

# НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 12 ✧ 2006

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Издается с 1999 г.

## Главный редактор

Мальцев П. П.

## Зам. гл. редактора

Лучинин В. В.

## Редакционный совет:

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

## Редакционная коллегия:

Абрамов И. И.  
Антонов Б. И.  
Астахов М. В.  
Быков В. А.  
Волчихин В. И.  
Гоев А. И.  
Горнев Е. С.  
Градецкий В. Г.  
Гурович Б. А.  
Журавлев П. В.  
Захаревич В. Г.  
Кальнов В. А.  
Карякин А. А.  
Квардаков В. В.  
Кузин А. Ю.  
Мокров Е. А.  
Норенков И. П.  
Панич А. Е.  
Панфилов Ю. В.  
Петросянц К. О.  
Петрунин В. Ф.  
Путилов А. В.  
Пятьшев Е. Н.  
Сауров А. Н.  
Сухопаров А. И.  
Телец В. А.  
Тодуа П. А.

## Отв. секретарь

Лысенко А. В.

## Редакция:

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

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Бочаров Л. Ю., Иванов А. А., Мальцев П. П. О зарубежных программах по военной нанотехнологии. Часть 1 . . . . . 2  
Новиков Ю. А., Раков А. В., Тодуа П. А. Нанометрология в нанотехнологиях . . . . . 11

### МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

Желонкин А. И. Молекулярно-электронные преобразователи неэлектрических сигналов нанометрового уровня . . . . . 20  
Хворостов С. А. Влияние автономного микроробота "Электронный нормализатор" на состояние углеводного и липидного обмена у больных сахарным диабетом . . . . . 26

### МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Козаков А. Т., Никольский А. В., Еремкин В. В., Смотрakov В. Г. Поляризационные явления в материалах с метастабильной электрической поляризацией в свете эффекта аномальной электронной эмиссии . . . . . 29  
Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Сборка гибридных МЭМС на основе трехмерной реконструкции состояния технологической среды. . . . . 36

### ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

Аристов В. В., Мордкович В. Н., Мальцев П. П. Технология "кремний-на-изоляторе" в микросистемной технике . . . . . 41  
Агейченко А. С., Точицкий Я. И., Васильев А. А., Есьман В. М. Точность процессов фотолитографии и фотолитографического оборудования . . . . . 47

### СИСТЕМЫ-НА-КРИСТАЛЛЕ

Аржадеева Е. А., Моисеев П. Д., Малых В. Н. Программируемый широкодиапазонный формирователь импульсов в измерительной технике по технологии "система-на-кристалле" . . . . . 52

### ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Косцов Э. Г., Камышлов В. Ф. Микроэлектромеханические быстродействующие микроклапаны . . . . . 57  
Лукьянов В. В. Бесплатформенная интегрированная навигационная система на базе MEMS-чувствительных элементов . . . . . 60

### СПРАВОЧНЫЕ СТРАНИЦЫ

Яшин К. Д., Лацапнёв Е. В. Англо-русский терминологический справочник по микро- и наносистемной технике . . . . . 65

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ . . . . . 66

ИНФОРМАЦИЯ. . . . . 69

Указатель статей, опубликованных в журнале "Нано- и микросистемная техника" за 2006 г. . . . . 69

Contents . . . . . 72

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

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

**Л. Ю. Бочаров**, канд. техн. наук,  
ИПИ РАЕН,  
**А. А. Иванов**, канд. техн. наук,  
Минобороны,  
**П. П. Мальцев**, д-р техн. наук, проф.,  
МИРЭА

## О ЗАРУБЕЖНЫХ ПРОГРАММАХ ПО ВОЕННОЙ НАНОТЕХНОЛОГИИ.

### Часть 1

*Рассматриваются объемы инвестиций в нанотехнологии для военных целей, выделяемые мировыми лидерами в этой области — США и Японией, где сконцентрировано более половины мирового объема инвестиций.*

Проблемы, относящиеся к развитию нанотехнологий, занимают в настоящее время доминирующее положение практически во всех областях современной науки и техники. Нанотехнология определяется как техника создания, изготовления, характеристики и реализации материалов и функциональных структур и устройств на атомном, молекулярном и нанометровом уровнях.

