципами обнаружения целей. Эти приборы делятся на сейсмические, акустические, магнитные, электромагнитные, ИК, ра-

диолокационные, телевизионные, тепловизионные, лазерные, фотоэлементные, балансные, балансноемкостные, вибрационные, емкостновибрационные, контактные, обрыва провода и комбинированные (сейсмомагнитные, сейсмоэлектромагнитные, сейсмоакустические, магнитосейсмоакустические, гидроакустические), а также химические, радиационные и обнаружения запуска двигателей.

Основными недостатками современных систем являются массогабаритные характеристики. Так, новейшая американская система ADAS (Air Deliverable Acoustic Sensor) фирмы "Текстрон" имеет массу 2,7 кг и 6,35 кг, система CLASSIC RGS 2740 (CLASSIC — Covert Local Area Sensor System for Intruder Classification) имеет приборы с размерами $9,5 \times 25 \times 42$ см и массой 1,3 кг и т. д.

Поскольку рассматриваемые вибродатчики предполагается устанавливать вручную, с помощью авиации или артиллерии, а данные об обнаружении целей передавать по проводам или УКВ радиоканалу, то это обстоятельство накладывает жесткие требования на массогабаритные характеристики, надежность выполнения заданных функций и стоимость забрасываемых приборов. В ряде систем устанавливают фотоэлементы, включающие их только в темное время суток, а в отдельные — самоликвидаторы. При использовании подобных устройств для бытового и промышленного применения к ним будут предъявляться требования повышенной автоматизации, безопасности и комфорта.

Поставщики элементов для вышеуказанных систем с учетом требований разработчиков также идут по пути объединения элементов при одновременном уменьше-

ния массы, габаритных размеров и стоимости.

Так, компания Брюль и Къер предлагает различные акустические датчики с чувствительностью от 0,09 до 100 мВ/Па и частотным диапазоном от 1 Гц до 140 кГц, а также усилители с частотным диапазоном от 3 Гц до 200 кГц, пьезоэлектрические акселерометры с чувствительностью от 1 до 100 мВ/мс и частотным диапазоном от 0,1 Гц до 54 кГц, а также миниатюрные датчики различного назначения массой от 1 г до 28 г.

Фирма Motorola, которая является одним из лидеров в области производства датчиков давления, предлагает различные датчики давления с чувствительностью от 0,2 до 1000 мВ/кПа и диапазоном измерения от 25 мВ до 4,59 В, кроме того, данная фирма предлагает датчики с формированием сигнала, такие как MPX4100A, MPXA4100A, MPX5010, MPXV5010, MPX5500, MPX5999 и др.

Отечественными датчиками, которые можно использовать в разработке подобных систем, являются:

- низкоимпедансные акселерометры AP28, AP67, AP68, AP82, AP85;
- миниатюрные вибропреобразователи AP30, AP31, AP32, AP33;
- вибропреобразователи общего назначения AP37, AP39, AP40, AP51, AP57, AP77;
- трехкомпонентные вибропреобразователи AP20, AP21, AP22, AP38, AP80, AP81;
- вибропреобразователи повышенной чувствительности AP48, AP49, AP50;
- подводные вибропреобразователи AP78, AP79.

Данные датчики имеют частотный диапазон от 0,2 Гц до 20 кГц, массу от 0,7 до 250 г, размеры от 3,2 × 4,6 × 5,8 мм до 48 × 25 × 30 мм.

Кроме того, некоторые фирмы на основе МЭМС-технологии выпускают интегрированные датчики на одном кристалле. Так, фирма Analog Devices выпустила акселерометры ADXL150 и ADXL250 на кристалле размером 5 × 2 мм; на одном кристалле размещены сам акселерометр, схема формирования сигнала, генератор тактовых импульсов, демодулятор и таймер. Также выпущен акселерометр ADXL202, у него предусмотрен интерфейс с микроконтроллером.

Из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что на данном этапе развития технологии и науки необходимо переходить к созданию измерительных систем (с одним датчиком или несколькими), которые будут обеспечивать:

- получение информации;
- сложнейшую первичную и вторичную обработку;
- самоконтроль;
- калибровку;
- принятие решения на нижнем уровне;
- подготовку данных для передачи;
- передачу данных на необходимое расстояние.

Такие датчики в зависимости от уровня разработки будут обладать большим или меньшим искусственным интеллектом.

Для дистанционного обнаружения движущихся объектов (лю-

дей, автомобилей, бронетанковой техники и т. п.) с помощью вибродатчиков необходимо их расположить на контролируемой площади, определить при необходимости их координаты, собрать сигналы с датчиков и принять решение о наличии объекта, его типе, направлении и скорости перемещения. В связи со сложностью задачи и с учетом вышеизложенного следует возложить на вибродатчик, точнее уже интеллектуальный вибродатчик, не только первичную обработку сигнала, но и сложнейшую вторичную по определению спектра сигнала или других, не менее сложных, характеристик.

Если, для примера, в качестве чувствительного элемента взять АВИ-3-100 (разработчик — Государственный научный центр "Технологический центр" МИЭТ), то структурная схема интеллектуального вибродатчика может быть представлена рис. 1.

Внешний вид экспериментального образца без антенны показан на рис. 2.

Алгоритм работы интеллектуального вибродатчика — очень сложный, даже в основных этапах работы (первичная обработка сигнала, определение спектральных или других характеристик, сравнение с эталонными характеристиками, поиск решения на основе заданных методов, фор-

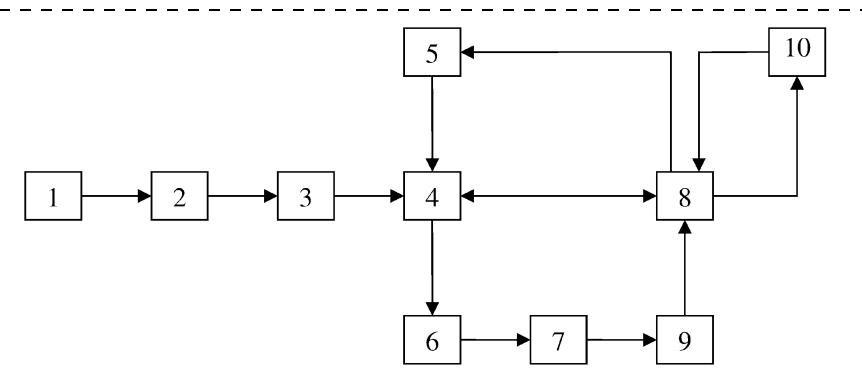


Рис. 1. Структурная схема интеллектуального вибродатчика:

1 — сенсор (АВИ-3-100); 2 — линейный усилитель; 3 — АЦП; 4 — микропроцессор; 5 — приемник навигационного устройства; 6 — модем; 7 — задающий генератор; 8 — коммутатор; 9 — передатчик (экспериментальный образец с импульсно-кодовой модуляцией); 10 — приемно-передающая антенна

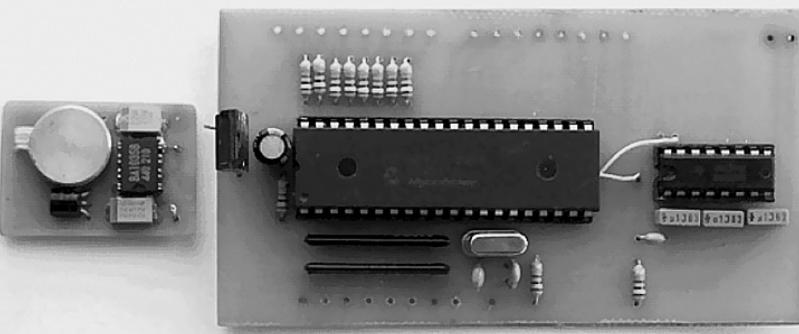


Рис. 2. Внешний вид экспериментального образца интеллектуального вибродатчика без антennы

мирование пакета для передачи и т. д.). Искусство работы программистов (в том числе по составлению структуры программы, ее отдельных ветвей, выбору одинаковых фрагментов, слиянию фрагментов и т. п.) может значительно сократить требуемую память, что повысит надежность и уменьшит габаритные размеры и массу.

Рассмотрим конспективно лишь отдельные части некоторых этапов работы интеллектуального вибродатчика. Начальное состояние интеллектуального вибродатчика — дежурный режим, т. е. система находится в режиме ожидания. При появлении информационного сигнала (сигнала от движущегося объекта) элементы выходят из дежурного режима и интеллектуальный вибродатчик начинает свою работу по программе, записанной в ПЗУ:

- после аналоговой фильтрации, если она реализуется, осуществляется аналого-цифровое преобразование и размещение в ОЗУ полученной информации (при достаточно простом алгоритме обработки можно использовать микроконтроллер Pic 18F874 со встроенным АЦП, ПЗУ и ОЗУ);
- проводит цифровую фильтрацию полученного сигнала (применение цифровой фильтрации позволит создать более сложные фильтры по сравнению с аналоговыми, даже физически не реа-

лизуемые, что является существенным преимуществом и позволяет более качественно выделить информационную составляющую от движущегося объекта);

- выполняет распознавание объекта по информации, записанной в базу данных, используя преобразования Фурье, Уолша, Хаара и др., методы выделения признаков цели и сравнение с эталонными характеристиками;
- принимает решение о типе объекта;
- присваивает кодовый номер распознанного объекта (использование такого принципа позволяет уменьшить длину информационного пакета и увеличить помехозащищенность передаваемой информации);
- создает информационный пакет. При этом необходимо учитывать, что разрабатываемая система должна удовлетворять стандартам телекоммуникационных систем, например, можно использовать стандартный протокол IEEE 802/4, в который должны быть включены:
 - преамбула;
 - адрес или номер датчика;
 - координаты датчика, которые могут храниться на приемном пункте или в ретрансляторе в зависимости от метода определения координат датчиков);
 - кодовый номер распознанного объекта;
 - адрес, куда передается информация (номер сетевой карты);

— код правильности передачи информации.

При определении координат датчиков могут использоваться:

- частота датчика (может устанавливаться программным способом после размещения датчика из пункта управления или из ретранслятора);
- индивидуальный код модуляции несущей;
- ширина диаграммы направленности.

Причем координаты пульта управления или ретранслятора могут привязываться к точности радионавигационной космической системы "Глонас", а координаты датчиков определяться с помощью триангуляционного, геодезического или других методов.

Для повышения помехозащищенности передаваемого сигнала и скрытности информации должна проводиться кодировка протокола.

При отработке функциональных задач интеллектуального вибродатчика разработчик сможет использовать дополнительную флеш-память.

После отладки для минимизации габаритно-массовых характеристик схему данного интеллектуального вибродатчика можно реализовать на базовом матричном кристалле либо в виде системы на кристалле.

Список литературы

1. Брежнев Ф., Смолянский Р. Л. Семейство протоколов TCP/IP // Сервер Центра Информационных Технологий (<http://www.citforum.ru>).
2. Зайчик А. Краткий справочник по наиболее известным IEEE 802. Ч. 1 и 2 // LAN. 1997. № 7 и 8.
3. Алейников А. Ф., Цапенко М. П. О классификации датчиков // Датчики и системы. 2000. № 5.
4. Масалев В. Радиоэлектронные средства охраны ВС США и перспективы их развития. Ч. 1 и 2 // Зарубежное военное обозрение. 2002. № 3 и 4.
5. Тренхлер Х. Р., Конон О. Современное состояние сенсорной техники // Датчики и системы. 2001. № 11.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 510.67:621.3.049.77

Г. Н. Космодемьянская, канд. физ.-мат. наук,
С. И. Сорокина,
Калужский филиал Московского
государственного технического университета
им. Н. Э. Баумана

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ МИКРОКАПСУЛ В ТРУБКАХ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Строится поле давления в зазоре при поступательном движении с перекосом микрокапсулы вдоль оси трубы малого диаметра, наполненной вязкой жидкостью. Используется метод эквивалентного уравнения как один из аналитических методов решения неоднородных уравнений второго порядка в частных производных с переменными коэффициентами.

Введение

Нетрудно прогнозировать внедрение микросистемой техники во все без исключения сферы технической деятельности человека: энергетику, транспорт, машиностроение, космос, авиацию, робототехнику, медицинскую диагностику, микрохирургию на клеточном уровне и многое другое [1].

На данном этапе развития микроробототехники можно выделить следующие основные направления развития:

- микrorоботы для диагностики технических систем;
- микrorоботы медицинского назначения;
- микроманипуляционные роботы.

Необходимо выполнять техническую диагностику трубопроводов малых диаметров (внутри авиационных двигателей, оборудования атомных электростанций и химических производств) в целях предотвращения аварий и других экстремальных ситуаций, возникающих при эксплуатации современных сложных технических систем. Ряд хирургических операций требует высокой точности исполнения в области микрохирургии глаза, микронейрохирургии. В последние годы наблюдается увеличение числа желудочно-кишечных заболеваний, тромбоэмболических осложнений при различных заболеваниях. Таким образом, существует потребность в создании устройства, перемещающегося в тканях с их минимальным травмировани-

ем, для диагностики и эффективного лечения как сердечно-сосудистой системы, желудочно-кишечного тракта, так и других систем жизнедеятельности человека. Недостаток существующих технических средств заключается в том, что безопасность обеспечивается только опытом хирурга, а продвижение инструмента по сосудистому руслу отслеживается с помощью рентгеновских снимков.

Необходимо создание устройства с использованием информационно-сенсорных систем, контролирующих как собственное движение устройства, так и состояние в рабочей зоне [2].

Одним из актуальных направлений развития современной микроробототехники является создание устройств для работы в трубках малого диаметра, наполненных вязкой жидкостью. Это направление является перспективным как для технических, так и для биологических систем. Главное преимущество микроприборов — соизмеримость их масштабов с масштабами биологических структур и возможность их размещения в очень малых рабочих зонах. Сравнительные характеристики плотности и динамической вязкости некоторых технических и биологических сред приводятся в таблице [3].

Следует отметить, что в биологических системах течение вязких жидкостей намного медленнее, чем в технических. Течение в микроканалах, диаметр которых меньше 3 мкм, характеризуется возникновением эффекта молекулярного взаимодействия, что приводит к проскальзыванию на стенках канала. Вследствие химического взаимодействия могут появляться силы электрического характера, также вызывающие проскальзывание [4], однако если никакие электрические эффекты не заложены в условиях решаемых задач и отношение скорости потока вязкой жидкости к поперечному размеру микроканала имеет порядок меньше 10^{12} с^{-1} , то в качестве граничного условия можно принимать отсутствие проскальзывания на стенках.

Вещество	Динамическая вязкость μ при 20 °C, Па · с	Плотность ρ , г/см ³
Вода	$1,005 \cdot 10^{-3}$	1,000
Этиловый спирт	$1,200 \cdot 10^{-3}$	0,794
Ртуть	$1,554 \cdot 10^{-3}$	13,520
Керосин	$1,900 \cdot 10^{-3}$	0,860
Кровь	$4,522 \cdot 10^{-3}$	1,050
Глицерин	$1500 \cdot 10^{-3}$	1,260

Поток вязкой несжимаемой ньютоновской жидкости в микроканалах с поперечным размером от 1 мм до 100 мкм может быть описан средствами классической гидромеханики. При движении крови по большинству артерий она может рассматриваться как однородная ньютоновская жидкость с коэффициентом вязкости в 3–5 раз выше, чем у воды (в зависимости от гематокрита). Если размеры канала соизмеримы с размерами кровяных телец, то используется теория вязкости для суспензий, которая объясняет повышение вязкости с увеличением концентрации взвешенных частиц. Для сплющеных эллипсоидов с осевым соотношением 1:6 (примерно равным для красных кровяных телец) коэффициент динамической вязкости, рассчитанный Симхой с учетом поправок Эйнштейна, $\mu' = 3\mu$. Свойства крови как неニュтоновской жидкости начинают все больше проявляться в сосудах с радиусом меньше 1 мм. В таких сосудах течение значительно усложняется в силу больших размеров взвешенных частиц по сравнению с поперечным сечением канала [5].

Таким образом, кровь можно рассматривать как один из видов рабочей среды для микромеханической системы, а при определенных условиях — как обычную вязкую жидкость, сравнимую с традиционными техническими рабочими средами. В работе [6] установлено, что микромеханическая система для диагностики внутренних полостей трубок малых диаметров может иметь вид цилиндрической микрокапсулы. При несоосном расположении микрокапсулы в тонкой трубке, наполненной вязкой несжимаемой жидкостью, на нее действует момент, обусловленный силами вязкого трения, который может вызвать перекос микрокапсулы так, что ее ось образует с осью трубы некоторый малый угол α .

В данной работе решается задача определения поля давления в зазоре при повороте капсулы относительно оси трубы при соосном начальном расположении и при повороте с начальным эксцентриситетом микрокапсулы относительно оси трубы. Для решения задачи используется метод эквивалентного уравнения как аналитический метод решения неоднородных уравнений второго порядка в частных производных с переменными коэффициентами в теории смазки для определения поля давления в сферических и цилиндрических подшипниках вращения. Этот метод дает хорошее совпадение с численным решением, которое считается эталонным [7]. Возможность применения данного математического аппарата обуславливается тем, что рассматривается вязкая несжимаемая ньютоновская жидкость, течение в зазоре ламинарное, отношение толщины слоя к его длине и среднему радиусу кривизны поверхностей, обра-

зующих рассматриваемый зазор, принимаются величинами, много меньшими единицы.

Поворот микрокапсулы без начального эксцентриситета

Сначала рассмотрим случай при нулевом начальном эксцентриситете, когда поворот капсулы происходит относительно ее центра масс (рис. 1). Длина микрокапсулы $2l$. Таким образом, зазор $\delta = d + za \cos(\phi)$ зависит от координат z и ϕ , $d = R_0 - r_0$, где R_0 и r_0 — радиусы трубы и микрокапсулы соответственно.

Принимая систему координат, как показано на рис. 2, получим решение уравнений Рейнольдса для поля скоростей в виде

$$V_z = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \frac{(n^2 - n\delta)}{2} + (U - U_0) \left(\frac{n}{\delta} - 1 \right);$$

$$V_\phi = \frac{1}{\mu R_0} \frac{\partial p}{\partial \phi} \frac{(n^2 - n\delta)}{2},$$

где V_z и V_ϕ — составляющие поля скоростей по соответствующим направлениям; U — скорость движения микрокапсулы относительно стенок трубы; U_0 — средняя скорость вязкой жидкости на некотором расстоянии от капсулы; $\frac{\partial p}{\partial z}$, $\frac{\partial p}{\partial \phi}$ — перепад давления по направлению оси z и оси ϕ соответственно.

Подставляя полученное решение в уравнение неразрывности

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_n}{\partial n} + \frac{1}{R_0} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{1}{\mu R_0} \frac{\partial p}{\partial \phi} \frac{(n^2 - n\delta)}{2} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \frac{(n^2 - n\delta)}{2} + (U - U_0) \left(\frac{n}{\delta} - 1 \right) \right) = 0 \end{aligned}$$

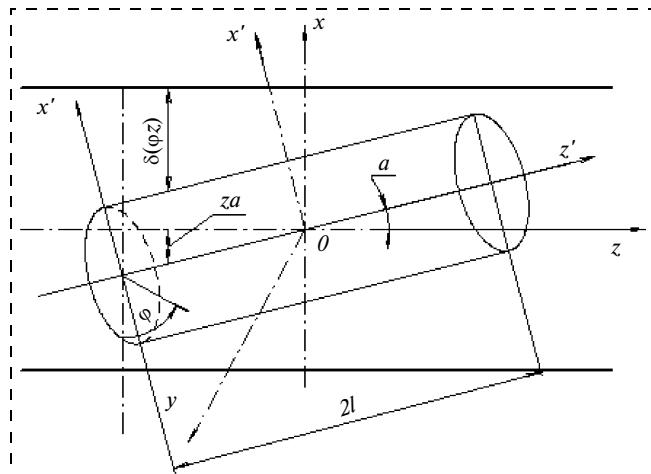


Рис. 1. Поворот капсулы относительно центра масс

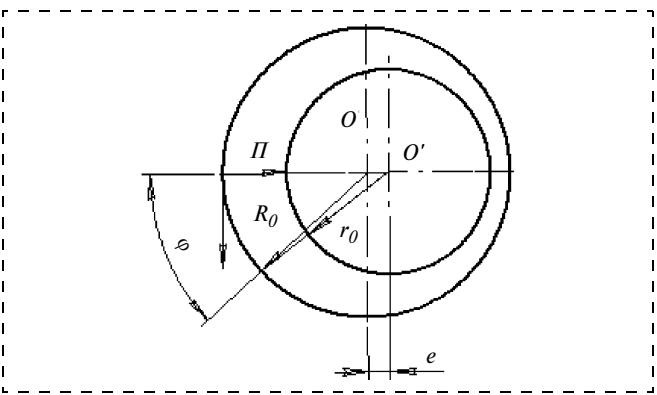


Рис. 2. Система координат $n; \phi; z$

и интегрируя по толщине слоя, получим следующее дифференциальное уравнение для определения давления в зазоре:

$$\frac{1}{R_0} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\delta^3 \left(\frac{\partial}{\partial \phi} p(\phi, z) \right) \right) + R_0 \frac{\partial}{\partial z} \left(\delta^3 \left(\frac{\partial}{\partial z} p(\phi, z) \right) \right) = 6\mu R_0 V \frac{\partial \delta}{\partial z} \quad (1)$$

с граничными условиями

$$p(-l) = p_0; \quad p(l) = p_1,$$

где p_0 и p_1 — давление на противоположных торцах микрокапсулах.

Перейдем к безразмерным величинам:

$$p = p_0 p^*;$$

$$p_0^* = 1;$$

$$p_1 = p_0 p_1^*;$$

$$z = R_0 z^*;$$

$$\delta = d\delta^* = d \left(1 + \frac{\alpha R_0}{d} z^* \cos(\phi) \right);$$

в дальнейшем звездочки опускаем, безразмерный коэффициент $\frac{6\mu R_0 V}{p_0 d^2} = k$; $\frac{\alpha R_0}{d} = k_1$. В безразмерных величинах уравнение (1) примет вид

$$\lfloor p_\phi \delta^3 \rfloor_\phi + \lfloor p_z \delta^3 \rfloor_z = k k_1 \cos(\phi) \quad (2)$$

с граничными условиями $p(-z_0) = 1$; $p(z_0) = p_1$.

Следует отметить, что как функция зазора $\delta(\phi, z)$, так и давление $p(\phi, z)$ являются периодичными по ϕ с периодом 2π :

$$\delta(\phi + 2\pi, z) = \delta(\phi, z); \quad p(\phi + 2\pi, z) = p(\phi, z).$$

Если проинтегрировать уравнение (2) по ϕ от 0 до 2π , то

$$\int_0^{2\pi} [p_\phi \delta^3]_\phi d\phi + \int_0^{2\pi} [p_z \delta^3]_z d\phi = \int_0^{2\pi} k k_1 \cos(\phi) d\phi.$$

В результате получаем

$$\int_0^{2\pi} [p_z \delta^3]_z d\phi = 0. \quad (3)$$

На основе метода, разработанного в работах [7, 8], построим такое линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами, решение которого удовлетворяло бы условию (3). С этой целью вводим новую функцию $u(\phi, z)$ следующим образом:

$$u_{zz} = \lfloor p_z \delta^3 \rfloor_z; \quad (4)$$

$$u(\phi, -z_0) = 0; \quad u(\phi, z_0) = 0. \quad (5)$$

Уравнение (4) с граничными условиями для p и u можно проинтегрировать, выразив одну функцию через другую или наоборот. В частности, зависимость u от p имеет вид

$$\begin{aligned} u &= p(1 + k_1 z \cos(\phi))^3 - \\ &- 3k_1 \cos(\phi) \int_{-z_0}^z p(1 + k_1 z \cos(\phi))^2 dz + \\ &\frac{3}{2} k_1 \cos(\phi) \int_{-z_0}^{z_0} p(1 + k_1 z \cos(\phi))^2 dz \left(\frac{z}{z_0} + 1 \right) + \\ &+ \frac{(1 + k_1 z_0 \cos(\phi))^3}{2} \left(\frac{z}{z_0} - 1 \right) - \\ &- \frac{p_1(1 + k_1 z \cos(\phi))}{2} \left(\frac{z}{z_0} + 1 \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Общий вид линейного неоднородного дифференциального уравнения в частных производных второго порядка эллиптического типа с постоянными коэффициентами для функции $u(\phi, z)$ имеет вид

$$u_{\phi\phi} + u_{zz} + au_\phi + bu_z + cu = f(\phi, z), \quad (7)$$

где a , b и c — константы, подлежащие определению.

Для любых решений уравнения (2) должно выполняться условие (3), которое применительно к функции $u(\phi, z)$ имеет вид

$$\int_0^{2\pi} u_{zz} d\phi = 0, \quad (8)$$

что приводит к равенствам

$$b = 0; \quad c = 0; \quad f(\varphi, z) = \Phi_\varphi(\varphi, z), \quad (9)$$

т. е. уравнение (7) можно записать в виде

$$u_{\varphi\varphi} + u_{zz} + au_\varphi = \Phi_\varphi(\varphi, z), \quad (10)$$

где постоянная a и периодическая функция $\Phi_\varphi(\varphi, z)$ — произвольны.

Таким образом, условие (3) определяет уравнение для $u(\varphi, z)$ неоднозначно. Для уточнения постоянной a и периодической функции $\Phi_\varphi(\varphi, z)$ необходимо обратиться к дополнительным свойствам уравнения Рейнольдса (2). Согласно доказательствам, приведенным в [7], уравнение (10) должно иметь вид

$$\begin{aligned} u_{\varphi\varphi} + u_{zz} + (\alpha kk_1 + \beta)u_\varphi = \\ = (kk_1 + \gamma)\Psi_\varphi(\varphi, z). \end{aligned} \quad (11)$$

Для определения $\alpha, \beta, \gamma, \Psi(\varphi, z)$ рассмотрим следующие свойства уравнения Рейнольдса (2):

1. При $k \rightarrow \infty$ уравнение (2) имеет вполне определенное асимптотическое решение $p = p_\infty(\varphi, z)$ в случае, когда $\alpha \rightarrow 0$, или, что то же, $k_1 \rightarrow 0$. Произведение kk_1 в этом случае — величина неопределенная, обозначим ее C_1 . Интегрируя в этом случае уравнение неразрывности по толщине слоя, приходим к уравнению для давления вида

$$\begin{aligned} [p_\infty]_{\varphi\varphi} = C \cos(\varphi); \\ p_\infty(\varphi) = C_1 \cos(\varphi) + C_\varphi + C_2. \end{aligned} \quad (12)$$

Так как при $\varphi \rightarrow \infty$ значение p должно оставаться ограниченным, то $C = 0$. При этом должно выполняться условие непрерывности интеграла

$\int_0^{2\pi} [(p_\infty)_z \delta^3]_z d\varphi = 0$, что справедливо при любых C_1 и C_2 . Подставив найденное значение p_∞ в выражение (6), получим u_∞ . Полагая k_1 величиной малой, пренебрегаем членами с k_1^3 и k_1^2 . В результате получим:

$$\begin{aligned} u_\infty = & \left(6C_2k_1 \cos(\varphi) + \frac{1}{2z_0} - \frac{3}{2}k_1 \cos(\varphi) + \right. \\ & + 6C_1k_1 \cos^2(\varphi) - \frac{3}{2}k_1p_1 \cos(\varphi) - \frac{p_1}{2z_0} \Big) z + C_1 \cos(\varphi) - \\ & - \frac{1}{2} - 3C_1k_1z_0 \cos^2(\varphi) - 3C_2k_1z_0 \cos(\varphi) - \\ & - \frac{3}{2}k_1z_0p_1 \cos(\varphi) + C_2 - \frac{p_1}{2} + \frac{3}{2}z_0 \cos(\varphi). \end{aligned} \quad (13)$$

Одновременно должны выполняться соотношения $\int_0^{2\pi} u_{zz} d\varphi = 0$ и $\int_0^{2\pi} u d\varphi = 0$.

Для непрерывности второго интеграла при $k \rightarrow \infty$ должно также выполняться соотношение $\int_0^{2\pi} u_\infty d\varphi = 0$. После интегрирования выражения (13) приравниваем к нулю коэффициент при z и свободный член, в результате получаем

$$C_1 = \frac{p_1 - 1}{6k_1z_0}; \quad C_2 = \frac{3p_1 + 1}{4}. \quad (14)$$

Таким образом, определенному значению p_∞ соответствует при $k \rightarrow \infty$ функция u_∞ , которую представим в виде

$$u_\infty = (a_1z + b_1) \cos(\varphi) + (a_2z + b_2) \cos(2\varphi), \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{где } a_1 = 3p_1k_1, \quad b_1 = \frac{(p_1 - 1)}{6k_1z_0} + k_1z_0 \frac{(3 - 15p_1)}{4}, \\ a_2 = \frac{(p_1 - 1)}{2z_0}, \quad b_2 = \frac{(1 - p_1)}{4}. \end{aligned}$$

2. При $k \rightarrow 0$ уравнение (2) с граничными условиями $p(-z_0) = 1$; $p(z_0) = p_1$ имеет единственное непрерывное решение $p = \frac{(p_1 - 1)}{2z_0}z + \frac{(p_1 + 1)}{2}$. При этом u имеет единственное решение $u = 0$.

3. При $\delta = \text{const} = 1, k = 0$ уравнения (2) и (11) переходят в уравнения Лапласа

$$\Delta p = 0; \quad \Delta u = 0.$$

4. При $\delta = \text{const} = 1, k \neq 0$ уравнение для p такое же, как и в случае 2, а u тождественно равняется нулю.

Основываясь на этих свойствах и соответствии формул для u и p , полученных в данной работе и работе [7], запишем окончательное уравнение для функции u в виде

$$u_{\varphi\varphi} + u_{zz} - kk_1u_\varphi = -kk_1u_{\infty\varphi}, \quad (16)$$

где u_∞ определяется формулой (15). Таким образом, (16) примет вид

$$\begin{aligned} u_{\varphi\varphi} + u_{zz} - kk_1u_\varphi = & -kk_1[(a_1z + b_1) \sin(\varphi) + \\ & + 2kk_1(a_2z + b_2) \sin(2\varphi)]. \end{aligned} \quad (17)$$

Решение (17)

$$\begin{aligned} u = & B_1(z) \cos(\varphi) + C_1(z) \sin(\varphi) + B_2(z) \cos(2\varphi) + \\ & + C_2(z) \sin(2\varphi). \end{aligned} \quad (18)$$

Подставляя (18) в (16) и приравнивая коэффициенты при соответствующих синусах и косинусах, получим системы дифференциальных уравнений для определения $B_1(z)$, $B_2(z)$, $C_1(z)$ и $C_2(z)$:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial z^2} B_1(z) - B_1(z) - k_2 C_1(z) = 0; \\ \frac{\partial^2}{\partial z^2} C_1(z) - C_1(z) + k_2 B_1(z) = k_2(a_1 z + b_1); \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial z^2} B_2(z) - 4B_2(z) - 2k_2 C_2(z) = 0; \\ \frac{\partial^2}{\partial z^2} C_2(z) - 4C_2(z) + 2k_2 B_2(z) = 2k_2(a_2 z - b_2). \end{cases} \quad (20)$$

Решения уравнений записываются в виде

$$B_1(z) = e^{\beta_1 z} \sin\left(\frac{k_2 z}{2}\right) K_1 + e^{\beta_1 z} \cos\left(\frac{k_2 z}{2}\right) K_2 + e^{-\beta_1 z} \sin\left(\frac{k_2 z}{2}\right) K_3 + e^{-\beta_1 z} \cos\left(\frac{k_2 z}{2}\right) K_4 + \frac{k_2^2(a_1 z + b_1)}{1 + k_2^2}; \quad (21)$$

$$C_1(z) = e^{\beta_1 z} \left(\gamma_1 \sin\left(\frac{k_2 z}{2}\right) + \beta_1 \cos\left(\frac{k_2 z}{2}\right) \right) K_1 + e^{\beta_1 z} \left(\gamma_1 \cos\left(\frac{k_2 z}{2}\right) - \beta_1 \sin\left(\frac{k_2 z}{2}\right) \right) K_2 + e^{-\beta_1 z} \left(\gamma_1 \sin\left(\frac{k_2 z}{2}\right) - \beta_1 \cos\left(\frac{k_2 z}{2}\right) \right) K_3 + e^{-\beta_1 z} \left(\gamma_1 \cos\left(\frac{k_2 z}{2}\right) + \beta_1 \sin\left(\frac{k_2 z}{2}\right) \right) K_4 - \frac{k_2(a_1 z + b_1)}{1 + k_2^2}, \quad (22)$$

$$\text{где } \beta_1 = 1 + \frac{k_2^2}{8}; \quad \gamma_1 = \frac{\beta_1^2}{k_2} - \frac{1}{k_2} - \frac{k_2}{4};$$

$$B_2(z) = e^{\beta_2 z} \sin\left(\frac{k_2 z}{2}\right) K_5 + e^{\beta_2 z} \cos\left(\frac{k_2 z}{2}\right) K_6 + e^{-\beta_2 z} \sin\left(\frac{k_2 z}{2}\right) K_7 + e^{-\beta_2 z} \cos\left(\frac{k_2 z}{2}\right) K_8 + \frac{k_2^2(a_2 z + b_2)}{4 + k_2^2}; \quad (23)$$

$$C_2(z) = e^{\beta_2 z} \left(\gamma_2 \sin\left(\frac{k_2 z}{2}\right) + \frac{1}{2} \beta_2 \cos\left(\frac{k_2 z}{2}\right) \right) K_5 + e^{\beta_2 z} \left(\gamma_2 \cos\left(\frac{k_2 z}{2}\right) - \frac{1}{2} \beta_2 \sin\left(\frac{k_2 z}{2}\right) \right) K_6 + e^{-\beta_2 z} \left(\gamma_2 \sin\left(\frac{k_2 z}{2}\right) - \frac{1}{2} \beta_2 \cos\left(\frac{k_2 z}{2}\right) \right) K_7 + e^{-\beta_2 z} \left(\gamma_2 \cos\left(\frac{k_2 z}{2}\right) + \frac{1}{2} \beta_2 \sin\left(\frac{k_2 z}{2}\right) \right) K_8 - 2 \frac{k_2(a_2 z + b_2)}{4 + k_2^2}, \quad (24)$$

$$\text{где } \beta_2 = 2 + \frac{k_2^2}{16}; \quad \gamma_2 = \frac{\beta_2^2}{2k_2} - \frac{2}{k_2} - \frac{k_2}{8};$$

k_i ($i = 1, \dots, 8$) — константы интегрирования, определяемые из условий

$$B_1(-z_0) = B_2(-z_0) = B_1(z_0) = B_2(z_0) = C_1(-z_0) = C_2(-z_0) = C_1(z_0) = C_2(z_0) = 0;$$

Проинтегрируем выражение $u_{zz} = (\delta^3 p_z)_z$, используя полученные выражения для функции u :

$$p_z = \frac{u_z}{\delta^3} - \frac{T_1(\phi)}{\delta^3}.$$

Заменим выражение $\frac{1}{\delta^3}$ с точностью до k_1^2 :

$$\frac{1}{\delta^3} = 1 - 3k_1 z \cos(\phi) = h_1(z, \phi), \quad (25)$$

тогда

$$p = u h_1 + 3k_1 \cos(\phi) \int u dz + T_1(\phi) z \left(1 - \frac{3}{2} z k_1 \cos(\phi) \right) + T_2(\phi) \quad (26)$$

или

$$p = h_1 \sum_{k=1}^2 (B_k \cos(k\phi) + C_k \sin(k\phi)) + \\ + 3k_1 \cos(\phi) \int \sum_{k=1}^2 (B_k \cos(k\phi) + C_k \sin(k\phi)) dz + \\ + T_1(\phi) z h_2 + T_2(\phi), \quad (27)$$

$$\text{где } h_2 = \left(1 - \frac{3}{2} z k_1 \cos(\phi) \right).$$

Подставляя граничные условия $p(-z_0) = 1$; $p(z_0) = p_1$, получим: $T_1(\phi)$, $T_2(\phi)$.

Для примера рассмотрим распределение поля давления в зазоре при разных ϕ (рис. 3), принимая параметры потока вязкой жидкости, трубы и микрокапсулы порядка 0,05 мм. На графиках видно, что увеличение угла наклона, т. е. увеличение перекоса микрокапсулы по отношению к оси трубы влечет за собой увеличение значения относительного давления как в зоне отрицательных давлений, так и в зоне избыточного давления.

Поворот микрокапсулы с ненулевым начальным эксцентриситетом

Как было отмечено в работе [6], при эксцентричном расположении микрокапсулы в трубке

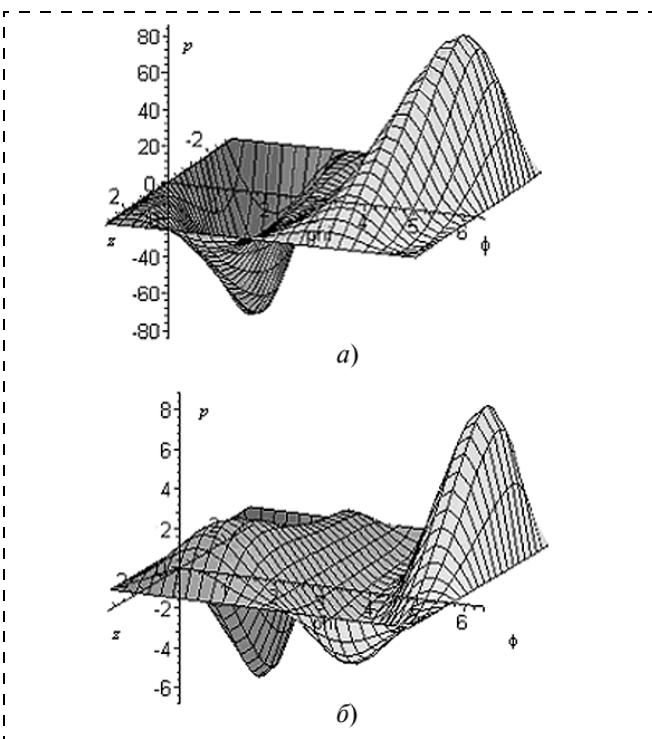


Рис. 3. Поле относительного давления (по отношению к давлению $p_0 = 30$ мм рт. ст.) в зазоре без начального эксцентриситета:
а — при $\alpha = 0,5^\circ$; б — при $\alpha = 0,2^\circ$

возникает момент относительно оси Oy , обусловленный силами вязкого трения.

Уравнение для давления в слое в безразмерных величинах имеет вид (2). Для решения данной задачи при условии наличия ненулевого начального эксцентриситета микрокапсулы относительно оси трубы, так же используется метод эквивалентного уравнения, т. е. строится линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами, решение которого при определенных условиях стремится к точному решению уравнения (2). В отличие от вышерассмотренного случая с нулевым начальным эксцентриситетом функция зазора имеет вид

$$\delta = d\delta^* = d \left(1 + \left(e_0 + \frac{\alpha R_0}{d} z^* \right) \cos(\phi) \right), \quad (28)$$

где e_0 — начальный эксцентриситет. В такой постановке задача решается в той же последовательности, что и задача с нулевым начальным эксцентриситетом. Следует отметить, что относительный эксцентриситет $e_0^* = \frac{e_0}{d}$ принимается величиной первого порядка малости и при выводе функции u_∞ согласно (13) пренебрегаем не только членами с k_1^2 и более высокого порядка малости, но и членами порядка малости e_0^2 и выше. Таким образом, функция u_∞ имеет вид

$$u_\infty = \left[6k_1(C_2 + C_1 \cos(\phi)) \cos(\phi) - \right. \\ \left. - \frac{3k_1 z_0 - 1}{2z_0} (p_1 - 1) + \frac{3e_0}{2z_0} (p_1 + 1) \right] z - \\ - \frac{p_1 + 1}{2} (1 + 3e_0 \cos(\phi)) - \frac{3}{2} z_0 k_1 \cos(\phi) (p_1 - 1) + \\ + (1 - 3z_0 k_1 \cos(\phi))(C_2 + C_1 \cos(\phi)) + \\ + 3C_2 e_0 \cos(\phi). \quad (29)$$

Для данной функции также должно выполняться условие

$$\int_0^{2\pi} u_\infty d\phi = 0, \quad (30)$$

из которого находим значения констант C_1 и C_2 . После интегрирования получаем

$$C_1 = \frac{p_1 - 1}{6z_0 k_1}; \quad (31)$$

$$C_2 = \frac{p_1 + 1}{4} - \frac{(p_1 - 1)e_0}{z_0 k_0}. \quad (32)$$

После подстановки (31), (32) в выражение (29) и группировки членов при $\cos(\phi)$ и при $\cos(2\phi)$ получаем функцию u_∞ в виде

$$u_\infty = A_1(z) \cos(\phi) + A_2(z) \cos(2\phi), \quad (33)$$

где

$$A_1(z) = a_1 z + b_1;$$

$$A_2(z) = a_2 z + b_2;$$

$$a_1 = \frac{3}{z_0} (k_1 - e_0(p_1 - 1));$$

$$a_2 = \frac{(p_1 - 1)}{2z_0}; \quad (34)$$

$$b_1 = \frac{(p_1 - 1)}{12z_0 k_1} (2 - 18z_0 k_1 e_0 - 9e_0^2) -$$

$$- \frac{3z_0 k_1}{4} (5p_1 - 1);$$

$$b_2 = (p_1 - 1) \frac{(e_0 - z_0 k_1)}{4z_0 k_1}.$$

Окончательно уравнение для $u(\phi, z)$ имеет вид (16), а его решение — соответственно вид (18). Константы интегрирования для (21)–(24) определяются аналогично случаю с нулевым первоначальным эксцентризитетом, а окончательное выражение для функции давления получаем из равенства

$$u_{zz} = (\delta^3 p_z)_z, \quad \text{откуда } p_z = \frac{u_z}{\delta^3} - \frac{T_1(\phi)}{\delta^3}.$$

Заменяя в данном выражении $\frac{1}{\delta^3}$ с точностью

до k_1^2 :

$$\frac{1}{\delta^3} = 1 - 3(e_0 + k_1 z) \cos(\phi),$$

получаем

$$p = u(1 - 3(e_0 + z k_1) \cos(\phi)) + 3k_1 \cos(\phi) \int u dz + \\ + T_1(\phi) z \left(1 - 3 \left(e_0 + \frac{z k_1}{2} \right) \cos(\phi) \right) + T_2(\phi). \quad (35)$$

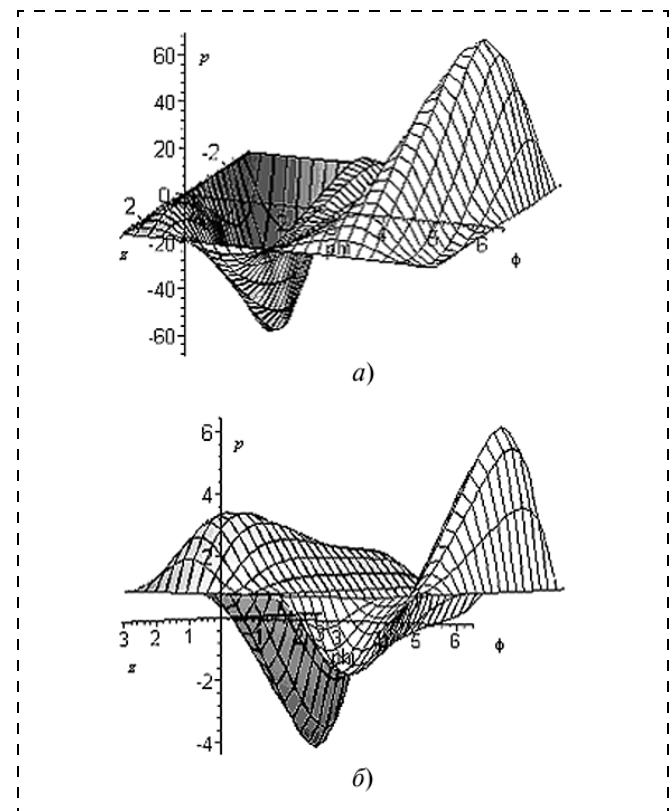


Рис. 4. Поле относительного давления (по отношению к давлению $p_0 = 30$ мм рт. ст.) в зазоре с ненулевым начальным эксцентризитетом:

a — при $\alpha = 0,5^\circ$; δ — при $\alpha = 0,2^\circ$

Вводя обозначение

$$h_1 = 1 - 3(e_0 + k_1 z) \cos(\phi),$$

$$h_2 = \left(1 - 3 \left(e_0 + \frac{z k_1}{2} \right) \cos(\phi) \right),$$

для функции давления $p(\phi, z)$ получаем выражение, аналогичное (27), с теми же граничными условиями для определения неизвестных функций $T_1(\phi)$ и $T_2(\phi)$.

Распределение давления в слое при ненулевом первоначальном эксцентризите при разных углах ϕ и разных углах поворота относительно оси Oy показано на рис. 4. Параметры капсулы, трубы и потока приняты такими же, как и в случае нулевого начального эксцентризита. Значение относительного начального эксцентризита $e_0^* = \frac{e_0}{d} = 0,05$.

Заключение

По сравнению со случаем нулевого начального эксцентризита функция давления при тех же прочих параметрах имеет более высокий минимум

и более низкий максимум, т. е. давление в разряженной области повышается, а в области избыточного давления понижается. При увеличении первоначального эксцентрикситета эта тенденция сохраняется. Зависимость от степени поворота микрокапсулы относительно центра масс сохраняется: чем больше угол поворота, тем ниже давление в зонах разряжения и выше в зонах с избыточным давлением. Полученные результаты являются базой для определения динамических характеристик движения микрокапсулы по трубкам малого диаметра, а также необходимы для исследования на устойчивость.

Работа выполнялась в рамках целевой научно-технической программы Минпромнауки РФ "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники" на 2002–2006 гг., блок "Ориентированные фундаментальные исследования", раздел "Фундаментальные исследования в области физических наук (Механика)", тема "Закономерности движения объектов в микромеханике".

Список литературы

1. Пospelov B. I., Voinov B. B. Перспективы применения микроробототехнических систем // Микросистемная техника. 2003. № 5. С. 34–38.
2. Пospelov B. I. Универсальные микроробототехнические системы для внутриканального применения // Доклад на 11-й научно-технической конференции "Экстремальная робототехника". Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. 2000. С. 148–152.
3. Лойцинский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. 736 с.
4. Градецкий В. Г., Вешников В. Б., Калинченко С. В., Кравчук Л. Н. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. М.: Наука, 2001. 359 с.
5. Jones R. T. Blood flow // Annual review of Fluid Mechanics. 1969. V. 1. P. 223–243.
6. Космодемьянская Г. Н., Сорокина С. И. Упрощенные модели движения микрокапсулы в трубках малого диаметра // Микросистемная техника. 2004. № 7. С. 36–41.
7. Котляр Я. М. Решение задачи теории газовой смазки методом эквивалентного уравнения // Сб. докл. на совещании по газовой смазке подшипников. 12–14 февраля 1968 г. М.: Институт Машиноведения, 1968. С. 265–272.
8. Котляр Я. М. Асимптотические решения уравнения Рейнольдса // Механика жидкости и газа. Изд. АН СССР. 1967. № 1. С. 161–165.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

УДК 621.3

В. В. Старков, канд. техн. наук,
Институт проблем технологий микроэлектроники
и особочистых материалов РАН, г. Черноголовка,
Московская область

СТРУКТУРИРОВАНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОКИСЛЕННОГО МАКРОПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

На примере изготовления матрицы полых SiO_2 -штырей и кремниевых электродов микротопливных элементов предложена технология микроструктурирования с применением окисленного макропористого кремния.*

Введение

Микроструктурирование с использованием макропористого кремния основано на процессах глубокого анодного травления (ГАТ), достаточно

подробно описанных ранее, например, в работах [1–3]. С помощью этих технологий были созданы матрицы параболических рентгеновских линз [4], фотоннокристаллические структуры [5, 6].