Ключевыми в развитии нанотехнологий явились открытия последней половины XX века, связанные с квантовыми свойствами нанобъектов, разработкой полупроводниковых транзисторов и лазеров, созданием методов диагностики с атомным разрешением (электронная и сканирующая туннельная микроскопия), открытием фуллеренов, развитием геномики и биотехнологий. Наиболее серьезные прорывы в нанотехнологии ожидаются в связи с переходом от традиционных технологий получения макрообъектов при уменьшении размеров макроскопических объектов ("сверху — вниз") к технологиям молекулярной и поатомной сборки нанобъектов и наноматериалов ("снизу — вверх"). Эволюционно-интеграционные процессы в развитии основных областей наук показаны на рис. 1.1 (см. третью сторону обложки).

По многим прогнозам именно развитие нанотехнологий определит облик XXI века, подобно тому, как открытие атомной энергии, изобретение лазера и транзистора определили облик XX столетия.

Поэтому неслучайно, что ежегодные мировые объемы инвестиций в нанотехнологии уже исчисляются миллиардами долларов и имеют устойчивую тенденцию к росту. По данным агентства *Venture Analytics*, мировой объем инвестиций в сферу нанотехнологий в 2003 г. оценивается в ~5,5 млрд долл.

Надо отметить, что в отечественной и зарубежной литературе часто приводятся и более высокие цифры — 7,5 млрд долл. (за 2003 г.). За период 1976—2003 гг. в области нанотехнологии было зарегистрировано ~85—90 тыс. патентов (из них 64 % — патенты США). Практически весь мировой объем (~90 %) инвестиций в нанотехнологии сконцентрирован в 14 странах: США, Японии, Великобритании, Австралии, Германии, Израиле, Индии, Китае, Канаде, Южной Корее, Франции, Финляндии, Сингапуре, Тайване. В большей части этих стран доля государственных расходов на работы по развитию нанонауки и нанотехнологий превышает 50 % общего объема их финансирования в стране (рис. 1.2, см. третью сторону обложки). Ежегодные темпы роста объемов финансирования нанотехнологических работ в мире, по данным Национального научного фонда США (NSF), могут составлять 1,0—1,5 млрд долл. в год. Быстрый рост вложений в нанотехнологии обусловлен фактом наличия существенного прогресса этой области исследований и разработок. В интересах планирования НИОКР и прогнозирования развития в 2003 г. NSF фактически интегрировал (естественно, что терминологически) области наноматериалов, нанoeлектроники, наносистем и МЭМС-изделий. В рамках такого объединения были получены оценки, свидетельствующие о том, что объем американского рынка нанотехнологий к 2015 г. достигнет 1 трлн долл. Патентная служба США (*US Patent and Trademark Office*) в октябре 2004 г. открыла новый класс — Class 977 — специально для патентов в области нанотехнологий. В соответствии с определением Патентной службы США к нанотехнологическим изделиям относятся устройства с размерами (или одним из габаритных размеров) от 1 до 100 нм, и этот размер должен быть существенным для патентуемых функций. Это означает, что даже если некоторые компоненты, например МЭМС-устройства, могут быть отнесены к нанотехнологическим, то в целом МЭМС-устройство может и не соответствовать этим требованиям.