Впервые полное окисление макропористой матрицы кремния предложено для создания фотоннокристаллической структуры обращенного опала [6, 7]. Однако значительная толщина стенок кремниевой матрицы (около 5 мкм) не позволила успешно реализовать поставленную задачу из-за значительного коробления пластин в результате разбухания матрицы при ее полном окислении. Окисляемый объем увеличивается примерно в 2,2 раза по сравнению с исходным объемом кремния (так называемый "swelling"-эффект). В результате в области расположения пористой структуры на пластине возникают напряжения, которые могут привести даже к разрушению пластины. В рассматриваемой работе предлагается частичное окисление макропористой матрицы. При этом критерием возможной степени окисления являлась такая толщина слоя окисла, при которой возникающие механические напряжения в месте расположения пористой структуры не приводили к короблению

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 04-02-16155.

кремниевой пластины и не препятствовали осуществлению двухсторонней фотолитографии.

Экспериментальная часть

В эксперименте использовались пластины кремния *p*-типа проводимости с ориентацией поверхности (100) и удельным сопротивлением 80...100 Ом · см. Глубокое анодное травление проводилось по методике, изложенной в работе [1]. На рис. 1 схематически представлена последовательность проведения технологических операций. На поверхности кремния искусственно формировались нуклеационные центры, представляющие собой топологический рисунок своеобразных "затравок", в которых последующим процессом ГАТ создавались пористые структуры (рис. 1, *a*, *b*). Затравки в виде инверсных пирамид создавались методами стандартной фотолитографии и щелочного травления. Формирование окисного покрытия на поверхности кремния осуществлялось термическим окислением при температуре 1128 °С в режиме подачи кислорода по схеме "сухой—влажный—сухой" (15:180:15) мин соответственно. Полученная толщина слоя SiO_2 составляла 1,2 мкм. На рис. 1, *c* этот процесс продемонстрирован увеличенной толщиной линий на поверхности образца.

Следующая операция представляет собой стандартный процесс фотолитографии с обратной стороны пластины, целью которого является вскрытие окон в маске SiO_2 под областями расположения пор. Кроме необходимости двухстороннего совмещения топологических рисунков с лицевой и тыльной стороной пластины, существенной особенностью рассматриваемого процесса является необходимость учета отмеченного выше "swelling"-эффекта. Это приводит к необходимости применения проекционной литографии, или фотолитографии с "зазором", значение которого зависит от степени разбухания пластины в области пористого слоя в результате окисления.

Для формирования газовых каналов в электродных структурах микротопливных элементов осуществлялось травление образцов через окисную маску в щелочном растворе $\text{KOH} : \text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2 = (80 \text{ г} : \text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2)$ при температуре 80...85 °С. В результате селективного щелочного травления сквозь маску окисла кремния предполагалось получить структуры, схематически показанные на рис. 1, *d*. Последующее удаление окисного слоя в растворах плавиковой кислоты приводит к формированию структуры, изображенной на рис. 1, *e*.

Обсуждение результатов

Для формирования электродов топливных элементов на основе пористого кремния необходимо

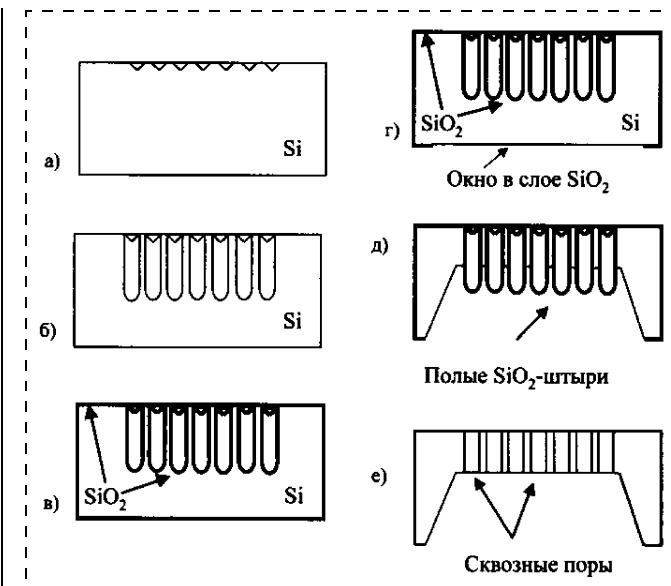


Рис. 1. Схематическая последовательность проведения технологических операций

создание структур, поперечное сечение которых схематически представлено на рис. 1, *e*. Все возможные варианты таких структур описаны в работе [8]. Для селективного травления авторы используют многократное нанесение сложной маски на основе нитрида кремния (Si_3N_4), гексаметилдилазана и фоторезиста. В представленной нами схеме (см. рис. 1) для формирования селективных областей использована маска на основе окисла кремния и фоторезиста.

На рис. 2 показано РЭМ изображение кремниевой пористой структуры, полученной в результате селективного травления в щелочи. Изображение соответствует этапу, изображенному на схеме рис. 1, *d* в случае, когда фронт селективного щелочного травления не достиг пористого слоя. Как следует из рис. 2, *b*, профиль основания пор по форме близок к параболическому. При скорости щелочного травления в рассматриваемом режиме порядка 1,75 мкм/мин, дальнейшее увеличение времени процесса приводит к формированию структуры, изображенной на рис. 3 (см. вторую сторону обложки).

Пленка термического окисла достаточно устойчива и практически не подвергается травлению в щелочном растворе за время проведения процесса. Поэтому при травлении на глубину, достигающую или глубже фронта расположения макропор, окисленная поверхность макропор проявляется в виде неких полых штырей, толщина стенок которых практически совпадает с толщиной маскирующего окисла. На рис. 3, *a* показано РЭМ изображение таких штырей (вид сбоку). Ближний ряд штырей разрушен при формировании скола пластин. На сколах видна толщина стенок штырей и расстоя-

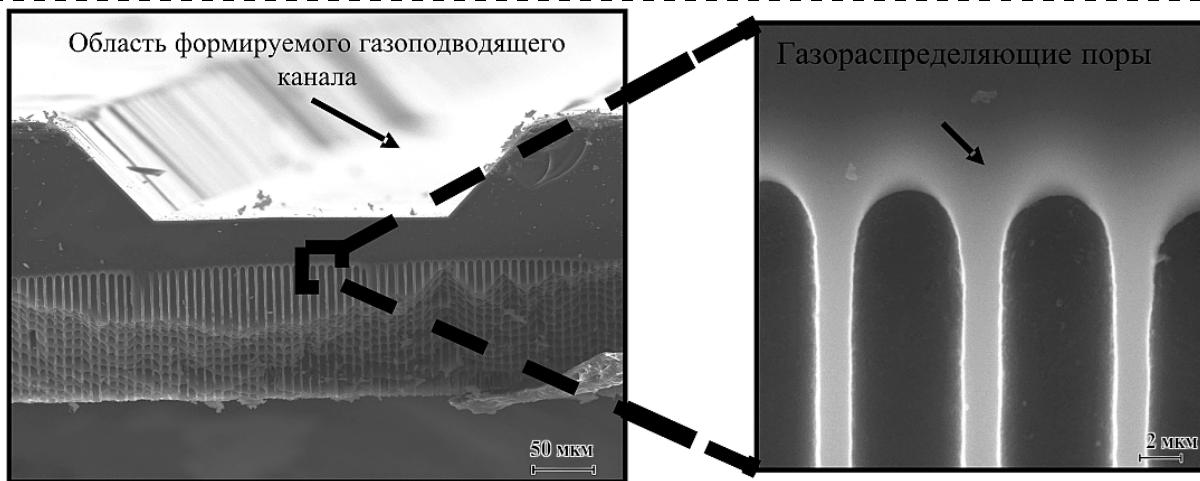


Рис. 2. РЭМ изображение кремниевой пористой структуры, полученной в результате селективного щелочного травления с обратной стороны пластины. Изображение соответствует этапу, изображенному на рис. 1, д в случае, когда фронт щелочного травления не достиг пористого слоя

ние между ними, которые составляют порядка одного микрометра. Штыри расположены строго периодически в соответствии с топологической структурой использованного фотошаблона. Высота штырей может изменяться в зависимости от времени травления и в рассматриваемом случае составляет 27 мкм. В своем основании штыри представляют собой прямоугольное сечение (рис. 3, б), соответствующее форме и размерам основания обратных пирамид (см. рис. 1, а).

Практическое применение сформированных по рассмотренной технологии структур является дискуссионным. Однако возможности рассмотренной технологии таковы, что позволяют утверждать, что подобные структуры с успехом могут использоваться в различных оптоэлектронных устройствах. Так, при уменьшении, например, исходного размера основания затравочных пирамид до 1 мкм (на рис. 3, а этот размер составляет 4,3 мкм), по рассмотренной схеме возможно создавать периодические структуры фотонных кристаллов для ИК диапазона длин волн.

Параболический характер "верхушки" штырей позволяет применять полученную структуру в качестве матрицы линз для фокусировки рентгеновского излучения [4]. При этом эффективность таких линз следует ожидать более высокой, поскольку преломляющая стенка линзы более тонкая и однородная по толщине по сравнению с образцами, описанными в работе [4].

Другой многообещающей областью применения рассмотренной технологической схемы может стать создание микротопливных элементов на основе макропористого кремния [8]. Для формирования электродной структуры микротопливного элемента (рис. 4) широкий канал, формируемый се-

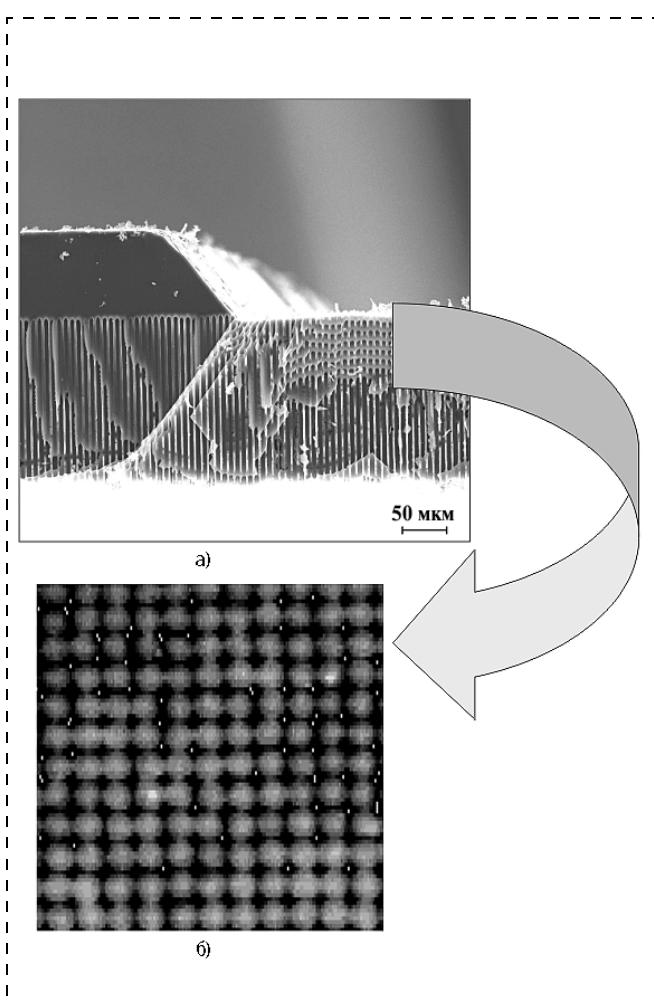


Рис. 4. Фрагмент участка электрода топливного элемента, состоящего из газоподводящего канала и газораспределительных пор. Изображение соответствует этапу, изображенному на рис. 1, е:

а — вид канала на поперечном сколе; б — газораспределительные каналы пор (вид сверху "на просвет"); диаметр отверстий — 4,6 мкм, период — 7 мкм

лективным щелочным травлением, должен быть соединен с газораспределяющими микроканалами, сформированными в процессе ГАТ. Штыри из SiO_2 являются препятствием для проникновения газов из широкого канала в микропоры. Удаление SiO_2 в растворах плавиковой кислоты устраниет разделяющую стенку и микроканалы как бы подключаются напрямую к газоподводящему каналу. Такая конструкция электрода микротопливного элемента предполагает применение в качестве топлива очищенного водорода. Если вместо газоразделяющей стенки SiO_2 сформировать газосепарирующую мембрану, например, на основе палладия и его сплавов, то в качестве топлива могут использоваться не только очищенный водород, но и различные углеводородные смеси (например, на основе метана). Палладиевая мембрана при этом обеспечит попадание в газораспределяющие каналы пор только чистого водорода, обеспечивая тем самым необходимую надежность работы топливного элемента.

Конструкция такого электрода предполагает нанесение методами вакуумного осаждения на поверхность сформированной штыревой SiO_2 структуры пленки палладия. Толщина такой пленки может составлять от долей до нескольких микрометров. Основным критерием выбора толщины пленки является условие сплошности этой пленки при возможно меньшей толщине, поскольку меньшая толщина пленки обеспечивает сравнительно более высокую производительность таких мембран. Задача существенно упрощается с уменьшением высоты штырей, которая может составлять от нескольких долей микрометра до единиц микрометров. После формирования пленки Pd осуществляется удаление SiO_2 в растворах плавиковой кислоты. Это приводит к формированию структуры, у которой газоподводящий канал отделен от газораспределяющих каналов пор тонкой проницаемой исключительно для водорода мембраной. На рис. 5 (см. вторую сторону обложки) показан фрагмент поверхности газоподводящего канала. Хорошо заметные выступы округленной формы

представляют собой пленку, состоящую из сплава 80 % палладия и 20 % серебра и осажденную на дно газоподводящего канала методом магнетронного напыления.

Выводы

Предложена технология микроструктурирования, основанная на использовании макропористого кремния, а также селективности процессов травления кремния и его окисла. Продемонстрирована возможность применения этой технологии при создании фотонных кристаллов и других оптических устройств, характеризующихся периодичностью элементов. Показана возможность изготовления электродов микротопливных элементов по предложенной технологической схеме. В сочетании с газосепарирующей палладиевой мембраной в едином технологическом процессе созданы композиционные электроды микротопливных элементов.

Список литературы

1. Старков В. В., Цейтлин В. М., Конли И., Престинг Х., Кениг У., Вяткин А. Ф. Упорядоченное формирование макропор в кремни *p*-типа // Микросистемная техника. 2001. № 8. С. 34–38.
2. Старков В. В., Старостина Е. А., Конли И., Престинг Х., Кениг У., Вяткин А. Ф. Неупорядоченное формирование макропор в кремни *p*-типа // Микросистемная техника. 2001. № 7. С. 35–39.
3. Старков В. В., Конли И., Престинг Х., Кениг У., Вяткин А. Ф., Цейтлин В. М. Пористые кремниевые фольги // Микросистемная техника. 2002. № 2. С. 34–38.
4. Аристов В. В., Шабельников Л. Г., Старков В. В., Цейтлин В. М., Кузнецов С. М., Григорьев М. В., Снигирев А., Снигирева И., Рай К. Матрицы короткофокусных параболических линз для жесткого рентгеновского излучения // Микросистемная техника. 2001. № 8. С. 39–42.
5. Starkov V. V. Photonic-Crystal Structures Based on Silicon Planar Technology // Laser Physics. 2004. Vol. 14. No 5. P. 664–668.
6. Старков В. В., Аристов В. В., Желтиков А. М., Магницкий С. А., Тарасишин А. В. Создание фотонных кристаллов методами глубокого анодного травления // Микросистемная техника. 2001. № 9. С. 37–40.
7. Aristov V. V. Magnitskii S. A., Starkov V. V., Tarasishin A. V., Zheltikov A. M. Macropores in Silicon: Toward Three-Dimensional Photonic Band-Gap Structures // Laser Physics. 2000. Vol. 10. No 4. P. 946–951.
8. Ohlsen L. J. et al. U. S. Patent, US 6,641,948 B1.

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

УДК 621.315

А. В. Ландышев, канд. техн. наук,
А. А. Лаврентьев, д-р физ.-мат наук,
В. А. Ландышев,
Донской государственный технический
университет

ЭЛЕКТРОННО-ЗОНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОМОДУЛЬНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БЛОКОВ

Проведены электронно-зондовые исследования химического взаимодействия на контактах микромодульных термоэлектрических блоков на основе сплавов состава $Bi_2Se_{0,3}Te_{2,7}$ и $Bi_{0,48}Sb_{1,52}Te_3$. Определены продукты взаимодействия и температурно-временные зависимости их роста. Показано, что их образование приводит к появлению трещин на контактах и росту внутреннего электрического сопротивления блока. На основе полученных данных делается прогноз его долговечности и надежности.

Микромодульные термоэлектрические блоки используются в качестве преобразователей теплоты в электричество в термоэлектрогенераторах микро—милливаттного диапазона мощности, а также в качестве датчиков тепловых потоков. Одним из авторов данной работы был разработан универсальный, микромодульный термоэлектрический блок для температур 60...100 °C по горячему спаю на основе сплавов $Bi_2Se_{0,3}Te_{2,7}$, $Bi_{0,48}Sb_{1,52}Te_3$, который может использоваться в различных типах генераторов электроэнергии. Он представляет собой набор ветвей p - и n -типов проводимости сечением $0,25 \times 0,25 \text{ mm}^2$, скоммутированных в термопары пленочными перемычками висмута толщиной 20...30 мкм, которые наносились на боковые поверхности ветвей термовакуумным способом. В качестве дистанционирующих и изоляционных прокладок между ветвями использовалась бумага, пропитанная kleem BK-9. Испытания серии микромодульных блоков, проведенные при температуре горячего спая 70 °C в течение 3000...3500 ч, не обнаружили заметных изменений их внутреннего сопротивления и ЭДС. Тем не менее, необходимо было выяснить возможный механизм отказа микромодульных блоков.

Как показывают исследования [1, 2], висмут при контакте с термоэлектрическими сплавами

вступает с ними во взаимодействие с образованием теллуридов висмута и сурьмы, отличающихся своими электрофизическими свойствами от основного материала. При этом, как отмечается авторами, кинетика роста диффузационной зоны в ряде случаев зависит от технологии предварительной обработки поверхности термоэлектрических сплавов, что вероятно связано с насыщением поверхности углеродом [3]. В работах приводятся химический состав и термоЭДС, образующиеся на контактах фаз, и температурные зависимости коэффициентов диффузии. Эти данные указывают на то, что твердофазное взаимодействие может влиять на выходные характеристики микромодульного блока, что, в частности, рассматривалось в работе [4]. Для случая коммутации ветвей по боковым поверхностям очевидно, что образование продуктов реакций, отличающихся своим коэффициентом термоЭДС, не должно оказывать заметного воздействия на ЭДС микромодульного блока, в то же время оно должно сказываться на его электрическом сопротивлении. В связи с изложенными данными представляло практический интерес изучить особенности химического взаимодействия на контактах термоэлектрических микромодульных блоков и попытаться оценить его влияние на электрическое сопротивление с целью обоснования температурно-временных диапазонов эксплуатации.

Исследования проводились с использованием электронно-зондовых методов (локального рентгеноспектрального анализа и растровой электронной микроскопии) на рентгеновском микроанализаторе МАР-3 и растровом электронном микроскопе BS-300. Количественный анализ проводился по ZAF-методике [5]. В качестве образцов использовались отдельные микромодульные блоки, а также их фрагменты в виде отдельных термопар. Образцы отжигались в среде аргона при температуре 180, 200, 230, 250 °C в течение 10...1000 ч. Измерение распределения компонентов в зоне контакта и изучение микроструктуры контакта проводили на шлифах, плоскость которых была перпендикулярна плоскости контакта. Исследуемые поверхности наблюдали во вторичных электронах, при этом в отдельных случаях для выявления нарушения целостности контактов применялся режим вольтового контраста [5].

Как показали исследования, при нагревании происходит взаимная диффузия между висмутом и термоэлектрическими сплавами. При этом в сплавах на контактах растут реакционные зоны, содержание компонентов в которых по данным количе-

ственного анализа следующее: для *p*-ветви — Bi = 64 %, Sb = 16 %, Te = 20 %, а для *n*-ветви — Bi = 80 %, Te = 20 %. Этим составам соответствуют формулы (Bi_xSb_{1-x})_{2,7}Te при *x* = 0,66...0,74, Bi_xTe при *x* = 3...2, что согласуется с данными работ [1, 2]. На рис. 1, *a*, *b* представлена схема сканирования электронным лучом торцевой поверхности микромодульного блока и кривые интенсивности рентгеновского излучения TeL_{α1}, SbL_{α1}, BiL_{α1}, при сканировании электронного зонда в направлении перпендикулярном плоскости контакта образцов, прошедших отжиг при температуре 200 °C в течение 20 ч. С увеличением времени ширина реакционных зон увеличивалась, а толщина перемычек висмута уменьшалась. С ростом температуры растет скорость диффузии и соответственно скорость накопления продуктов взаимодействия. Значения ширины реакционной зоны, определенные по изображениям контакта во вторичных электронах и по кривым рентгеновского излучения, совпадали. Поэтому измерения проводили по микроскопическим изображениям, так как результат в этом случае получается более надежный.

Наиболее характерные результаты измерения ширины *x* реакционной зоны, формирующейся на контактах в микромодульном блоке на ветвях *p*- и *n*-типов для температур 180, 200, 230, 250 °C приведены в таблице.

Приведенные значения получены усреднением 10 измеренных величин. Там же содержатся расчет-

Ширина реакционной зоны *x* (мкм)
в зависимости от времени и температуры отжига

<i>T</i> , °C	<i>t</i> , ч	<i>n</i> -ветвь		<i>p</i> -ветвь	
		<i>x</i>	<i>x_p</i>	<i>x</i>	<i>x_p</i>
180	50	28	31	24	26
	100	46	45	33	36
	200	61	63	47	50
200	10	18	21	20	22
	20	32	29	33	31
	50	48	46	48	49
230	10	37	35	50	53
	20	48	49	—	—
250	10	50	48	—	—
	20	70	68	—	—

ные значения *x_p*, полученные с использованием температурных зависимостей коэффициентов диффузии между висмутом и сплавами Bi₂Se_{0,3}Te_{2,7}, Bi_{0,48}Sb_{1,52}Te₃ [1, 2]. Оценка ширины реакционной зоны проводилась по приближенной формуле $x^2 = 2Dt$. Из данных таблицы видно, что ширина зоны диффузии в микромодульных блоках согласуется с расчетными значениями и подчиняется параболическому закону, до кого-то предельного времени *t_{пр}*, что совпадает с выводами работы [6]. Если время термообработки превышало предельное, то дальнейшего химического взаимодействия с увеличением времени отжига не наблюдалось, что косвенно указывает на нарушение целостности контакта между сплавами и перемычкой. Это сопровождается полным истощением висмута, в результате чего контактная перемычка между ветвями превращается в сплошную реакционную зону, ширина которой на *n*-ветви достигает 40...50 мкм, на *p*-ветви — 80...90 мкм. Этот результат хорошо согласуется с химическим составом реакционных зон и исходной толщиной перемычки висмута.

На границе между реакционной зоной и сплавами наблюдается рост трещин. На рис. 2, *a* представлено инвертированное изображение во вторичных электронах микроструктуры контакта для ветви *n*-типа проводимости, на котором видна микротрещина (светлая полоса). Образец прошел термообработку при температуре 180 °C в течение 50 ч. Аналогичную микроструктуру наблюдали и на ветвях *p*-типа. При более длительных отжигах происходит слияние микротрещин и развитие сплошной трещины вдоль всего контакта.