#### **Историческая справка**

*Еще 75 лет назад российский физик-теоретик Георгий Гамов впервые получил решение уравнений Шредингера, описывающее возможность преодоления частицей энергетического барьера в случае, когда ее энергия меньше его высоты. Новое явление, называемое "туннелированием", позволило объяснить многие экспериментально наблюдавшиеся процессы. Найденное решение было применено для описания процессов, происходящих при вылете частицы из ядра, составляющих основу*

атомной науки и техники, в том числе нанотехнологии. Развитие электроники привело к использованию процессов туннелирования лишь почти 30 лет спустя, в середине 50-х годов, когда появились туннельные диоды, открытые японским ученым Л. Есаки, ставшим Нобелевским лауреатом. Еще через 5 лет Ю. Тиходеев, руководитель сектора физико-теоретических исследований в московском НИИ "Пульсар", предложил первые расчеты параметров и варианты применения приборов на основе многослойных туннельных структур, позволяющих достичь рекордных по быстродействию результатов. В середине 70-х годов они были успешно реализованы. Однако отцом нанотехнологий считают американского физика Ричарда Фейнмана, высказавшего в 1959 г. мысль, что "принципы физики... не говорят о невозможности манипулирования веществом на уровне атомов". Конечно, подобные идеи существовали и ранее, но среди ученых такого ранга (в 1965 г. Р. Фейнману присуждена Нобелевская премия) он был первым, кто указал на это. Но уровень развития науки и техники 50-х годов не позволял обсуждать всерьез возможное целенаправленное влияние на отдельные атомы.

Перелом наступил после изобретения в 1981 г. Г. Бинингом и Г. Рорером, учеными из швейцарского отделения ИВМ, сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) — прибора, дающего возможность воздействовать на вещество на атомарном уровне. В 1986 г. был создан атомно-силовой микроскоп (АСМ), позволяющий, в отличие от туннельного, осуществлять взаимодействие не только с проводящими, но с любыми материалами. С помощью туннельного микроскопа стало воз-

можным "подцепить" атом и поместить его в нужное место, т. е. манипулировать атомами, а следовательно, непосредственно собирать из них любой предмет, любое вещество. С 1994 г. начинается применение нанотехнологических методов в промышленности.

Мировыми лидерами по объемам государственных инвестиций в нанотехнологии являются США и Япония. В этих странах сконцентрировано ~47—49 % мирового объема инвестиций (рис. 1.3).

Надо заметить, что в США давно оценили перспективность государственных вложений в развитие нанотехнологий. Еще в начале 90-х годов эта область разработок получила статус государственного приоритетного направления развития науки и техники. Например, еще в 1995 г. в рамках программ фундаментальных исследований Министерства обороны США (см. *Basic Research Plan, DoD, February 1996*), работы в области наноауки были выделены в отдельное приоритетное направление (*Strategic Research Objectives (SRO)*, ныне — *Strategic Research Area (SRA)*). В Японии крупномасштабные и долгосрочные нанотехнологические проекты были развернуты в 1992 г.

Государственные расходы на наноауку и нанотехнологии в 1997 г. составили (в млн долл.): 116 (США, из них 27 % в интересах Министерства обороны), 128 (Япония), 120 (Западная Европа). Как результат таких крупных инвестиций, к началу 2000 г. США заняли лидирующие позиции в области формирования и сборки наноструктур, разделяя с Европой лидерство в создании наноструктурных покрытий и наномасштабной биологии. Япония же достигла первенства в области разработок на-