Развитие трещин на контактах приводит к росту их электрического сопротивления. Это подтвер-

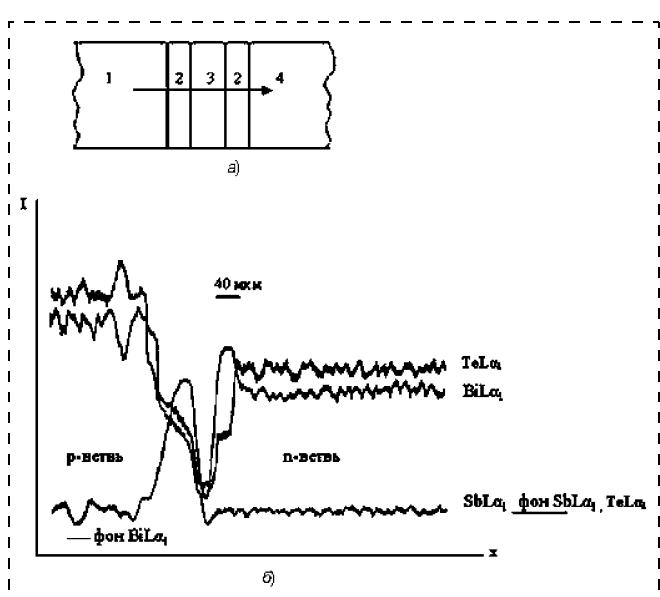


Рис. 1. Изменение интенсивности рентгеновского излучения при сканировании электронным зондом торцевых поверхностей в зоне контактов ветвей *p*- и *n*-типа после 20 ч отжига при температуре 200 °C:

a — схема сканирования; *b* — кривые интенсивности рентгеновского излучения SbL_{α1}, TeL_{α1}, BiL_{α1}

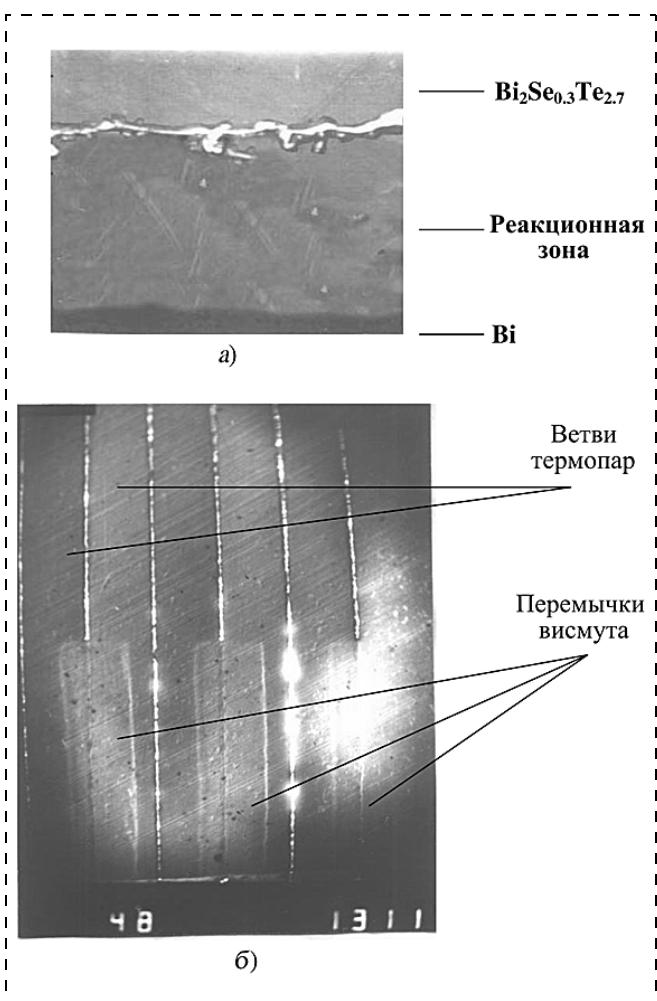


Рис. 2. Микроструктура контактных перемычек:

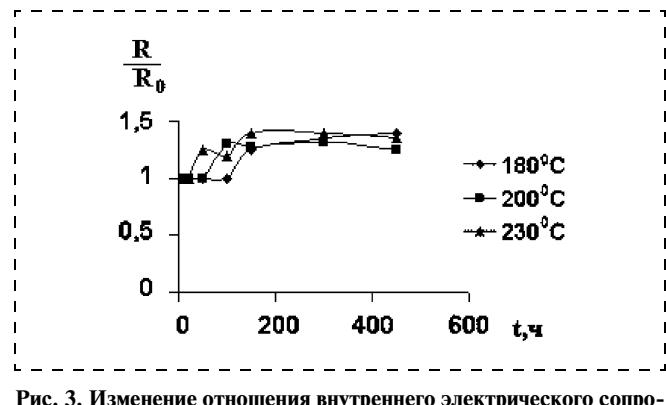
а — реакционная зона между висмутом и сплавом $\text{Bi}_2\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{2.7}$, увеличение 1250; *б* — изображение контактных перемычек и ветвей микромодульного блока после отжига при 180°C в течение 300 ч в режиме вольтового контраста, увеличение 48

ждается исследованием микроструктуры ветвей и коммутирующих перемычек в режиме вольтового контраста [5]. На ветви термопар, помещенных в камеру электронного микроскопа, через специально припаянные контакты подавали напряжение 20 В от источника с большим выходным электрическим сопротивлением. Этот источник обеспечивал ток через образец не более нескольких миллиампер, после чего наблюдали за поверхностью группы термопар во вторичных электронах. Было обнаружено, что при режимах термообработки, обеспечивающих полное истощение висмута, на электронных изображениях поверхностей ветвей и коммутационных перемычек появляются засвеченные участки, которые указывают на место, где происходит рост электрического сопротивления. В частности, на рис. 2, *б* видно, что засветка создается непосредственно перемычкой висмута.

Снижение проводимости контактов приводит к росту электрического сопротивления микромодульных блоков. Измерением их внутреннего сопротивления после отжига было установлено, что термообработка в течение времени, меньшего предельного $t_{\text{пр}}$, не приводит к заметному росту внутреннего электрического сопротивления термопар. Если время термообработки превышало $t_{\text{пр}}$, то электрическое сопротивление микромодульного блока увеличивалось, очевидно, за счет роста электрического сопротивления контактов (рис. 3). Так например, если исходное внутреннее сопротивление составляло $1,0\ldots1,2$ кОм, то после отжига в течение 200 ч при температуре 180°C наблюдается его рост до $1,4\ldots1,6$ кОм, а затем оно остается постоянным. Аналогичный ход наблюдается и для других температур. При этом сопротивление не возрастало до бесконечности, и полного электрического обрыва между ветвями не обнаружено, вероятно, в силу того, что сохранялись островки контактов между перемычкой и ветвями.

Для выявления влияния термического расширения дистанционирующих прокладок на микроструктуру перемычек висмута было проведено высокотемпературное электронно-микроскопическое исследование. Изучали изображения микроструктуры поверхности во вторичных электронах отдельных термопар, которые подвергались кратковременному нагреванию в течение нескольких минут с помощью микропечи в камере электронного микроскопа. Было установлено, что нагревание до температуры 230°C приводит к термическому расширению зазора между ветвями на $0,4\ldots0,8$ мкм. Однако, как показали электронно-микроскопические исследования и, в частности, в режиме вольтового контраста, это не сопровождается развитием микротрешин в теле перемычки и ростом ее электрического сопротивления.

Из полученного результата следует, что срок стабильной работы микромодульного блока ограни-

Рис. 3. Изменение отношения внутреннего электрического сопротивления r микромодульного блока после термообработки к его исходному значению r_0 в зависимости от времени и температуры

чивается диффузией между контактной перемычкой висмута и термоэлектрическими сплавами. При достижении диффузионной зоной предельной ширины $x_{\text{пр}}$ для контакта $\text{Bi}-(\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7})$ $x_{\text{пр}2} = 80 \dots 90$ мкм, для контакта $\text{Bi}-(\text{Bi}_{0,48}\text{Sb}_{1,52}\text{Te}_3)$ $x_{\text{пр}1} = 40 \dots 50$ мкм, и истощении висмута происходит отслаивание контактной перемычки и, как следствие, рост электрического сопротивления термоэлектрического микромодульного блока. Однако такая модель механизма отказа не учитывает влияние релаксации механических напряжений на контактах разнородных материалов на скорость миграции структурных дефектов, которая в конечном итоге приводит к развитию трещин.

Так как измеренная ширина реакционной зоны на контактах в микромодульных блоках при времени термообработки меньше $t_{\text{пр}}$ практически совпадает с расчетным значением, то для описания кинетики и температурного хода диффузии можно использовать значения коэффициентов диффузии, приводимых в работах [1, 2]. Эта особенность и истощение перемычки висмута, характеризующиеся определенными предельными значениями ширины $x_{\text{пр}}$ реакционной зоны, позволяют провести оценку долговечности t стабильной работы микромодульного блока в зависимости от температуры T по теплопоглощающему спаю.

Зависимость между сроком службы t контактов и температурой T теплопоглощающего спая можно найти, если использовать связь между $x_{\text{пр}}$ и временем t ($x_{\text{пр}} = (2Dt)^{1/2}$) и учесть температурную зависимость коэффициентов диффузии $D = D_0 \exp(-Q/kT)$. После подстановки и логарифмирования можно записать два выражения $\ln t = f(1/T)$ в линейной форме соответственно для p - и n -ветвей:

$$\ln t_1 = Q_1/kT + \ln(x_{\text{пр}1}^2/2D_{01});$$

$$\ln t_2 = Q_2/kT + \ln(x_{\text{пр}2}^2/2D_{02}).$$

Здесь $Q_1 = 0,71$ эВ и $Q_2 = 1,21$ эВ — энергии активации; $D_{01} = 2,2 \cdot 10^{-3}$ см²/с и $D_{02} = 513$ см²/с — частотные факторы диффузии на контактах $\text{Bi}-(\text{Bi}_{0,48}\text{Sb}_{1,52}\text{Te}_3)$ и $\text{Bi}-(\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7})$ соответственно, $x_{\text{пр}1} = 50$ мкм и $x_{\text{пр}2} = 90$ мкм. На рис. 4 дано графическое представление $\ln t_1$ и $\ln t_2$ от обратной абсолютной температуры $1/T$. Очевидно, нижняя прямая $\ln t_1 = f(1/T)$ определяет срок службы микромодульного блока и позволяет выбрать оптимальный режим его работы, а именно, температуру теплопоглощающего спая и долговечность. Во всем интервале температуры предельное время стабиль-

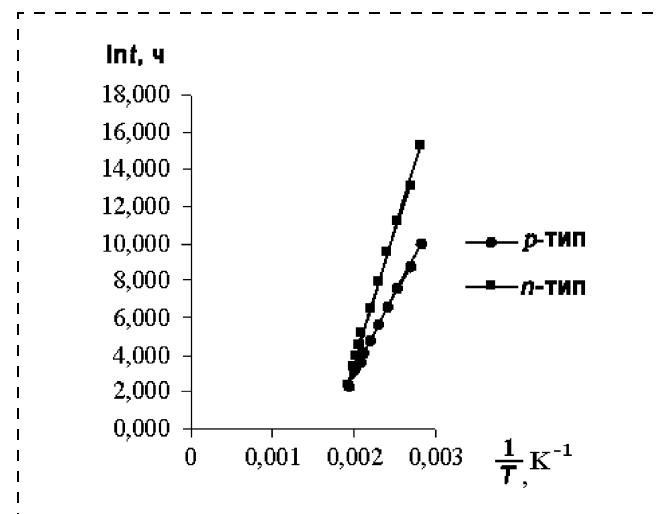


Рис. 4. Зависимость долговечности работы контактов ветвей p - и n -типа проводимости от температуры теплопоглощающего спая:

—●— p -тип; —■— n -тип

ной работы ветвей различное, за исключением температуры 250 °C, при которой прямые пересекаются. При температуре меньше 250 °C время, за которое происходит истощение контактной перемычки, для n -ветви значительно больше, чем для p -ветви, и срок службы микромодульного блока определяется химическим взаимодействием на контакте $\text{Bi}-(\text{Bi}_{0,48}\text{Sb}_{1,52}\text{Te}_3)$. Расчет показывает, что время непрерывной, стабильной работы микромодульного блока при температуре 70 °C по теплопоглощающему спаю будет составлять 41 800 ч для p -ветви и $13,4 \cdot 10^6$ ч для n -ветви. Повышение температуры приведет к существенному сокращению срока службы. Так, при увеличении температуры до 160 °C время работы должно уменьшиться до 2730 ч для n -ветви и 285 ч для p -ветви.

Прогнозируемый срок стабильной работы хорошо согласуется с результатами измерений внутреннего сопротивления микромодульного блока для температур 180, 200, 230 °C (см. рис. 3). Так, момент начала роста электрического сопротивления совпадает со временем достижения предельной ширины диффузионной зоны. Согласно литературным данным [8] интенсивность отказа паянных соединений для комнатной температуры предлагается принимать равным $4 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$, что соответствует сроку службы $2,5 \cdot 10^7$ ч. В нашем случае расчетный срок службы контакта на n -ветви составляет $1,3 \cdot 10^{10}$ ч, а для p -ветви $2,5 \cdot 10^6$ ч, т. е. предлагаемая схема оценки долговечности дает качественно приемлемый результат и для низких температур.

Используя спрогнозированное значение срока службы для p -ветви, как наиболее подверженной деградации, была вычислена и построена функция

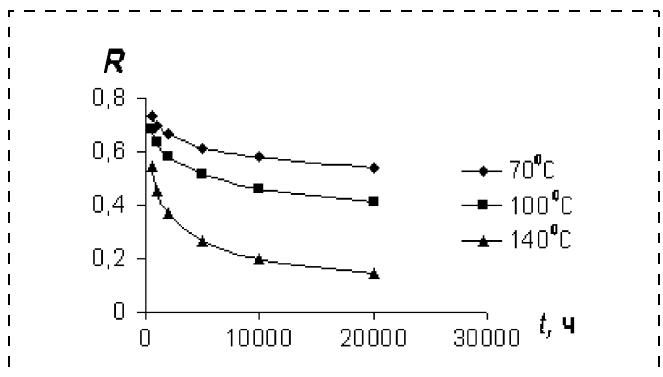


Рис. 5. Кривые надежности R микромодульного блока от времени t и температуры теплопоглощающего спая T

надежности R микромодульного блока. Для чего выбиралось логарифмически нормальное распределение, применяемое при наличии параметрических отказов [8, 9]. При этом дисперсия рассчитывалась в предположении, что стандартное относительное отклонение времени работы равно 3 %. Соответствующие зависимости представлены на рис. 5. Видно, что при температуре 70 °C для срока службы 10 000 ч значение надежности достигает ~0,6.

Проведенный прогноз долговечности и надежности следует расценивать как пессимистический, так как он не учитывает такие факторы как образование при резке сплавов нарушенного слоя и насыщение его углеродом, которые, как показали эксперименты [2], могут уменьшить скорость диффузии и продлить срок службы. Кроме того, проявившиеся перемычки висмута какое-то время могут осуществлять прижимной контакт, который на некоторое время обеспечит работоспособность микромодульного блока. Однако его внутреннее сопротивление при этом возрастает приблизительно на 30 %.

Необходимо подчеркнуть, что полученные оценки справедливы для случая, когда коммутирование ветвей термопар осуществляется по боковым поверхностям. Если контактные перемычки висмута наносить на торцы ветвей, то необходимо учесть снижение ЭДС микромодульного блока, что, с одной стороны, обусловлено низкими значениями коэффициентов термоЭДС продуктов реакций для p -ветви $\alpha = 45...50 \text{ мкВ/}^\circ$ и $\alpha = -(50...60) \text{ мкВ/}^\circ$ для n -ветви, а с другой стороны, нарушением сплошности контактов.

Наиболее прямой путь повышения срока службы блока — увеличение толщины слоя висмута. Однако вследствие разницы коэффициентов термического расширения висмута и термоэлектрических сплавов значительно увеличивать толщину висмута не представляется возможным. Очевидно необходи-

мо искать более совместимые композиции и сплавы для коммутиирования ветвей термопар.

Выводы

1. Установлено, что на контактах в микромодульных блоках при термообработке происходит реакционная диффузия висмута в термоэлектрические сплавы с образованием соединений, приближенные формулы которых $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_{2,7}\text{Te}$ при $x = 0,66...0,74$, Bi_xTe при $x = 3...2$. До момента истощения висмутовой перемычки скорость взаимодействия в микромодульном блоке может характеризоваться параметрами, полученными на диффузионных парах $\text{Bi}-(\text{Bi}_1\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7})$ и $\text{Bi}-(\text{Bi}_{0,48}\text{Sb}_{1,52}\text{Te}_3)$, которые используются для получения зависимости времени стабильной работы от температуры. В случае, когда материал перемычки полностью истощается, происходит отслоение сформированной реакционной зоны от термоэлектрических сплавов, что приводит к росту электрического сопротивления контакта.

2. На основании полученных данных предложены эмпирические зависимости времени стабильной работы от температуры горячего спая. Показана возможность применения результатов электронно-зондовых исследований для оценки ресурсоспособности микромодульных блоков.

Список литературы

- Ландышев А. В., Малыхин Ю. А., Соколов А. А., Швангирадзе Р. Р., Щетинина Э. В. Диффузия висмута в сплав $\text{Bi}_{0,48}\text{Sb}_{1,52}\text{Te}_3$ // Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы. Т. 26. 1990. № 10. С. 2072.
- Ландышев А. В., Малыхин Ю. А., Соколов А. А., Швангирадзе Р. Р., Щетинина Э. В. Диффузия висмута в сплав $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ // Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы. Т. 22. 1986. № 6. С. 915.
- Ландышев А. В., Битюцкая Л. В., Козаков А. В. Исследование поверхности сплава $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{T}_3$ электронно-зондовыми методами // Микросистемная техника. 2003. № 7. С. 42.
- Драбкин И. А. Влияние приконтактных явлений на термоэлектрические свойства ветви // Термоэлектрики и их применение. Доклады VI Межгосударственного семинара (1998 г.), Санкт-Петербург, 1999.
- Практическая растровая электронная микроскопия / Под ред. Дж. Гоулдстейна и Яковица. М.: Мир, 1978. 656 с.
- Гуров К. П., Угасте Ю. Э., Карташов Б. А. Взаимная диффузия в многофазных металлических системах. М.: Наука, 1981. 352 с.
- Петрова Л. И., Дудкин Л. Д., Федоров М. И. и др. Исследование физико-химического взаимодействия на контакте высшего силицида марганца с хромом // Термоэлектрики и их применение. Доклады VII Межгосударственного семинара (2000 г.). Санкт-Петербург. 2000. С. 192.
- Кубарев А. И., Панфилов Е. А., Хохлов Б. И. Надежность машин оборудования и приборов бытового назначения. М.: Легпромбытиздат, 1987. 334 с.
- Горлов М. И., Строганов А. В. Геронтология интегральных схем: долговечность алюминиевой металлизации // Петербургский журнал электроники. 1997. № 1. С. 2737.

УДК 681.7.068:530.182

И. П. Шилов, канд. техн. наук,
В. В. Григорьянц, д-р физ.-мат. наук,
Л. Ю. Кочмарев,
Институт радиотехники и электроники РАН,
Фрязинское отделение
E-mail: ipshilov@mtu-net.ru
Н. Т. Ключник, М. Я. Яковлев, канд. техн. наук,
ОАО Центральный научно-исследовательский
технологический институт "Техномаш"
E-mail: optcom@rol.ru

ВЫСОКОАПЕРТУРНЫЕ ОПТОВОЛОКОННЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА, ЛЕГИРОВАННОГО ФТОРОМ

Рассматриваются волоконно-оптические структуры состава $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2-\text{F}$ с апертурой до 0,30, полученные в СВЧ плазме пониженного давления. В качестве источника плазмы использовался СВЧ плазмотрон волноводного типа на волне H_{10} . Исследованы некоторые свойства высокоапертурных заготовок и световодов на основе кварцевого стекла, легированного фтором. Представлены области применения предлагаемых структур.

Введение

Интенсивное развитие в последнее время получили такие направления науки и техники, как лазерные технологии и медицина, использующие оптические структуры с чисто кварцевой сердцевиной и фторсиликатной оболочкой [1]. Применение фторсиликатного стекла с высоким содержанием фтора также перспективно при создании оболочек для накачки волоконно-оптических лазеров и усилителей, а также для разработок интегрально-оптических датчиков, компонентов оптической связи, в частности, пассивных и активных оптических разветвителей [2]. При этом актуальной является задача получения числовой апертуры для $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2-\text{F}$ -структур на уровне 0,30 и более.

Отличительной особенностью последних лет в развитии технологий получения синтетического кварцевого стекла, включая процессы изготовления заготовок волоконных световодов, является постепенный переход от газопламенных источников нагрева к использованию в качестве источников энергии плазмы ВЧ и СВЧ разрядов атмосферного и пониженного давления. ВЧ плазменная технология получения высокоапертурных структур, осуществляющая синтез кварцевого стекла внутри опорной кварцевой трубы (ОКТ) при атмосферном давлении (PMCVD-метод) [3], позволила существенно увеличить эффективность и скорость осаждения по сравнению с чисто химическим MCVD-

способом осаждения. Было достигнуто сравнительно высокое значение числовой апертуры — 0,25, что соответствует концентрации фтора в кварцевом стекле около 4 вес. %. Плазма СВЧ разряда (СВЧР) пониженного давления, имеющая более высокую концентрацию электронов по сравнению с плазмой ВЧ-разряда, существенно эффективней для решения поставленной задачи. Метод PCVD (осаждение из газовой фазы, активированное СВЧ плазмой пониженного давления), обладает целым рядом достоинств [4]:

- реакция идет гетерогенно сразу с образованием оптически прозрачных тонких диэлектрических слоев (толщина монослоя 100...1000 нм), что позволяет создавать структуры с периодически изменяющейся в пространстве диэлектрической проницаемостью и служит основой для создания фотонных кристаллов;
- высокая эффективность (для $\text{SiO}_2 \sim 100\%$, $\text{GeO}_2 \sim 80\text{--}90\%$, фторсодержащие соединения — 90 %) и скорость осаждения (процесс осуществляется при средних давлениях 1...20 Торр);
- активация плазмой весьма эффективна, поэтому диапазон используемых реагентов и легирующих добавок очень широк, процесс получается хорошо контролируемым и воспроизводимым;
- профиль показателя преломления может быть аппроксимирован с хорошим пространственным разрешением при нанесении нескольких тысяч слоев;
- система вакуумирована и герметизирована, что исключает возможность загрязнения процесса и окружающей среды.

В работе [4] для осаждения $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2-\text{F}$ -структур на внутренней поверхности ОКТ сечением 20×16 мм с апертурой до 0,26 использовался резонатор типа H_{111} . Желаемого повышения числовой апертуры, по всей видимости, можно достигнуть, используя более эффективный СВЧ плазмотрон, а также посредством оптимизации параметров процесса осаждения.

Данная работа показывает возможность формирования высокоапертурных (числовая апертура вплоть до 0,30 и более) оптоволоконных структур состава $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2-\text{F}$ в плазме СВЧ разряда волноводного типа, на основе которых создаются реальные устройства для нужд оптоэлектроники, систем передачи информации и т. д.

Исследование основных параметров СВЧ разряда волноводного типа

Для осуществления СВЧ плазмохимического осаждения кварцевого стекла, легированного фтором, на внутренней поверхности ОКТ нами было предложено использование устройства возбуждения СВЧР на волне H_{10} , которое представляет со-

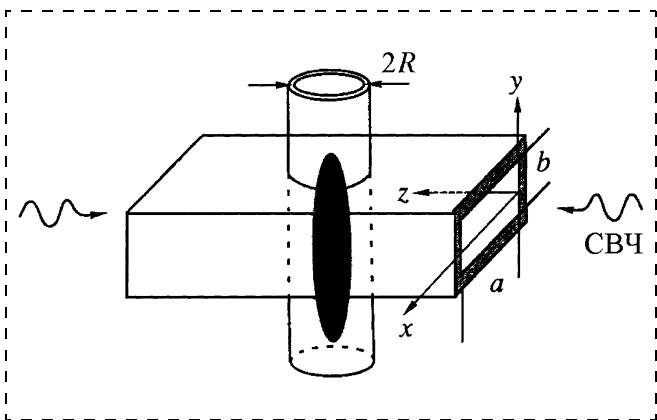


Рис. 1. Схема СВЧ разряда на волне H_{10} в прямоугольном волноводе

бой короткозамкнутый (КЗ) отрезок волновода сечением 72×34 мм с КЗ поршнем (КЗП) и введенной в него ОКТ нормально к широкой стенке (кварцевая труба находится в пучности поля "стоячей" СВЧ волны). Вне волновода ОКТ окружена металлическим экраном. Плазменное образование поддерживается за счет диссипации электромагнитной энергии, подводимой по волноводу H_{10} , которая частично отражается от разряда или проходит через него (рис. 1). Степень ионизации газа в объеме может быть оценена, исходя из значения критической концентрации электронов

$$N_{kp} = \frac{m_e(\omega^2 + v_{\text{эфф}}^2)}{4\pi e^2},$$

где $v_{\text{эфф}}$, e , m_e — эффективная частота столкновений электронов, электронная концентрация, заряд и масса электрона;

Исследованию основных параметров СВЧ разряда волноводного типа на моде H_{10} было посвящено несколько работ. В работе [5] изучалось распределение напряженности электрического поля в плазме данного типа разряда, которое представлено на рис. 2 для случаев одностороннего и двухстороннего симметричного подвода мощности электромагнитного поля (что в значительной степени реализуется при использовании КЗП). Наблюдается кольцеобразная область скинирования, где диссирируется значительная доля поглощенной мощности. При этом напряженность электрического поля в разряде < 1 кВ/см ($W_{\text{пад}} = 1,5$ кВт). Проведенные нами расчеты [6] показали, что для сечения прямоугольного волновода $a = 72$ мм, $b = 20$ мм и подводимой СВЧ мощности $W_{\text{пад}} = 600$ Вт возможно достижение еще больших значений напряженности поля ($E_A = 1,2$ кВ/см), что ведет к существенному росту параметра E/P (где P — давление), который определяет как свойства плазмы, так и скорости протекания плазмохимических реакций.

В работе [7] на основе диагностического метода измерения амплитуды и фазы коэффициента отражения электромагнитной волны было определено среднее значение концентрации электронов и эффективная частота столкновений в разряде данного типа. На рис. 3 приведены зависимости n_e от давления, которые были исследованы на уровне мощности 90 Вт как для чисто кислородной плазмы, так и для плазменной смеси $\text{SiCl}_4 + \text{O}_2$. На-

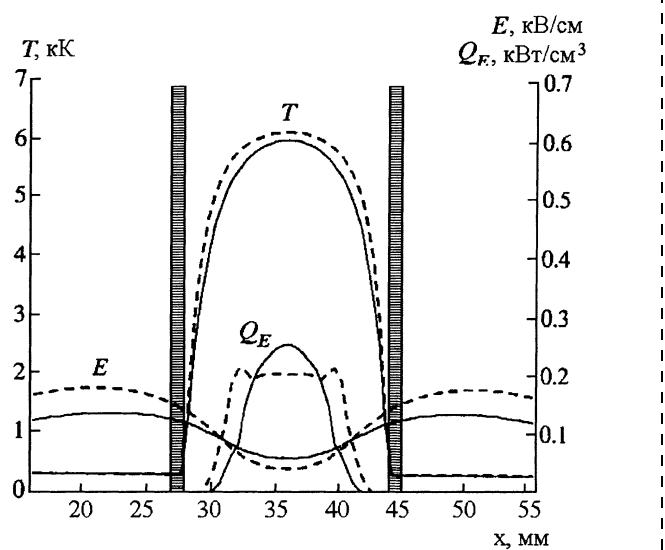
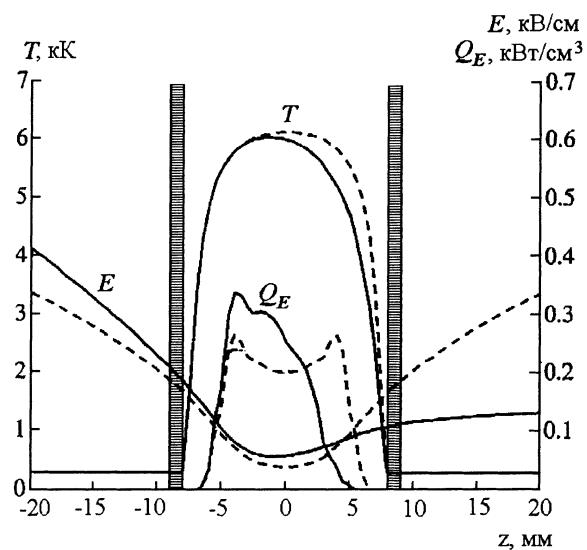
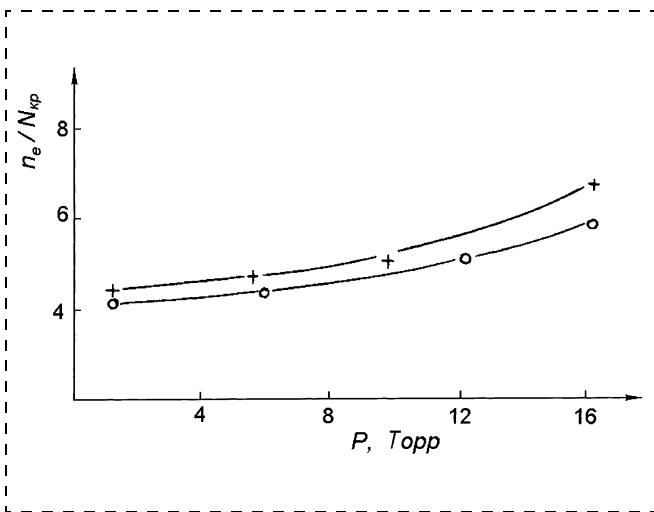
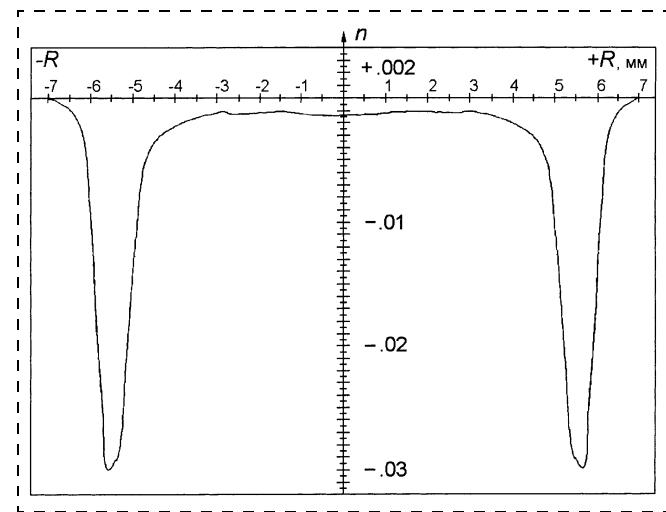


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля, температуры и удельной диссирируемой в плазме мощности ($Q_E = \sigma E^2/2$) в СВЧ разряде с односторонним (сплошные линии) и двухсторонним (штриховые) подводом электромагнитной волны ($P_1 = 1,5$ кВт). Заштрихованные прямоугольники — стенки диэлектрической трубы

Рис. 3. Зависимость n_e/N_{kp} от давленияРис. 4. Радиальное распределение профиля показателя преломления заготовки состава $\text{SiO}_2\text{-F/SiO}_2$

блудается некоторый рост n_e от давления в диапазоне 1...20 Торр, при этом концентрация электронов находится на уровне $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Зависимость концентрации электронов от падающей СВЧ мощности определяется в первую очередь свойствами плазмы, а также связью между падающей мощностью $W_{\text{пад}}$ и мощностью, поглощенной разрядом. Согласно большинству экспериментальных данных для СВЧ плазмы в диффузационном режиме характерен рост n_e от падающей мощности. Анализируя изложенное выше, можно охарактеризовать плазму данного типа разряда как высокоплотную, а сам разряд как высокоэффективный технологический инструмент для проведения плазмохимических реакций окисления тетрахлорида кремния и синтеза кварцевого стекла, легированного фтором, на внутренней поверхности ОКТ.

Формирование заготовок волоконных световодов состава $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2\text{-F}$ с повышенным содержанием фтора в стекле

Для эффективной передачи мощного лазерного излучения от источника к объекту воздействия в оптическом диапазоне 0,2...2,2 мкм необходимы кварцевые световоды с повышенным диаметром сердцевины (600 мкм и более), высокой числовой апертурой (до 0,35), низкими оптическими потерями и высокой лучевой прочностью (так называемые силовые волоконные световоды). Наиболее перспективными для разработки силовых волоконных световодов (СВС) являются высокоапертурные оптические структуры на основе световедущей кварцевой сердцевины и кварцевой отражающей оболочки, легированной фтором. Разработка СВС, удовлетворяющих данным требованиям, проводилась нами с помощью созданной в ФИРЭ РАН ма-

кетной СВЧ плазмохимической установки, описанной в работе [8]. При подаче в ОКТ паров тетрахлорида кремния, фреона и кислорода в результате проведения плазмохимических реакций на внутренней поверхности кварцевой трубы при ее перемещении относительно СВЧ плазмотрона осаждались слои фторсиликатного стекла. Показатель преломления состава $\text{SiO}_2\text{-F}$ существенно ниже, чем у чистого кварцевого стекла, что дает возможность изготавливать заготовки состава $\text{SiO}_2\text{-F/SiO}_2$, $\text{SiO}_2\text{-F/SiO}_2\text{-GeO}_2$ с повышенной апертурой. Формирование сердцевины заготовки проводилось по следующей методике. Внутри кварцевой трубы (сечение 20×16 мм, 18×14 мм) с осажденной в плазме $\text{SiO}_2\text{-F}$ -оболочкой (общей толщиной 300...500 мкм) помещался штабик из оптически прозрачного кварцевого стекла типа КУВИ-1 или КУ-1 (российского производства) и вся структура с помощью газокислородной горелки на станке склонывалась в штабик-заготовку трехслойного типа состава $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2\text{-F/SiO}_2$ (чисто кварцевая сердцевина, фторсиликатная светоотражающая оболочка и внешняя защитная оболочка из кварцевого стекла). Диаметр заготовок составлял 14...16 мм, длина до 300 мм. Радиальное распределение профиля показателя преломления (ППП) для типичной заготовки, измеренное с помощью анализатора заготовок типа Р-101, представлено на рис. 4. Данный ППП характеризуется хорошей азимутальной и осевой однородностью, а также высоким уровнем легирования кварцевого стекла фтором (разница показателей преломления кварцевой сердцевины и фторсиликатной оболочки достигает 0,03).

Исследование свойств световодов состава

Исследование

Вытяжка СВС из получаемых заготовок осуществлялась по известной технологии с использованием графитовой печи. В качестве первичного покрытия использовался кремнийорганический лак СИЭЛ-305 либо эпоксиакрилат ЭАС-655А, который одновременно служил и защитным покрытием. Числовая апертура световодов, вытянутых из таких заготовок, составляла 0,22—0,30. Спектральная зависимость оптических потерь в СВС с сердцевиной из стекла КУВИ-1 представлена на рис. 5. Результаты наших исследований показали, что СВС данного состава имеют низкие оптические потери в видимом и ближнем ИК-спектральном диапазоне, а также в области работы Nd:YAG-лазера (1,06 мкм). Следует также отметить, что СВС с диаметром сердцевины 800 мкм выдерживали мощность непрерывного излучения Nd:YAG-лазера около 1 кВт в течение суток без разрушения. Разработанные световоды имеют следующие основные технические характеристики:

- спектральный диапазон пропускания, нм 200—2200
 - материал сердцевины:
для оптического диапазона
200...800 нм кварцевое стекло
КУ-1
для оптического диапазона
800...2200 нм кварцевое стекло
КУВИ-1
 - диаметр сердцевины, мкм . . 50...1500
 - числовая апертура 0,12...0,30

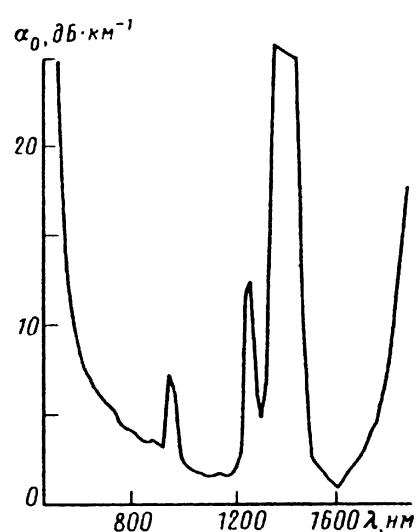


Рис. 5. Спектральные потери в световоде состава $\text{SiO}_2-\text{F}/\text{SiO}_2$

В настоящее время данный тип световодов находит широкое применение в различных областях: лазерная медицина (хирургия, урология, терапия и т. д.), лазерная технология (резка, сварка, сверление, модификация, очистка и обработка поверхностей и т. д.), спектроскопия, различного рода датчики физических величин. Необходимо также отметить, что СВС состава $\text{SiO}_2-\text{F}/\text{SiO}_2$ являются наиболее радиационно-стойкими из всех составов световодов из кварцевого стекла. Разработанные СВС и кабели на их основе могут быть использованы со стандартными лазерами отечественного производства (ЛИТ-500, ЛТН-103 и т. д.), включая полупроводниковые лазерные структуры.

Разработка планарных многоканальных оптических разветвителей

На основе созданных оптоволоконных и планарных многомодовых волноведущих структур состава SiO_2 — F/SiO_2 в последнее время был разработан новый тип высоконадежных многоканальных оптических разветвителей, используемых в ВОСПИ [8]. В таких разветвителях планарный волновод выполняет роль участка оптической связи между соединенными с его торцевыми участками оптическими волокнами состава SiO_2 — F/SiO_2 . Разветвители данной конструкции за счет монолитной структуры участка оптической связи имеют более высокую стойкость к механическим и температурным воздействиям по сравнению с биконическими сплавными разветвителями, что делает их перспективными для применения в составе информационных систем подвижных объектов.

Структура многоканального разветвителя, выполненного на основе планарного волновода, схематично показана на рис. 6. Данный разветвитель представляет собой пассивный оптический много-полюсник, в котором излучение, подаваемое на

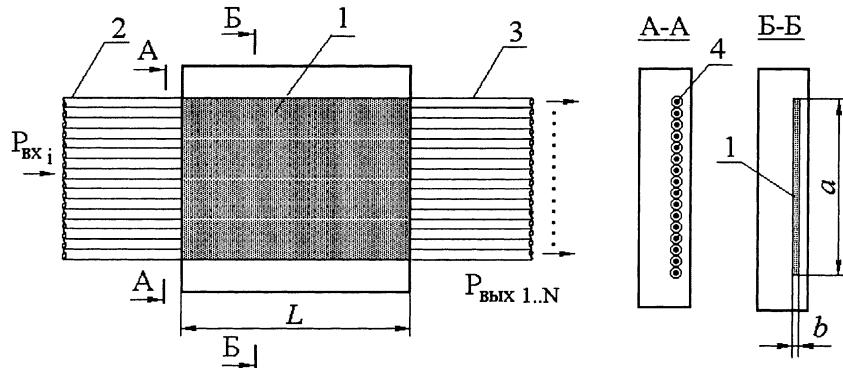


Рис. 6. Структура оптического разветвителя с планарным волноводом:

1 — волноводный слой; 2, 3 — группы оптических волокон; 4 — сердцевина оптического волокна

один из входных полюсов, равномерно распределяется между выходными полюсами. Смещение и перераспределение излучения в разветвителе осуществляется в волноводном слое с толщиной b планарного волновода 1. Две группы оптических волокон 2 и 3 образуют входные и выходные полюса разветвителя. При плотной укладке волокон ширина a планарного волновода определяется из соотношения:

$$a = (N - 1)D_0 + D_c, \quad (1)$$

где D_c и D_0 — значения диаметров сердцевины и светоотражающей оболочки волоконных световодов соответственно; N — число входных (выходных) оптических полюсов разветвителя.

Длина планарного оптического волновода L определяется требованием обеспечения равномерного распределения излучения по каналам разветвителя.

Так, практически равномерное распределение (с неравномерностью менее 1 дБ) для планарного волновода достигается при $L/a > 20$. Для увеличения отношения D_c/D_0 при использовании стандартных многомодовых волокон (с диаметром 100/140 мкм) необходимо проводить частичное травление светоотражающей оболочки. При этом толщина оболочки после травления должна быть не менее 8λ , где λ — длина волны оптического излучения.

На рис. 7 приведены зависимости вносимых потерь A_c от толщины волноводного слоя для различных волокон. Расчет проводился при значении $D_c/D_0 = 0,8$.

Анализ полученных зависимостей показывает, что существует оптимальное соотношение между значениями диаметра сердцевины волокна и толщины планарного волновода, при котором достигаются минимальные вносимые потери в разветви-

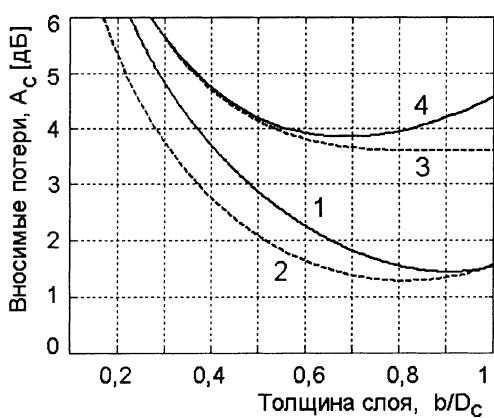


Рис. 7. Зависимость составляющей A_c вносимых потерь в разветвителе от толщины световодного слоя для различных типов оптических волокон:

1, 2 — волокно со ступенчатым профилем ПП; 3, 4 — волокно с градиентным профилем ПП (1, 2, 4 — слой со ступенчатым профилем ПП; 3 — слой с градиентным профилем ПП)

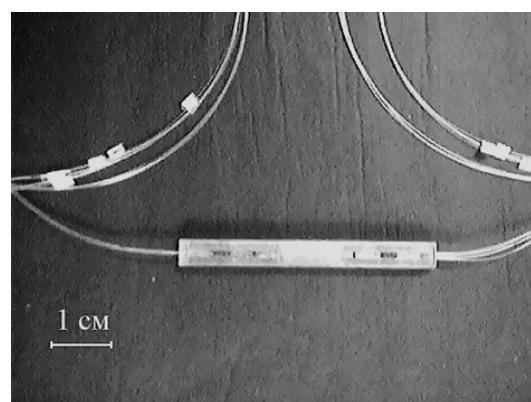


Рис. 8. Внешний вид разветвителя с матрицей передачи 16×16 с оптическими полюсами, выполненными в виде волоконных выводов

теле. При равномерном распределении интенсивности излучения по торцу оптического волокна со ступенчатым профилем ПП оптимальная толщина слоя составляет $b = 0,9 D_c$ (кривая 1). Однако в реальных системах указанное распределение имеет неравномерный характер, что дает оптимальное значение толщины световодного слоя $b = 0,8 D_c$ (кривая 2).

Таким образом, в разветвителях, построенных на основе многомодовых планарных волноводов, минимум вносимых потерь во всех случаях достигается при толщине слоя $b < D_c$ и зависит от характера распределения интенсивности оптического излучения и ППП в поперечном сечении сердцевины волоконного световода.

На основе планарных оптических волноводов и разработанных с помощью СВЧ плазмы СВС состава $\text{SiO}_2 - \text{F}/\text{SiO}_2$ с диаметром сердцевины/внешней оболочки 100/125 мкм и числовой апертурой 0,22...0,28 были изготовлены разветвители с матрицей передачи 16×16 , предназначенные для объединения и распределения информационных потоков в локальных ВОСПИ. На рис. 8 приведен внешний вид разветвителя с матрицей передачи 16×16 с оптическими полюсами, выполненными в виде волоконных выводов.

Список литературы

1. Бабенко В. А., Григорьянц В. В., Шилов И. П. и др. Кварцевые волоконные световоды для передачи лазерного излучения повышенной мощности // 10-ая Международная научно-техническая конференция "Лазеры в науке, технике и медицине". Тезисы докладов. 1999. С. 71—73.
2. Житковский В. Д., Ключник Н. Т., Яковлев М. Я. Многополюсные разветвители на основе слоевых структур из стекла для волоконно-оптических информационных систем // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2002. № 1—2. С. 68—73.
3. Артощенко В. Г., Блинов Л. М., Шилов И. П. и др. Кварцевые волоконные световоды для передачи мощного лазерного излучения // Известия АН СССР. 1990. Т. 54. № 8. С. 1570—1573.
4. Artushenko V. G., Blinov L. M., Shilov I. P. Plasmo-chemical synthesis of power fiber silica structures in a plasma of RF- and SRF-discharges // J. Sov. Lightwave Commun. 1992. V. 2. No 2. P. 171—182. Printed in the UK.
5. Кайрыев Н. Ж., Кулумбаев Э. Б., Лелевин В. М. Численное исследование СВЧ-разряда на волне типа H_{10} // Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 5. С. 488—493.
6. Бабенко В. А., Григорьянц В. В., Шилов И. П. и др. Осаджение диэлектрических структур на основе кварцевого стекла в волноводном плазматроне // XVI Международная научная конференция "Математические методы в технике и технологиях". Сб. трудов. Ростов-на-Дону. 2003. Т. 5. С. 94—95.
7. Babenko V. A., Blinov L. M., Volodko V. V. Plasma chemical process modeling in fibre waveguide technology // Sov. Lightwave Commun. 1992. V. 2. P. 199—212. Printed in the UK.
8. Берикашвили В. Ш., Григорьянц В. В., Шилов И. П. и др. СВЧ-плазмохимическое осаждение планарных волноводных структур на основе кварцевого стекла // Микросистемная техника. 2004. № 8. С. 28—33.

УДК 621.3.049.76

**О. В. Даринцев, канд. техн. наук,
А. Б. Мигранов,**
Институт механики УНЦ РАН, г. Уфа

МАНИПУЛЯЦИОННЫЕ МИКРОРОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ГИБРИДНЫХ МЭМС

Рассматриваются вопросы использования манипуляционных микробототехнических систем для сборки и корпусирования гибридных микросистем. Описаны основные проблемы производства МЭМС, в которых интегрированы сенсорные, управляющие, исполнительные и информационные функции. Дан краткий анализ современного состояния микросборочных технологий. Обобщены особенности реализации известных микротехнологических систем.

Введение

В последние десятилетия микроробототехники и технологии производства интегральных схем (ИС) оказали революционное влияние практически на все сферы чело-

веческой деятельности и во многом определили современный технологический уровень цивилизации. В 1959 г. на ежегодном собрании Американского физического общества Нобелевский

лауреат, один из патриархов микротехнологий Ричард Фейнман впервые выступил с идеей о возможности расширения технологий электронной миниатюризации на механические устройства — микромашины, микrorоботы и микромеханизмы, предложив для их производства использовать приемы из полупроводниковой промышленности — фотолитографию и травление [1]. В своем докладе Р. Фейнман фактически открыл новую область, связанную с миниатюризацией систем, при этом определив ее как безграничную сферу для теоретических и прикладных научных исследований. Сегодня это уже самые быстроразвивающиеся направления в науке и технике — микросистемная техника (МСТ), микроэлектромеханические сис-

темы (МЭМС), микромашины и т. д.

МСТ часто определяется как набор производственных методов микрообработки для создания двух- или трехмерных структур с размерами от одного микрометра до нескольких миллиметров. Они могут представлять собой цельные, монолитные устройства или быть частью составной МЭМС, собираемой из нескольких механических, электронных, оптических или других структур. Автоматизированная сборка составных МЭМС послужила одной из причин появления новой подобласти МСТ — *микроробототехники* [2]. Именно с миниатюризацией классических макророботов до размеров, сопоставимых с электронными чипами, многие эксперты связывают разрешение большинства фундаментальных проблем, которые проявляются при сборке составных микросистем. Кроме того, развитие микроробототехники как научной дисциплины способно оказать существенное влияние и на многие другие области деятельности человека. Предполагается, что микророботы будут играть ведущую роль в промышленном производстве и медицине XXI века.

Поэтому общепризнанно, что технологии, связанные с разработкой МЭМС, являются одними из перспективных и способны привести к революционному скачку в развитии науки и техники. Уже сегодня без МЭМС трудно представить высокотехнологичные и конкурентоспособные образцы продукции в автомобильной промышленности, электронике, медицине, авиации, космонавтике и многих других отраслях. По приблизительным данным в 2004 г. мировой рынок МЭМС составил более 50—55 млрд долл., а, к примеру, в 1996 г. его объем был только 13 млрд. дол. По прогнозам в 2025 г. доля микросистем в общем объеме промышленного

производства составит не менее 35 %.

В области МСТ основное внимание сфокусировано на интеграции отдельных или целого ряда функций (сенсорных, управляющих, исполнительных и информационных) в одной микросистеме. Эта тенденция привела к тому, что сегодня при производстве комплексных МЭМС возникает ряд совершенно новых инженерных и научных проблем, большая часть из которых связана с вопросами сборки и пакетирования (корпусирования) миниатюрных компонентов в единую гибридную микросистему. Еще в 1959 г. Р. Фейнман в том же известном докладе впервые поставил вопрос о "... проблеме манипулирования и управления объектами различной природы при их чрезвычайно малых массовых и габаритных характеристиках". Решение микросборочных проблем Р. Фейнман видел в использовании микромашин, состоящих из микромеханизмов, которые, в свою очередь, состояли из множества других еще более миниатюрных устройств. Идею Р. Фейнмана можно считать как одну из первых по гибридному построению МЭМС, поскольку в то время среди его современников доминировали исключительно идеи монолитной интеграции микросистем.

Проблемы производства гибридных МЭМС

Объединение все большего числа функциональных возможностей электронных устройств с сохранением сверхмалых размеров возможно благодаря интегральным технологиям и принципам монолитного объединения микросистем на кремниевой пластине. Однако технологии производства ИС имеют существенное ограничение — их можно использовать в производстве микросистем только двухмерной структуры, без механических звеньев и

передач. Изготовление же трехмерных структур МЭМС требует, как правило, технологий микрообработки: объемной микрообработки (анизотропное травление, плазменное травление и т. д.), поверхностной микрообработки (MUMPS, SUMMiT) или микрообработки с высоким отношением свободной длины к высоте (LIGA, SLIGA и лазерная микрообработка).

Сегодня этими методами успешно, практически за один технологический цикл, производятся сенсоры подушек безопасности, одноразовые датчики артериального давления, а также некоторые другие МЭМС. Это примеры относительно несложных конструкций МЭМС, их число незначительно и они могут быть целиком реализованы даже на базе стандартных для микроэлектроники операций. Для производства же тех МЭМС, в которых пространственно интегрирована механика и электроника, технологий микрообработки недостаточно. В этом случае дополнительно требуется сборочная фаза и поэлементное пакетирование, а выполнение этих операций является чрезвычайно сложной задачей. Традиционные подходы автоматизированной сборки в условиях микромира не эффективны, поэтому сегодня сборка микросистем со сложной интеграцией механики и электроники на предприятиях ведется вручную, под микроскопом. В результате стоимость конечного продукта обычно повышается в десятки и более раз по сравнению с суммарной себестоимостью компонентов МЭМС.

Еще больше усугубляют ситуацию противоречивые требования: часть элементов МЭМС требуют защиты от окружающей среды, тогда как другая часть — доступ к внешней среде. К примеру, для производства таких сложных микросистем, как лазерные виброметры, планетарные редукторы, микронасосы, оптиче-

ские дуплексеры, эндоскопы и целый ряд других МЭМС, сегодня не существует технологий монолитной интеграции и групповых методов изготовления, и наиболее вероятно, что их не будет в ближайшие десятилетия. Поэтому, по мнению ведущих экспертов, занимающихся вопросами МСТ, использование микроманипуляционных систем (микроботов) может стать основой технологических операций при сборке и пакетировании гибридных микросистем.

На рисунке представлены образцы промышленных гибридных микросистем компании Namiki (Япония): микроэлектродвигатели и микроредукторы [3]. Щетки, шестерни, сателлиты, зубчатые колеса и прочие составляющие этих механизмов имеют толщину 100 мкм и менее. Низкая производительность ручного труда и практически полное отсутствие автоматизации технологических процессов изготовления конечной продукции являются главными причинами того, что ценовая планка на эти микросистемы доходит до 1000 долл. и более.

Традиционные технологии автоматизированной сборки позволяют значительно снизить стоимость, повысить надежность и качество конечной продукции. Возрастает производительность труда и упрощаются технологические процессы изготовления конечной продукции, сложные комплексные изделия изготавливаются из более простых компонентов, а те в свою очередь могут производиться по совершенно различным технологиям, из различных материалов и т. д. Также облегчается последующее обслуживание сложных изделий: диагностика, ремонт и замена составляющих деталей.

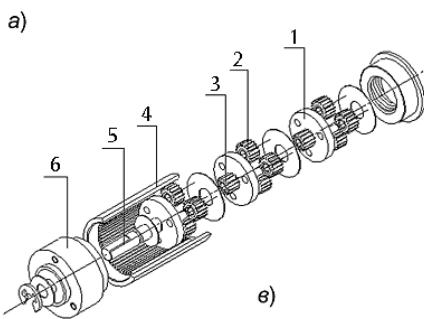
На достижение указанных преимуществ направлены и современные исследования по разработке методов автоматизированной сборки на микроуровне, которые получили наиболее широкое распространение в конце XX века. С расширением производственных технологий на микро- и даже наномасштабный уровень впервые был введен термин "микросборка" (microassembly), под которым в настоящее время понимаются операции манипули-

рования объектами микро- (от 1 до 100 мкм) и мезоразмеров (от 100 мкм до 2–3 мм), а также операции, выполняемые с микрометровыми допусками (например, интеграция МЭМС в обычное по размерам изделие). Характерными для всех микросборочных технологий являются прикладываемые усилия. Кантилеверы, мембранны и другие компоненты МЭМС имеют чрезвычайно хрупкую структуру, что требует особой точности в соблюдении значений прикладываемых усилий. Обычно значения этих сил находятся в диапазоне от десятков микроньютонов (мН) до нескольких миллиньютонов (мН).

Кроме непосредственно монтажа к микросборке обычно относят также пакетирование и создание различного рода связей (механических, гальванических, оптических и т. д.) между компонентами микросистем. Как уже отмечалось, основным отличием изготовления МЭМС от модульных ИС является то, что при их производстве требуется формирование сложных 3D-механических структур. Технологии микрообработки (LIGA, MUMPS, SUMMiT и др.) не только не позволяют получать законченные гибридные микросистемы, но также имеют целый ряд других ограничений:

- строго определенный и весьма ограниченный набор материалов. Несовместимость технологий и материалов для производства отдельных элементов;
- незначительные возможности изготовления сложных 3D-структур с подвижными элементами и электрическими развязками;
- единые технологические процессы, число которых ограничено.

Естественно, что использование микросборочных технологий позволяет снять все ограничения. Однако для гибридных МЭМС задачи сборки, комплексиро-



Образцы промышленных гибридных микросистем компании Namiki (Япония):

a — микросистемы диаметром от 0,5 до 2,4 мм; *б* — микроэлектродвигатель постоянного тока (1 — щетки; 2 — коммутатор; 3 — электромагнит; 4 — постоянный магнит; 5 — корпус; 6 — фланец; 7 — ведущая шестерня); *в* — планетарный микроредуктор (1 — крепежная пластина; 2 — сателлиты; 3 — центральное зубчатое колесо; 4 — корпус; 5 — выходной вал; 6 — фланец)

ния и корпусирования реализуются очень сложно. Между компонентами таких микросистем необходимы как электрические разводки для передачи сигналов, так и механические связи. Большая часть последних может быть изготовлена только трехмерной обработкой, когда управление микроинструментом осуществляется в трехмерном пространстве. Кроме того, что все операции на микроуровне являются высокопрецизионными, также можно отметить их высокую специализацию, что в целом усложняет разработку универсальных автоматизированных производственных систем.

Последовательная и параллельная микросборка

Все существующие технологии сборки элементов микросистем можно разделить на две основные группы: последовательные и параллельные [4]. *Последовательная микросборка* предполагает использование микроманипуляторов и сенсорных устройств в каналах обратной связи. В каждый момент времени собирается только один из элементов микросистемы. Основной же идеей *параллельной микросборки* является

одновременная сборка сразу множества микросистем или нескольких элементов одной микросистемы. В зависимости от физических эффектов, лежащих в основе операций, параллельная микросборка может быть детерминированной или стохастической. Детерминированная микросборка связана исключительно с производством планарных микросистем. При стохастической параллельной микросборке одновременно собираются множество частей на основе распределенных физических эффектов, например, электростатических и электромагнитных полей, капиллярных сил, центробежных сил или вибрации. Особенностью стохастических методов является минимальное использование сенсорных устройств и обратной связи.

Методы последовательной и параллельной микросборки имеют как достоинства, так и недостатки. Краткая сравнительная характеристика последовательной и стохастической параллельной микросборки приведена в таблице.

Детерминированная параллельная сборка имеет много общего с последовательной: используется сенсорная обратная связь, одинаковые требования к

точности позиционирования и инструменты. Если бы не принципиальное отличие в возможности изготовления трехмерных структур, то множество выполняемых одновременно последовательных сборок можно было бы считать одной детерминированной параллельной операцией. На практике выбор того или иного метода определяется конкретными приложениями и зависит от общего числа элементов в микросистеме, их массогабаритных характеристик, пространственной структуры, материалов и т. д.

На практике выбор того или иного метода определяется конкретными приложениями и зависит от общего числа элементов в микросистеме, их массогабаритных характеристик, пространственных структур, материалов и т. д. Для соединения микрочипов ИС обычно используется детерминированный параллельный метод. Сборка микрофлюидных и микрооптоэлектромеханических систем, как правило, ведется последовательными методами. Большое внимание сегодня уделено теоретическим и экспериментальным исследованиям стохастических параллельных методов микросборки (на основе поверх-

Сравнительная характеристика методов сборки сложных микросистем

Параметр сравнения	Последовательная микросборка	Стochasticская параллельная микросборка
Допустимая структурная сложность объекта сборки	Высокая	Низкая
Использование инструментов	Микроманипуляторы, микросхваты	Распределенная обработка (электрические поля, центробежные силы и т. д.)
Использование сенсорной обратной связи	Микроскопы, датчики усилий	Минимальное
Контроль силового воздействия на компоненты	Прямой, точный контроль прикладываемых усилий	Косвенный, приближенный контроль прикладываемых усилий
Возможность 3D-сборки	Высокая	Низкая
Точность позиционирования	Высокая, может компенсироваться	Низкая, не может корректироваться
Производительность операций	Низкая	Высокая
Возможность исправления ошибочных действий	Высокая	Низкая
Сложность сборочного комплекса	Высокая	Высокая
Стоимость сборочного комплекса	Высокая	Низкая

ностного натяжения, ультразвуковых эффектов и электростатических явлений и т. д.).

Анализ состояния и специфика реализации манипуляционных микроробототехнических систем

Определенная часть существующих в настоящее время микротехнологических систем, используемых для сборки, пакетирования и других технологических операций, основаны на традициях промышленного изготовления ИС. В них автоматизируются вакуумное напыление, фотолитография, химическое травление, формирование матричных и линейных электрических развязок, тестирование микрочипов и ряд других процессов, которые давно унифицированы в микроэлектронике. С помощью подобных систем достаточно успешно изготавляются несложные МЭМС (датчики давления, акселерометры и гироскопы), производство которых требует только планарной микрообработки. Некоторые из образцов весьма ограниченно поддерживают выполнение трехмерных операций, например, глубинное травление, измеряемое десятками микрометров. В последние годы наибольший вклад в общемировой объем производства несложных планарных МЭМС обеспечивается в основном за счет коммерчески распространяемых микротехнологических комплексов, производителями которых являются компании SUSS [5], ESEC [6], Palomar Technologies [7] и др.

Автоматизированное производство более сложных микросистем требует разработки совершенно другой системной архитектуры, основу которой составляют принципы последовательной микросборки. В настоящее время еще не сделано окончательного заключения о том, какая оптимальная конфигурация будет обеспечивать наиболее эффективное выполнение последовательных операций. Как извест-

но, в традиционной робототехнике наиболее часто используются манипуляторы с 5–6 степенями подвижности. Однако на микроровнне будут более предпочтительны манипуляционные системы с двумя–тремя степенями подвижности, работающие в прямоугольной системе координат. Это можно объяснить тем, что в условиях микромира слабейшими звенями оказываются сенсорная и активаторная подсистемы, что не позволяет адекватно увеличивать возможности системы управления в целом. Большая рабочая область и широкий диапазон, в котором необходимо совершать прецизионные перемещения, являются одними из главных требуемых эксплуатационных характеристик микроманипуляционных систем, реализация которых вызывает наибольшие сложности. На практике же размеры рабочей области определяются конфигурацией инструментальных средств и расположением паллет с компонентами микросистем.

Для задач сборки трехмерных микроструктур, когда исполнительные органы движутся по сложным траекториям, рациональнее реализовать две подсистемы движения: грубую (точность позиционирования 5–10 мкм и более) и точную (менее 5 мкм). Чаще всего грубые движения генерируются с помощью позиционирующих столов. В качестве исполнительных механизмов обычно используются электродвигатели постоянного тока; если же грубое позиционирование должно совершаться в субмикрометровом диапазоне, то применяют пьезоэлектрические или магнитострикционные приводы, которые, однако, существенно снижают быстродействие, поскольку максимальный шаг в среднем составляет не более 100 мкм.

В большинстве случаев грубые линейные позиционеры имеют порталную архитектуру, преимуществами которой являются про-

стота и большая рабочая зона. Для достижения максимальной точности в наиболее совершенных устройствах используются воздушные подшипники и керамическое основание, обеспечивающее наилучшую жесткость и термоустойчивость конструкции. Иногда позиционеры порталной архитектуры реализуют одновременно как грубые, так и точные движения. С одной стороны, это существенно упрощает архитектуру всей системы, хотя бы потому, что в качестве средств обратной связи могут быть использованы традиционные датчики по положению. С другой стороны, такая конфигурация имеет и недостатки: сложнее компенсируется влияние параметров окружающей среды (температуры, давления, влажности и т. д.). Если принять во внимание миниатюрный размер компонентов сборки, такое решение неэффективно также с энергетической точки зрения.

В настоящее время наиболее сложные из известных микроманипуляционных систем имеют до трех степеней подвижности и работают в прямоугольной системе координат. Область их применения — биологические приложения и операции тестирования ИС. Для сборочных операций использование систем такого типа затруднено, так как кроме переносных степеней подвижности необходимы и ориентирующие сочленения. Наибольшая сложность, возникающая при разработке многозвездных микроманипуляционных устройств, связана с отсутствием миниатюрных и легких приводов, которые также обеспечили бы высокопрецизионные перемещения и достаточные врачающие моменты для противодействия статическим нагрузкам последующих звеньев, шарниров и рабочего органа.

При разработке микросборочных систем базовыми являются принципы традиционной робототехники, однако их архитектура

также включает и идеи микроэлектронных технологий, как наиболее близко отражающих специфику данной области. Прецизионное позиционирование, выравнивание на микрометровом уровне элементов микросистем и ряд других операций, типичных в микроэлектронике, являются таковыми и в микросборочных системах. Поэтому вместо применения исключительно микроманипуляционных систем более эффективными для выполнения некоторых из операций могут оказаться подходы, используемые в смежных областях или основанные на актуальных только в микромире эффектах.

Особенности, возникающие при непосредственном взаимодействии с объектами внешней среды, предъявляют специальные требования к рабочим органам микроманипуляторов. При разработке захватных устройств и инструментов особое внимание уделяется материалу, из которого они выполняются, свойствам рабочей поверхности, средствам силового чувствования, точности выпускания объектов (для захватных устройств), чувствительности к адгезии и свойствам окружающей среды. Поскольку на микроуровне доминируют иные силы и эффекты, чем на макроуровне, то большее распространение получили захватные устройства, основанные на различных оригинальных принципах действия (электростатические, капиллярные, криогенные, ультразвуковые, оптические, на эффектах Бернулли и силах Ван-дер-Ваальса), но также встречаются описания устройств, основанных на традиционных принципах (фрикционные, вакуумные и магнитные). Так как в качестве средств обратной связи обычно используются мощные микроскопы (атомносилоевые, мультимодовые сканирующие и др.), которые обеспечивают картину только в ограниченном диапазоне расстояний от объек-

тива (сверхмалая глубина резкости), то большее внимание необходимо также уделять габаритным размерам, геометрии рабочего органа,名义альным перемещениям в поле зрения микроскопа при ориентировании и позиционировании компонентов сборки.

Конструктивное исполнение и принципы работы инструментальных средств, таких как микроманипуляторы или захватные микроустройства, в значительно большей степени, нежели чем в традиционной робототехнике, определяются геометрией микрообъектов, свойствами их материала и поверхности, а также технологическими задачами, которые необходимо выполнить. Особое внимание приходится уделять вопросам оптимального освещения рабочей зоны, способам организации визуального наблюдения, средствам силового чувствования и т. д. Также целый ряд требований предъявляется к окружающей среде: необходимо поддерживать оптимальную влажность воздуха и температуру, проводить фильтрацию пыли из воздуха и удалять ее с рабочих поверхностей, недопустимы тепловые воздушные потоки, электромагнитные наводки и т. д. В этих условиях одним из лучших решений может быть создание вакуумного купола над всей системой.

В отличие от макромира, где доминируют гравитационные и инерционные силы, в микромире большое влияние оказывают такие проявления адгезии, как электростатические силы, эффекты контактной электрификации, эффекты сохранения зарядов, силы межмолекулярного взаимодействия, силы поверхностного натяжения, силы сцепления (pull-off force) и эффекты микротрибологии. Хотя на основе различных форм проявления адгезии и реализуются некоторые методы автоматической микросборки (self-microassembly), связанные, как

правило, с самовыравниванием различных элементов микросистем, однако на практике адгезия, появляющаяся при контакте микрообъектов с рабочими поверхностями инструментов, манипуляторов и технологической оснастки, создает неразрешимые проблемы для эффективного проведения микроманипуляционных операций.

Все эти явления, в конечном счете, оказывают возмущения непредсказуемого и сложнопрогнозируемого характера. Проанализировать и учесть влияние каждого из этих факторов при генерации управляющих воздействий практически невозможно, хотя бы из-за отсутствия числовых показателей для большинства из них, а также значительного увеличения сложности модели. Поэтому при разработке систем управления и планирования, синтезе законов управления экспериментальными системами актуальным является использование методов современной теории адаптивного управления, предиктивного управления, искусственного интеллекта, а также комплексного математического и полунатурного моделирования.

Из этого краткого анализа можно сделать вывод о том, что в настоящее время для монтажа и других операций изготовления гибридных и сложноинтегрированных МЭМС наиболее подходящими являются последовательные методы микросборки. Существенно ограничивают их широкое практическое применение недостаточные теоретическая и экспериментальная проработки, а также один из их основных недостатков — низкая производительность. На сегодня не известно ни одной экспериментальной системы, в которой был бы полностью автоматизирован полный производственный цикл микросборочных операций.

* * *

Следует отметить, что приведенные в статье информационные материалы и анализ современного состояния проблемы были получены в Институте механики УНЦ РАН в рамках проекта, целью которого являлась разработка системы математического, полунаучного и виртуального моделирования для задач автоматизации микротехнологических операций и методики ее использования при проектировании, тестировании, отладке алгоритмов планирования [8–10].

Авторы благодарят за финансовую поддержку исследований ОЭММиПУ РАН, программа № 16

фундаментальных исследований, и РРФФИ, грант № 02-01-97916-p2002агидель_a.

Список литературы

1. Feynman R. P. There's Plenty of Room at the Bottom // Reprinted by S. Senturia in IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems. March 1992. Vol. 1. No 1. P. 60–66.
2. Fatikow S. and Rembold U. Microsystem Technology and Microrobotics. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1997.
3. Copyright 2004 Namiki, Inc. Technology. <http://www.namiki.com/technology.html>.
4. Madou M. J. Fundamentals of Microfabrication. 2nd ed. CRC Press, 2002.
5. SUSS MicroTec. FC250 Full Description. http://www.suss.com/main.php?rad_f=173&rad_id=257.
6. ESEC — Products by Technology. Micron 5003 Flip Chip. <http://www.esec.com/products/flipchipbonder/micron5003fc/overview-en.asp>.
7. Palomar Technologies — Enabling Lightwave Connectivity! Automate Assembly of Microelectronics. http://www.palomartech-nologies.com/news/press_releases/archives/2003/pr030313_hologic_3500.htm.
8. Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Управление технологическими процессами микросборки в реальном времени с использованием виртуальных систем, интеллектуальных и адаптивных алгоритмов // Искусственный интеллект. 2003. № 3. С. 172–180.
9. Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Виртуальная микротехнологическая среда: структура и особенности реализации // Техника, технология и перспективные материалы.: Межвуз. науч. сб. Вып. 4(9). М.: Изд. МГИУ. 2003. С. 17–23.
10. Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Нейросетевые предикторы в системах управления микромеханическими системами // Искусственный интеллект. 2004. № 3. С. 684–688.

УДК 623.3

В. М. Лохин, С. В. Манько, М. П. Романов, И. Б. Гарцеев, К. С. Колядин,
Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МИНИ- И МИКРОКЛАССОВ

Приведен обзор существующих и перспективных образцов малогабаритных БПЛА, проанализированы основные тенденции и проблемы их разработки.

Введение

Одно из важнейших направлений в современной авиации связано с разработкой беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), первые образцы которых появились еще в середине прошлого века, как отдельный вид перспективного оружия. В настоящее время БПЛА различных типов и назначения не только стоят на вооружении многих армий мира, но и начинают активно использоваться в гражданской сфере. Широкий спектр практических применений БПЛА охватывает решение следующих основных задач:

- оптическая, радиолокационная, химическая, бактериологическая и радиационная разведка;

- нанесение ударов для уничтожения объектов и живой силы противника;
- радиоэлектронная борьба;
- мониторинг экологической обстановки;
- поддержание сетевых телекоммуникаций;
- контроль морского судоходства и т. д.

Логика развития беспилотной авиации на рубеже ХХ–XXI вв. привела к возникновению класса малогабаритных летательных аппаратов (МЛА). Анализ тенденций, опыта и проблем разработки МЛА представляет существенный интерес и актуальность.

Анализ тенденций развития малогабаритных БПЛА

Появление класса малогабаритных БПЛА обусловлено целым рядом различных факторов, главными из которых являются:

- возникновение принципиально новых областей потенциального применения БПЛА, например, в составе комплектов индивидуального оснащения бойца в качестве средства оперативного сбора информации об особенностях и характере боевой обстановки или в качестве средства локального поражения противника;
- ужесточение требований к функциональным и эксплуатационным возможностям БПЛА, включая повышение скрытности и оперативности сбора и передачи разведывательной информации, а также значительное снижение массогабаритных характеристик.

Рассмотрим наиболее типичных представителей данной модельной группы и функциональные особенности их систем управления.

MicroStar¹ (BAE Systems, UK) (рис. 1, *a*, 2, см. третью сторону обложки) — перспективный образец микролетательного аппарата для индивидуальной экипировки бойцов спецназа. Оснащается средствами GPS, видео и инфракрасной камерами, приемопередающим устройством. Продолжительность полета — 20 мин, высота полета — до 100 м.

Blank Widow² (Aero Vironment Inc., USA) (рис. 1, *e*, см. третью сторону обложки) — образец микролетательного аппарата для индивидуальной экипировки бойцов спецназа. Прототипы аппарата разрабатывались по заказу Агентства перспективных оборонных исследований США DARPA с 1986 г. (рис. 1, *b*, *v*, *d*). Оснащен электрическим винтовым двигателем, цветной видеокамерой, приемопередатчиком с рабочей частотой 433 МГц, автопилотом и системой спутниковой навигации. Максимальные линейные размеры аппарата составляют порядка 15 см, масса — 80...100 г, продолжительность полета — 30 мин, скорость полета — около 50 км/ч; высота полета — 230 м; радиус действия — 1,8 км. Переносная система дистанционного управления (рис. 3) имеет в своем составе жидкокристаллический дисплей, позволяющий отображать видеинформацию с борта микролетательного аппарата.

Mesicopter³ (Stanford University, California, USA) (см. рис. 1, *e*) — это экспериментальный образец микролетательного аппарата, построенного по

вертолетной схеме. Разработан при поддержке NASA для демонстрации и изучения возможностей MEMS-технологий в создании микролетательных аппаратов сантиметровых размеров.

MicroBat (AeroVironment Inc., USA) (см. рис. 1, *ж*) — экспериментальный образец микролетательного аппарата, построенного на основе MEMS-технологий по схеме с машущим крылом. Разрабатывается по заказу Агентства перспективных оборонных исследований США DARPA. Линейный размер составляет около 20 см, масса порядка 10 г.

Micromechanical Flying Insect (MFI) (University of California, USA) (см. рис. 1, *з*, *и*) — экспериментальный образец микролетательного аппарата, созданного по заказу Агентства перспективных оборонных исследований США DARPA на основе MEMS-технологий по схеме с машущим крылом⁴. В разработке конструктивных принципов использованы бионические аналогии с летающими насекомыми (рис. 4). Линейные размеры не превышают 25 мм.

Трудности, с которыми столкнулись разработчики, обусловлены прежде всего тем, что при малых габаритных размерах летательного аппарата его аэродинамические поверхности (крылья или профицированный фюзеляж) имеют крайне низкие аэродинамические характеристики, а органы управления в виде отклоняемых поверхностей — малоэффективны. И если в 1980-е годы успешность разработки малоразмерных дистанционно пилотируемых летательных аппаратов обеспечивалась путем простого масштабирования традиционных самолетных схем, то для решения задачи соз-

¹ <http://www.baesystems uavolutions. com/UAVs.htm>

² <http://www.aerovironment.com>

³ <http://aero.stanford.edu/mesicopter/>

⁴ <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~ronf/mfi.html>



a)



б)

Рис. 3. Система дистанционного управления микролетательным аппаратом Black Widow:

а — общий вид; *б* — подготовка к работе

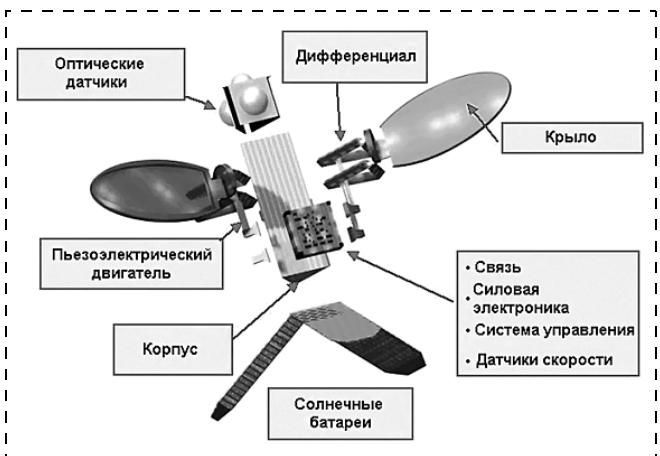


Рис. 4. Конструкция миниатюрного летательного аппарата Mi-cro mechanical Flying Insect, построенного по схеме с машущим крылом на основе бионических принципов с использованием MEMS-технологий

дания микролетательного аппарата необходимо рассмотреть принципиально новые решения, прежде всего, собственно в его конструкции и принципах действия. Поэтому в США ведутся активные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы поискового характера, связанные с созданием летательных аппаратов с нетрадиционной конструктивной схемой.

В качестве примера может быть приведен безэкипажный малоразмерный летательный аппарат *Gopher* (типа "летающая тарелка") вертикального наземного взлета. Он разработан в рамках программы создания многоцелевой платформы для решения различных боевых задач, включая охрану военных объектов и освещение обстановки — *Multipurpose Security and Surveillance Mission Platform* (MSSMP) (рис. 5).

Безэкипажный малоразмерный летательный аппарат MSSMP *Gopher* обеспечивает решение разведывательных задач на удалении до 10 км от на-

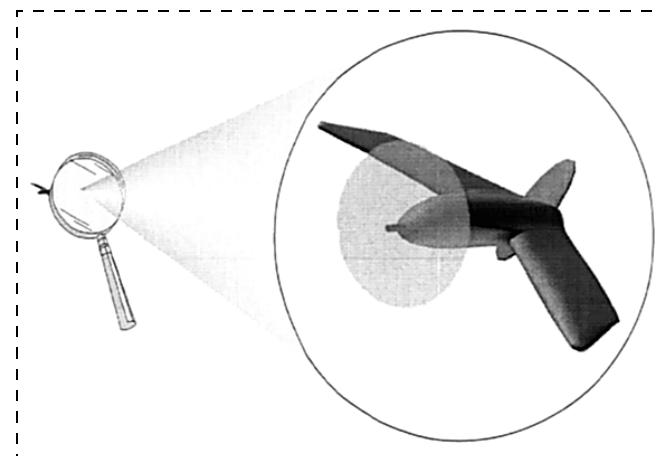


Рис. 6. Предварительный проект микролетательного аппарата с традиционной аэродинамической схемой (ОКБ А. С. Яковleva)

земной станции управления. В состав бортовых средств его системы наблюдения входят видеокамера, устройство ночного видения на базе приемника ИК-изображения, лазерный дальномер и аппаратура акустического контроля.

Предварительный проект альтернативного варианта микролетательного аппарата с традиционной аэродинамической схемой (рис. 6) разрабатывается в ОКБ А. С. Яковлева.

Исходные данные к проекту определяют высокий уровень тактико-технических характеристик перспективной разработки, не уступающей лучшим из создаваемых образцов микролетательных аппаратов военного назначения:

- масса экспериментального образца — 600 г;
- масса опытного образца — 100...150 г;
- размах крыла экспериментального образца — 400 мм;
- размах крыла опытного образца — 150...200 мм;
- скорость — 0...20 м/с;
- продолжительность полета — 20 мин;
- радиус действия — 1 км;
- целевая нагрузка — телевизионная камера;
- силовая установка — электродвигатель;

"Альбатрос" (НИИ ПФМ ХАИ, Украина) — перспективный образец малогабаритного БПЛА, общий вид (рис. 7) и характеристики которого представлены ниже.

Основные характеристики МЛА "АЛЬБАТРОС"-3

Масса взлетная	5 кг
Полезная нагрузка	1 кг
Максимальная высота полета	4000 км
Крейсерская скорость полета	50 км/ч
Продолжительность полета	до 20 ч
Радиус действия	500 км



Рис. 5. Экспериментальный безэкипажный малоразмерный летательный аппарат *Gopher* (США) с нетрадиционной конструктивной схемой типа "летающая тарелка"



Рис. 7. МЛА "АЛЬБАТРОС"-3

Мини-БПЛА "Альбатрос" предназначен для разведки и наблюдения в течение длительного времени в интересах спецподразделений, сил правопорядка и других ведомств.

Высокие летные характеристики достигаются оптимизированной компоновкой БПЛА, обеспечивающей высокое аэродинамическое качество, и высокоэкономичным четырехтактным бензиновым двигателем, оснащенным системой зажигания с микропроцессорным управлением и многокамерным карбюратором. Специально спроектированный воздушный винт дополнительно способствует повышению эффективности силовой установки. Расход топлива при крейсерской скорости 50 км/ч не более 40 г/ч.

Старт летательного аппарата осуществляется с руки, посадка — в режиме парашютирования, что обеспечивается специальным подбором параметров БПЛА. Благодаря использованию углепластиков и органопластиков, современных конструктивных и технологических схем масса конструкции БПЛА составляет 20 % от взлетной массы.

Высокая весовая отдача БПЛА достигнута и благодаря использованию компактных и легких компонентов бортового оборудования. Так масса бортового компьютера составляет 125 г, приемника спутниковой системы навигации с антенной — 100 г, а масса каждого привода рулей и других механизмов БПЛА — менее 20 г.

Бортовое оптическое оборудование располагается на поворотной турели под фюзеляжем БПЛА, оборудованной системой управления и стабилизации.

Основу наземной станции управления составляют рабочие места пилота и оператора целевых систем. Каждое рабочее место оборудовано компь-

ютером типа Notebook, один из которых имеет CD-дисковод для ввода картографической информации. Передаваемая с борта БПЛА информация может записываться на видеомагнитофон с речевыми комментариями операторов комплекса.

Наземные узконаправленные антенны имеют следящий привод для увеличения дальности радиосвязи при ограниченной мощности передатчиков.

С одной наземной станции может обеспечиваться управление полетом шести БПЛА одновременно, что значительно увеличивает зону наблюдения.

"Стриж-М" (НИИ ПФМ ХАИ, Украина) — перспективный образец малогабаритного БПЛА, общий вид (рис. 8) и характеристики которого представлены ниже.

Основные характеристики МЛА "СТРИЖ-М"-3

Масса взлетная	2 кг
Масса полезной нагрузки	0,5 кг
Скорость полета	70—110 км/ч
Продолжительность полета	до 1 ч
Радиус действия	10 км

Мини-БПЛА "Стриж-М" оснащен электрической силовой установкой и позволяет получать оперативную видеинформацию для передовых специальных подразделений. Изображение с бортовой телекамеры в реальном масштабе времени передается на монитор наблюдателя, видеомагнитофон и другие наземные средства (рис. 9, а, см. третью сторону обложки). Возможна установка двух телекамер для получения стереоскопического изображения зоны наблюдения (рис. 9, б).

Конструкция БПЛА выполнена из композиционных материалов и обеспечивает многократное применение БПЛА при низкой стоимости изготовления. Запуск осуществляется с помощью легкого ручного пускового устройства, посадка — под парашютом. Сборка БПЛА перед запуском максимально упрощена. Крыло крепится к фюзеляжу, проводится автоматизированная проверка борт-

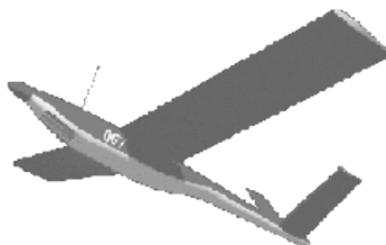


Рис. 8. МЛА "СТРИЖ-М"-3

вого оборудования, БПЛА ставится на пусковое устройство и он готов к полету.

Устойчивость видеоизображения обеспечивается собственной аэродинамической устойчивостью БПЛА и гирокопической системой стабилизации. В качестве полезной нагрузки используется цветная или черно-белая телекамера, работающая при низком уровне освещенности. Электрическая силовая установка обеспечивает простоту и надежность применения и не требует высокой квалификации обслуживающего персонала. Низкая акустическая, визуальная, тепловая и радиолокационная заметность обеспечивает возможность скрытного применения.

Pointer (Aero Vironment Inc., USA) — электрический малогабаритный дистанционно-пилотируемый летательный аппарат тактической разведки (рис. 10, см. третью сторону обложки), используемый в армии США. Оснащается средствами GPS и автонавигации, а также цветной или инфракрасной камерой, обеспечивающей передачу видеоизображений на пульт оператора, записывающее устройство или удаленный наземный приемный пункт в реальном времени. Запускается с руки, прост в управлении и не требует предварительной подготовки оператора. Основные технические характеристики:

- продолжительность полета 1,5 ч;
- полетная скорость 29...80 км/ч;
- радиус полета 8 км;
- посадка автоматическая, вертикальная;
- несущая конструкция. композит *Kevlar*;
- размах крыльев. 2,7 м;
- длина 1,8 м;
- средняя полетная масса. 3,6 кг;
- пустая масса 2,2 кг;
- масса аккумуляторных батарей . 1,0 кг;
- нагрузка до 0,9 кг;
- габаритные размеры и масса наземного устройства управления 175 × 275 × 400 мм; 7,8 кг;
- габаритные размеры и масса контейнеров для транспортировки 150 × 375 × 900 мм; (2 шт.) 8,8 кг.

Заключение

Обобщение результатов проведенного обзора позволяет выявить основные тенденции в развитии малогабаритных БПЛА:

1. Все более расширяющийся спектр возможных применений БПЛА, наряду с ужесточением требований, предъявляемых кенным устройствам в существующих сферах использования, создают тенденцию к микроминиатюризации БПЛА (рис. 11, см.

третью сторону обложки), массогабаритные характеристики которых могут варьироваться в диапазонах от десятков сантиметров и сотен граммов (для образцов мини-класса) до десятков миллиметров и сотен миллиграммов (для образцов микрокласса).

2. Микроминиатюризация БПЛА неразрывно связана с многократным усложнением проблемы их стабилизации ввиду резкого повышения восприимчивости малогабаритных аппаратов к воздействию внешних возмущений, что, в свою очередь, предопределяет тенденцию существенного расширения адаптивных возможностей бортовой системы управления.

3. Особенности функционирования и прикладного применения малогабаритных БПЛА существенно затрудняют использование человека-оператора (как объекта с малым быстродействием и существенным ограничением психофизиологических возможностей) в контуре управления устройства. Данная проблема вызывает явную тенденцию в перенесении части интеллектуальных функций человека-оператора в число реализуемых бортовой системой управления.

Современные достижения в сфере нанотехнологий, материаловедения, микросистемной техники [1, 2], а также в информационных технологиях и методах обработки знаний позволяют говорить о реальности перспектив разработки интеллектуальной бортовой системы управления [3, 4], обеспечивающей высокую степень адаптивности, автономности и надежности функционирования малогабаритных БПЛА в условиях неопределенности и воздействия внешних возмущений*.

Список литературы

1. Климов Д. М., Васильев А. А., Лучинин В. В., Мальцев П. П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 3—6.
2. Бочаров Л. Ю., Мальцев П. П. Состояние и перспективы развития микроэлектромеханических систем за рубежом // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 41—46.
3. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В. и др. Интеллектуальные системы управления беспилотными летательными аппаратами на основе комплексного применения технологий нечеткой логики и ассоциативной памяти // Авиакосмическое приборостроение. 2002. № 2. С. 29—42.
4. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Евстигнеев Д. В. Интеллектуальная система управления автоматической посадкой беспилотного летательного аппарата на основе комплексного применения технологии нечеткой логики // Новые методы управления сложными системами. Москва, Наука, 2004.

* В рамках поисковых исследований, проводимых на кафедре "Проблемы управления" МИРЭА, показана принципиальная возможность построения интеллектуальной системы управления, обеспечивающей реализацию автономного полета БПЛА на низких высотах с уклонением от препятствий, а также автоматическую посадку на неподготовленную площадку под контролем бортовой системы технического зрения.

Человек и нанотехнологии

Наноматериал графен — пленка толщиной в атом

Профессор Эндрю Гейм и его коллеги из университета Манчестера (США) совместно с командой доктора Новоселова из г. Черноголовка (Россия) впервые в мире сумели получить ткань толщиной в один атом. Новый наноматериал представляет собой "развернутую" нанотрубку. Это пленка из атомов углерода, составляющая одну молекулу. Журналисты окрестили новый наноматериал "двумерным", так как он толщиной в один атом углерода.

Новый материал назвали графеном (*graphene*). Профессору Гейму впервые удалось отделить атомарный слой от кристалла графита. При этом отделенные атомы сохранили связь друг с другом, образовав "заплатку" из ткани, толщиной в один атом. Исследователи назвали новый материал двухмерным фуллереном. Графен стабилен, очень гибок, прочен, и проводит электричество (рис. 1).

При такой толщине поперечник кусочка "ткани" в десять микрометров выглядит огромным, но ученые говорят, что нет никаких принципиальных ограничений для создания этих тканей размером в сантиметры.

Исследователи сосредоточились на изучении электрических свойств нового материала. С помощью графена ученые создали полевой транзистор, который работал при комнатной температуре в обычных условиях (рис. 2). Было также установлено, что электроны в транзисторе могут перемещаться на субмикрометровые дистанции без рассеивания, что очень важно для применения графена в микроэлектронных устройствах.

Авторы работы прочат графену большое будущее в новых материалах, а также — в суперкомпьютерах.

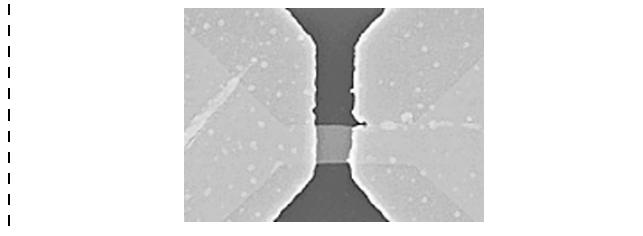


Рис. 2. Графеновый транзистор

ютерах будущего, где размеры логических схем будут уменьшены в миллионы раз.

Однако на сегодняшний день ученые могут производить графен кусочками размерами 10×10 мкм. Как сказал Гейм, "... когда мы научимся синтезировать графеновую пленку размерами в 10×10 дюймов, то только тогда можно будет говорить о том, что новый материал будет успешно применен в микроэлектронике".

Доктор Новоселов добавил, что "... сегодня многие исследователи производят нанотрубы все большей длины, поэтому и технологии по производству графена тоже будут развиваться".

Как ожидают исследователи, графен появится в промышленном применении через 10 лет.

Нанопокрытие NanoMATRIX для одежды

Японская компания *Toray Industries* заявила, что она создала новую технологию обработки тканей, которая позволяет наносить на каждый монофильмент ткани определенный наноматериал. Как заявило руководство компании, этот прорыв в производстве был достигнут благодаря новым достижениям в области самосборкиnanoструктур.

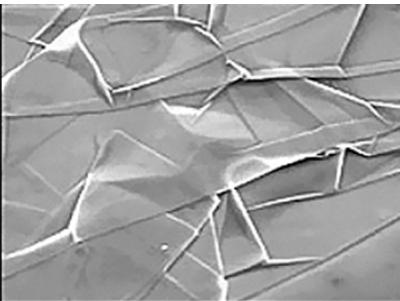
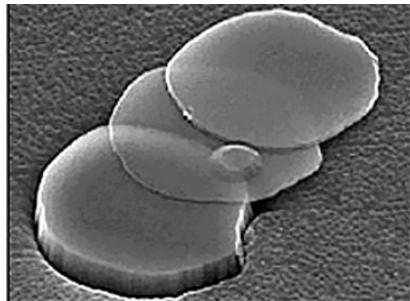
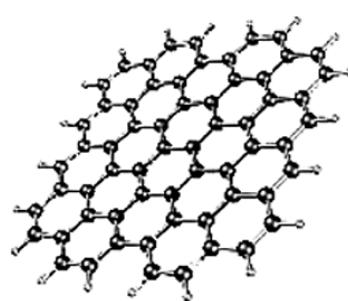


Рис. 1. Графеновая пленка — симуляция и микрофотография

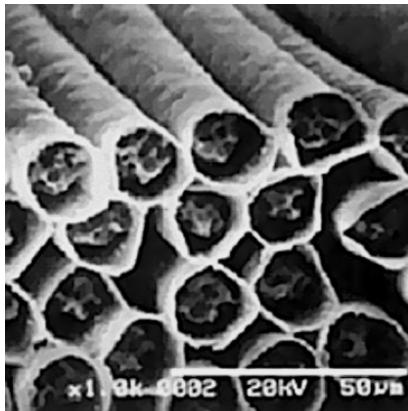


Рис. 3. СТМ изображение нанопокрытия "NanoMATRIX" отдельных монофиламентов полиэстера (видно, что каждое волокно находится в "трубочке" из нанопокрытия)

Новая технология обработки тканей "Nano-MATRIX" позволяет наносить на монофиламенты обрабатываемой ткани покрытие толщиной от 10 до 30 нм (рис. 3). Такого полного покрытия фильтров ткани на сегодняшний день было достичь невозможно, утверждает руководство. Современные текстильные технологии позволяют наносить покрытие в пространство между монофиламентами, или в участках пересечения волокон ткани.

Технология "NanoMATRIX" стала возможной благодаря нанотехнической самосборке. Исследователи изменяли окружающие условия (температуру, давление, электрическое поле и т. д.) для того, чтобы молекулы материала, который необходимо нанести на ткань, образовали покрытие на полистеровых монофиламентах.

При обработке ткани с помощью новой технологии отдельные монофиламенты не повреждаются, и текстура ткани не изменяется.

Как говорят специалисты из *Toray Industries*, новая технология не позволит растягиваться вещам, изготовленным из обработанной ткани. Также можно будет изготовить водоотталкивающие и антистатические ткани на основе уже использующихся материалов (хлопка, полиэстера).

Живое наноожерелье

Междисциплинарное открытие в области нанобиотехнологии сделали исследователи из Университета Калифорнии, США. Команда физиков и биологов разработала новый метод, с помощью которого можно будет производить наноматериалы для различных областей применения. Дальнейшее

развитие этого открытия может повлиять на способы доставки лекарств, энзимов и генного материала к органам и отдельным клеткам. Открытие также может служить основой биосенсоров, проводящих наноструктуры и оптических наноразмерных материалов. О своем исследовании ученые доложили в выпуске вестника Национальной академии наук от 16 ноября 2004 г.

Открытие было сделано благодаря сотрудничеству ученых Цируса Сафиньи, профессора в области материаловедения и физики, и Лесли Уильсона, профессора биохимии.

В своих экспериментах исследователи работали с микротрубками из тканей мозга коровы для того, чтобы понять, какие механизмы заставляют их формировать различные трехмерные образования. Микротрубки — полые цилиндры нанометровых размеров, входящие в состав цитоскелета клетки. В живой клетке микротрубки выполняют ряд полезных функций: от транспорта веществ внутри клетки до участия в ее делении. В нейронах микротрубки осуществляют транспорт нейротрансмиттеров. Нейротрансмиттеры — это молекулы, которые либо возбуждают, либо тормозят передачу нервных импульсов по нервной системе. Механизм сборки микротрубок в различные формации внутри клетки пока непонятен.

В представленной исследователями статье было описано открытие нового механизма самоорганизации микротрубок. Положительно заряженные линейные молекулы микротрубок формировали плотные гексагональные группы. При этом исследователи заранее знали, какие структуры будут формировать микротрубки. Но неожиданно оказалось, что в присутствии двухвалентных катионов микротрубки собирались в структуру, напоминающую ожерелье (рис. 4).

Сафинья и Уильсон пояснили, что полученное "живое ожерелье" — новый экспериментальный тип мембранны, в которой длинные микротрубки ориентированы в одном направлении, и могут проникнуть через клеточную мембрану обычной животной клетки. Ученые также отметили, что "ожерелье" очень динамично изменяет свою форму при повышении температуры. Поэтому его и называли живым.

Исследователи видят применение как для гексагонального пучка микротрубок, так и для живого "ожерелья". Металлизируя гексагональные структуры, например, можно получить материалы с изменяемыми оптическими параметрами.

Более интересное применение ожидает "ожерелье". Заключенный в двуслойную липидную мембрану набор микротрубок может нести внутри лекарство. А так как микротрубки являются одним из

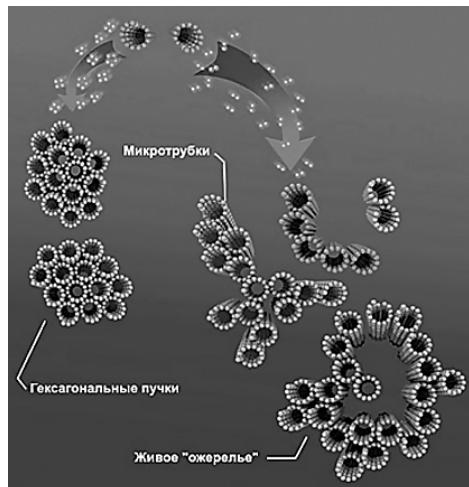


Рис. 4. Схематическое изображение самосборки микротрубок на нанометровом размере

компонентов живой клетки, то доставка лекарств внутрь отдельных клеток будет наиболее быстрой.

Ученые смогли провести это исследование благодаря новой рентгеновской технологии, совмещенной с электронно-лучевой и оптической микроскопией.

Компания TSMC объявила о промышленном выпуске чипов по 65-нанометровому техпроцессу к концу 2005 г.

Компания *Taiwan Semiconductor Manufacturing Co. Ltd.* (TSMC) запустит в массовое производство микроэлектронные компоненты по 65-нанометровому техпроцессу в конце 2005 г. Как сказал президент компании Моррис Чанг, развитие технологии массового производства по 65-нанометровому техпроцессу будет стоить компании около 1 млрд долл. Это вдвое больше, чем потрачено компанией TSMC на развитие 130-нанометрового техпроцесса, и больше на треть, чем на развитие производства по 90-нанометровому техпроцессу, сказал Чанг.

В этом году компания TSMC уже потратила около 400 млн долл. на развитие нового 65-нанометрового процесса. В начале 2004 г. компания создала тестовый SRAM чип с использованием этого техпроцесса. Как объявила компания, чипы, произведенные по новому техпроцессу, характеризуются низким энергопотреблением и высокой скоростью работы. Руководство компании также заявило, что промышленное производство по 65-нанометровой технологии с высокой скоростью

выпуска готового продукта начнется в первой половине 2006 г.

Компания TSMC уже около года разрабатывает технологии промышленного производства по 65-нанометровой технологии. Этому периоду предшествовали два года фундаментальных научно-прикладных исследований.

Чанг отметил, что компания сейчас ведет поиск партнеров для дальнейшего промышленного развития этой технологии. "Когда компания средней руки тратит десятки миллионов долларов на развитие новой технологии, это показатель выживаемости компании на международном рынке", — добавил Чанг.

Химики создали "крабовые клешни", захватывающие атомы мышьяка

Химики из Орегонского университета создали молекулярные "клешни", которые захватывают отдельные атомы мышьяка. О своем открытии исследователи сообщили в ноябрьском выпуске журнала *Angewandte Chemie International Edition*.

Даррен Джонсон, специалист в области супрамолекулярной химии, и его коллеги разработали молекулу, способную захватывать и связывать атомы мышьяка. Эти молекулы называются хелаторами (в переводе с греческого — "крабовые клешни"). Молекула хелатора имеет специальную структуру, напоминающую клешни краба. Благодаря такой особой конфигурации и структуре присоединительных мест на поверхности молекулы, несколько молекул способны захватывать и удерживать длительное время атом металла. Три молекулы, содержащие в качестве основного элемента серу, связываются с атомами мышьяка, образуя пирамидальную структуру. Ранее мы писали о планируемых молекулярных рецепторах, которые могут захватывать отдельные молекулы. Работа Джонсона и его коллег как нельзя лучше вписывается в развитие будущих нанорецепторов.

"Если усовершенствовать разработанный нами метод, то он пригодится для обнаружения и удаления токсичных металлов из организма человека или окружающей среды", — сказал Джонсон.

Пока что исследователи продемонстрировали, как хелаторы связывают атомы мышьяка в лабораторных условиях. Для того чтобы использовать хелаторы в клинической практике, необходимо разработать эффективный и надежный метод их последующего выведения из организма.

"Сейчас мы стараемся доказать, что наши "крабовые ловушки" первыми нейтрализуют мышьяк,

опережая отравление человеческого организма этим металлом", — говорит Джонсон.

Математическое моделирование хелаторов выявило некоторые особенности комплекса, содержащего мышьяк. Исследователи использовали математические методы *ab initio* для того, чтобы построить оптимальную модель хелатора.

"Сейчас мы работаем над разработкой более стабильных систем по захвату атомов мышьяка. Большинство расчетов мы ведем с помощью математического моделирования, что значительно сокращает время, необходимое для нахождения правильного решения", — комментирует работу учёных Джонсон.

Процесс самосборки предполагает соединение нескольких молекул в большую структуру благодаря геометрическим или физико-химическим особенностям собирающихся молекул. В результате этого процесса должно получиться соединение гораздо более стабильное, чем исходные "строительные блоки".

В основе построения модели молекулы хелатора и готового комплекса, содержащего атомы мышьяка, лежали два фундаментальных метода: магниторезонансная спектроскопия и рентгенография. Для определения структуры комплекса в первом приближении использовали магниторезонансное отображение (MRI), которое часто используется в медицинской диагностике. А для исследования атомарной структуры комплексов пришлось воспользоваться техникой рентгеноструктурного анализа.

Эта первичная фаза работы исследователей финансировалась грантом Орегонского университета.

Оптическая микроскопия для манипулирования нанотрубками

Исследователи из Калифорнийского университета, Риверсайд (США), использовали флуоресцентные квантовые точки для того, чтобы увидеть однослойную нанотрубку с помощью оптической микроскопии. Этот метод можно будет применить для облегчения сборки микро- и наносистемных устройств на основе нанотрубок.

"Исследования, связанные с манипулированием и построением систем из нанотрубок, теперь значительно упростятся, так как для визуализации можно будет использовать обычный оптический микроскоп", — сказал Майри Озка. — Использование оптической микроскопии значительно уменьшит стоимость проведения исследований, так как сейчас для подобных целей используют атомно-силовую и сканирующую электронную микроскопию".

В основе нового метода лежит нанесение на поверхность нанотрубок флуоресцентных квантовых точек на основе нанокристаллов CdSe—ZnS.

Нанесенные нанокристаллы флуоресцируют, что можно легко увидеть в обычный оптический микроскоп. Озка и его команда планируют в будущем исследовать полученные нанотрубки с помощью наноманипулятора.

О своей работе исследователи доложили в текущем выпуске *Nano Letters*.

Наноустройства ловят вирусы

За вирусами охотятся давно. Гарольд Крэйгхед и его коллеги из Корнельского университета построили в этом году микроскопический кантилевер для того, чтобы взвесить отдельный вирус. В этом месяце Чарльз Либер и его команда из Гарвардского университета создали биочип, который определяет присутствие вируса гриппа. Новый биочип можно использовать как в гражданских целях (использование в медицине), так и в военных (при выявлении следов бактериологического оружия).

Крэйгхед пошел по "механическому пути" — его команда построила наноэлектромеханическое устройство — кантилевер, которое может взвешивать объекты массой около 10–18 г. Весы состоят из вибрирующего кремниевого кантилевера длиной около 4 мкм и шириной 500 нм (рис. 5). Как только частица с малой массой попадает на кантилевер (он то и представляет собой чашу весов), это изменяет частоту его колебаний. Изменения вибрации измеряются лучом лазера, который направлен на кантилевер. Измерив вибрацию "чаши весов" с "грузом", исследователи могут установить его массу.

Для того чтобы на кантилевер попадали только вирусы, Крэйгхед покрыл его слоем антител, чувствительных к определенному виду вирусов. И когда "весы" поместили в жидкость, содержащую различные вирусы, то один из них прилип к кантилеверу. Так исследователи смогли поймать вирус и

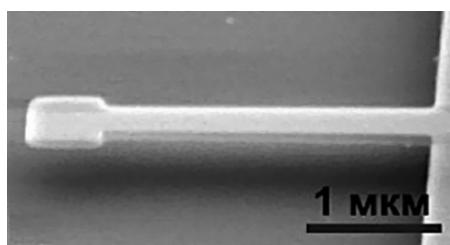
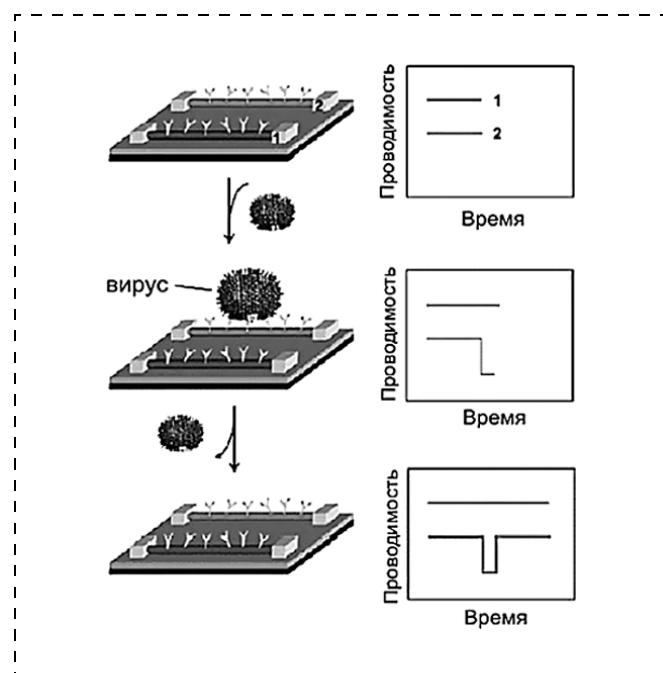
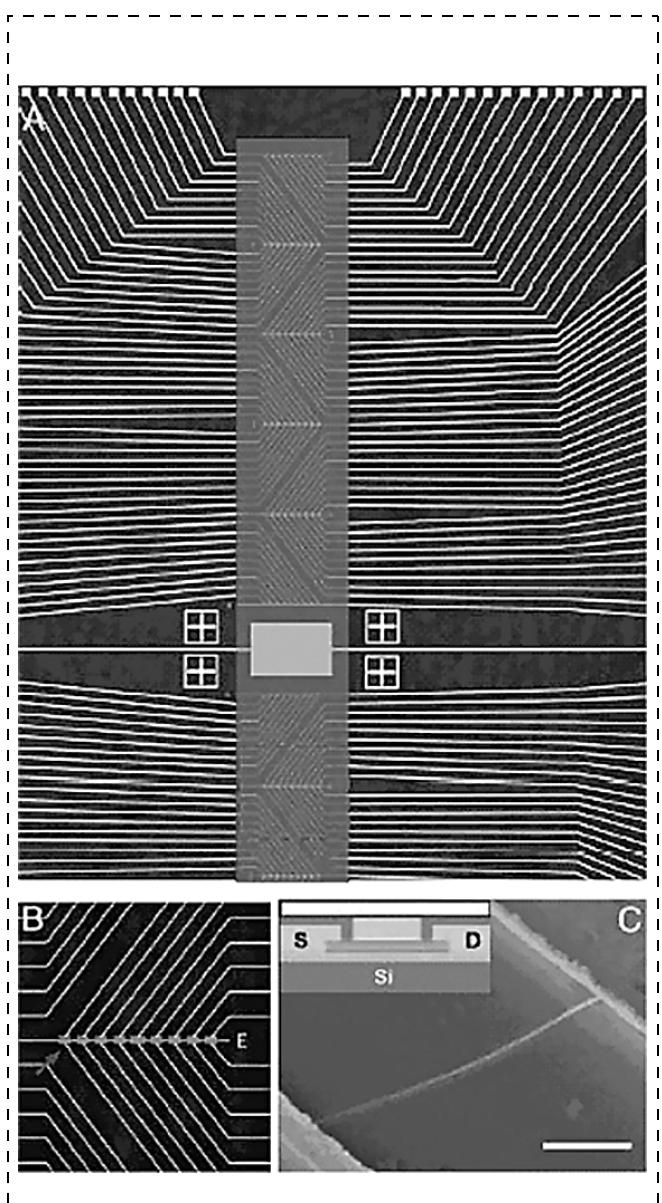


Рис. 5. Кремниевые "весы" — НЭМС кантилевер

взвесить его (*Appl. Phys. Lett.* 85 2604). "Чувствительность НЭМС достаточно высокая", — сказал Крэйгхед, — можно взвесить очень быстро даже один вирус".

Но это было в начале 2004 г. В конце сентября 2004 г. Либер и его команда на основе матрицы полевых транзисторов, состоящих из нанострун, сконструировали детектор вирусов, покрыв поверхность транзисторов антителами (*Proc. Nat. Acad. Sci.* 101 14017). Конструкция биочипа такова, что



вирусы могут попасть к детекторному блоку через сеть микрожидкостных каналов, которые дальше разветвляются и расположены таким образом, что пересекаются с нанотранзисторами (рис. 6).

Наноструны покрыты специальными антителями, которые соединяют определенный вид вируса. Так как в матрице много отдельных нанострун, то детектор может выявлять до 100 различных типов вирусов.

Биочип работает следующим образом: как только вирус попадает на соответствующее ему антитело, проводимость отдельной наноструны изменяется, и, соответственно, изменяется состояние транзистора (рис. 7). Это изменение определяют дальнейшие логические цепи, которые, в зависимости от номера нанотранзистора (1, 2 или другой) сигнализируют о наличии определенного вируса. Как мы говорили ранее, схема может определять до 100 различных вирусных частиц.

"Высокий коэффициент усиления нанотранзисторов и их чувствительность к присоединению вирусных частиц позволяют сделать вывод, что биочип сможет детектировать отдельные органические молекулы" — говорит Либер.

Исследователи из Гарварда продолжают эксперименты с биочипом для того, чтобы добиться определения нескольких типов вирусов или биомолекул одновременно. Как ни странно, ученые из Корнелла во главе с Крэйгхедом занимаются тем же — строят похожие биочипы.

Свидиненко Ю. Г.

E•X•P•O ELECTRONICA



8-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ
ВЫСТАВКА ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

8th INTERNATIONAL EXHIBITION FOR ELECTRONIC
COMPONENTS AND TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

5-8 АПРЕЛЯ / APRIL 2005
РОССИЯ, МОСКВА, СК "ОЛИМПИЙСКИЙ"
OLIMPIYSKIY COMPLEX, MOSCOW, RUSSIA

Совместно с / Incorporating:

electrontech ^{expo}

Организаторы / Organisers:
Тел./Tel.: +7(812)380-6007
380-6003, 380-6000
Факс/Fax: +7(812)380-6001
e-mail: electron@primexpo.ru



Соорганизатор / Co-organiser: Электронинтегр-С



PL3300003017

При официальной поддержке / The official support:



Министерство промышленности и энергетики Российской Федерации
Ministry of Industry and Energy of the Russian Federation
Министерство экономического развития и торговли Российской Федерации
Ministry of Economic Development and Trade of the Russian Federation
Министерство информационных технологий и связи Российской Федерации
Ministry of Information Technologies and Communications of the Russian Federation
Правительство Москвы
Moscow government

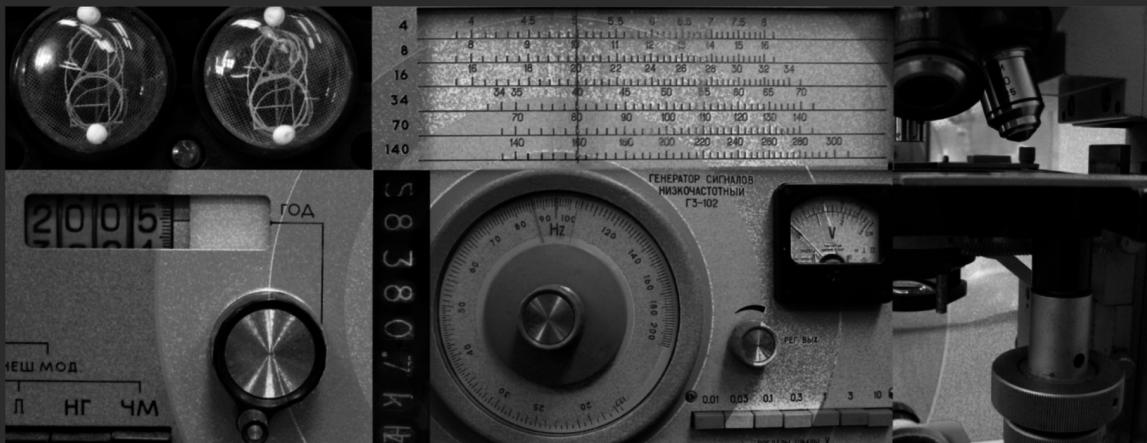
Информационные спонсоры / Information sponsors:



www.expoelectronica.ru



6-я Международная выставка ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И АВТОМАТИЗАЦИЯ



17-20 МАЯ 2005 / МОСКВА / СК "ОЛИМПИЙСКИЙ"

СОВМЕСТНО С:



Неразрушающий контроль
и техническая диагностика
в промышленности



Лабораторный
контроль в промышленности

ОРГАНИЗАТОРЫ:

Тел.: (812) 380 60 02/00
Факс: (812) 380 60 01
E-mail: mera@primexpo.ru



www.meratek.ru



17-20 МАЯ 2005
МОСКВА, СК "ОЛИМПИЙСКИЙ"

4-я Международная выставка и конференция **НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**



РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ:

- Акустическая эмиссия
- Ультразвуковой контроль
- Вихревоковый контроль
- Визуальный и оптический контроль
- Магнитопорошковый контроль
- Электромагнитный контроль
- Инфракрасный и термический контроль
- Динамический контроль твердости
- Вибрационный контроль
- Капиллярный контроль
- Течеискание
- Радиографический контроль
- Электрический контроль
- Радиационный контроль
- Контроль трубопроводов
- Обучение и сертификация персонала
- Аттестация лабораторий

СОВМЕСТНО С:



ЛАБОРАТОРНЫЙ КОНТРОЛЬ
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

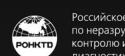


ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ
И АВТОМАТИЗАЦИЯ

ОРГАНИЗАТОРЫ:



Тел.: (812) 380 60 02/00
Факс: (812) 380 60 01
E-mail: ndt@primexpo.ru



Российское общество
по неразрушающему
контролю и технической
диагностике



www.primexpo.ru/ndt

CONTENTS

Gaponov S. V. <i>Extreme Ultraviolet Lithography — Future of the Nanoelectronics</i>	2
The questions of development of lithography with use of extreme ultraviolet radiation with length of the wave 13,5 nm are considered.	
Despotuli A. L., Andreeva A. V., Rambabu B. <i>Nanoionics of Superionic Conductors — the Basis for the Creation of Novel Devices for MST</i>	5
A new class of superionic conductors (SIC) — advanced superionic conductors (ASICs) with the activation energy of ionic conductivity $E \approx 0.1$ eV — is marked out. A new direction of nanoionics — nanoionics of ASICs — is proposed. Nanosystems of solid state ionic conductors are divided into two classes differing by opposite influence of surface layer disordering on ionic conductivity σ_i and E : I) nanosystems on the basis of compounds with an initially small σ_i (large values of E); II) nanosystems on the basis of ASICs (nano-ASICs). It is proposed that a fundamental challenge of nanoionics — conservation of fast ion transport (FIT) in nano-ASICs—should be solved by the creation of structure-ordered (coherent) ASIC/indifferent electrode (InEl) heteroboundaries. In the work for nano-ASICs are introduced: (i) a characteristic parameter $P = d/\lambda_Q$ (d — the thickness of a layer of ASIC with disordered crystal structures in the area of a heteroboundary, λ_Q — the screening length for mobile ions in the bulk of ASIC, and (ii) a criterion of the conservation of FIT. It is shown that in nano-ASICs at the leveling of Fermi levels, the contact potentials V at the ASIC/InEl coherent heterojunctions satisfy the condition $V \ll k_B T/e$. The possibility for the creation of nanoionic supercapacitors (NSC) with submicron sizes on the basis of ASIC/InEl coherent heterojunctions and specific capacity $\sim 10^{-4}$ F/cm ² , work frequencies $\sim 10^8$ — 10^9 Hz for a 5 Gbit capacitor DRAM, hybrid sources of energy and power of microsystem technology and wireless sensor networks is pointed out.	
Barhotkin V. A., Minakov E. I. <i>Intellectual Gauges of Vibration</i> .	14
In work necessity and some ways of intellectualization of gauges are considered (examined) by example of one of problem for gauges of vibration.	
Kosmodemyanskaya G. N., Sorokina S. I. <i>Features of Definitions of a Pressure Field in a Clearance at Driving Microcapsule in Pipes of a Small Diameter</i>	17
The field of pressure in a clearance is created at forward movement of the inclined microcapsule along an axis of a pipe of a small diameter with viscous liquid. The method of the equivalent equation, as one of analytical methods of the decision of the non-uniform equations of the second order in private derivative with variable factors is used.	
Starkov V. V. <i>Micro-Fabrication Using Oxidized Porous Silicon</i>	24
On an example of manufacturing of a matrix SiO ₂ -probes and silicon electrodes of micro-fuel cell elements the technology of micro-fabrication with application oxidized macroporous silicon is offered.	
Landyshev A. V., Lavrentyev A. A., Landyshev V. A. <i>Electron-Probe Researches of Micromodular, Thermoelectric Blocks</i>	28
Electron-probe methods were used to research of chemical interaction on contacts of micromodular thermoelectric blocks on the basis of alloys of structure Bi ₂ Se _{0,3} Te _{2,7} and Bi _{0,48} Sb _{1,52} Te ₃ . Products of interaction and kinetic parameters of their growth are determined. It is shown, that chemical interaction creates conditions for evolution of cracks in contacts and to growth of internal electric resistance of the block. On the basis of the received data the forecast of its durability and reliability is done.	
Shilov I. P., Grigorjants V. V., Kochmarev L. Ya., Klyuchnik N. T., Jakovlev M. Ya. <i>High Aperture Optical Fiber Structures Based on Silica Doped by Fluorine Produced in Microwave Plasma at Low Pressure</i>	33
Optical fiber structures (SiO ₂ -F/SiO ₂ -composition) with high numerical aperture up to 0,30 produced in the microwave plasma at low pressure are examined. The waveguide type H ₁₀ -mode microwave plasmotron as a plasma source is used. Some properties of the high aperture preforms and lightguides based on silica doped by fluorine are investigated. The main applications of these structures are presented.	
Darintsev O. V., Migranov A. B. <i>The Manipulation Microrobototechnical Systems and Problems of Manufacture Hybrid MEMS</i>	38
Questions of use manipulation microrobototechnical systems for assembly and packing hybrid microsystems are considered. The basic problems of manufacture MEMS into which touch, control, executive and information functions are integrated are described. The brief analysis of a modern condition of microassembly technologies is given. Features of realization of known microtechnological systems are generalized.	
Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Gartsev I. B., Koliadin K. S. <i>The Trends in the Mini- and Micro- class Unmanned Aerial Vehicle Development</i>	44
The article presents a survey of the existing and promising models of compact UAVs, together with an analysis of the major trends and problems in their development.	

For foreign subscribers:

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

The journal bought since november 1999.

Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev

ISSN 1813-8586.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(095) 269-5510.

E-mail: it@novtex.ru; http://www.microsystems.ru

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

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства

в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

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

Сдано в набор 01.12.2004. Подписано в печать 14.01.2005. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,0. Заказ 159. Цена договорная

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