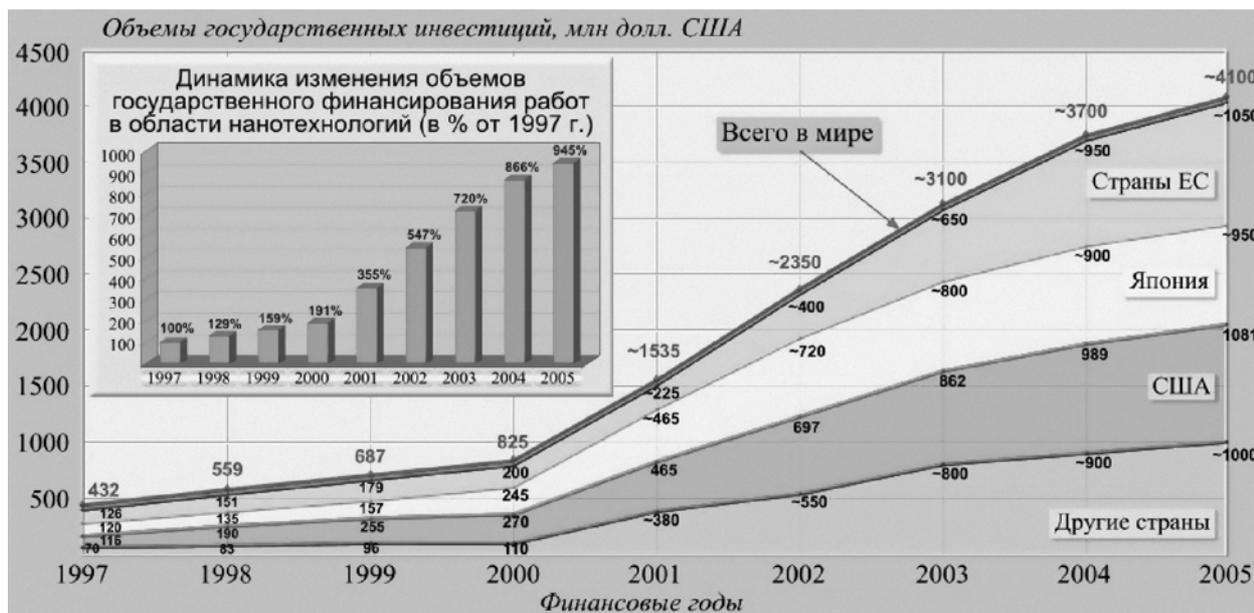


Рис. 1.3. Мировые объемы государственного финансирования работ в области нанотехнологий

ноприборов и наноструктурных материалов повышенной прочности.

Учитывая возрастающую роль нанотехнологий в мировом научно-техническом прогрессе, в 2000 г. конгресс США одобрил крупную государственную (межведомственную) программу "Инициатива в области нанотехнологий — *National Nanotechnology Initiative*" (NNI). Данной государственной программой был запланирован комплекс исследований и разработок (*Research & Development*) на период 2001—2008 фин. гг. Объемы финансирования работ по этапам программы представлены на рис. 1.4 (два этапа программы: 2001—2004 фин. гг. и 2005—2008 фин. гг.). На первом этапе государственная программа NNI объединяла работы 15 министерств и ведомств (агентств). Из них 10 государственных структур имели целевое бюджетное финансирование на проведение исследований и разработок в рамках NNI.

Общий объем ассигнований, выделенных на реализацию I этапа программы NNI (2001—2004 фин. гг.) составил 2848,7 млн долл., из них в интересах Министерства обороны США было израсходовано ~506,8 млн долл. (~18 %). Распределение объемов ассигнований, выделенных на реализацию I этапа программы NNI, представлено на рис. 1.5. Запланированные бюджетные расходы на реализацию II этапа программы составляют ~4504,5 млн долл., что в 1,6 раза превышает объемы финансирования I этапа.

#### Примечание

В конце 2003 г. Конгрессом и президентом США была одобрена программа финансирования исследований и разработок в области нанотехнологий ("*US 21st Century Nanotechnology Research and Development Act*") на период 2004—2008 фин. гг. В ней было определено, что Министерство обороны осуществляет финансирование исследований и разработок в области нанонауки и нанотехнологий в рамках своего бюджета НИОКР, а Министерство здраво-

охранения проводит комплекс работ в рамках отдельной целевой программы (в соответствии с *NIH Roadmap*).

Основными задачами исследований и разработок в рамках II этапа программы NNI (*National Nanotechnology Initiative — Strategic Plan, December 2004*) являются следующие.

**Задача № 1.** Реализация программы мирового класса, направленной на максимально полное использование потенциала, имеющегося в области нанотехнологий. В программе NNI выделяют следующие категории проектов исследований и разработок:

- ведомственные исследования и разработки, проводимые по заказам одного заказчика (министерства или агентства);
- межведомственные исследования и разработки, проводимые в рамках сформированной кооперации заказчиков (*Nanoscale Interdisciplinary Research Teams*). Доля таких работ составляет ~20 % от общего объема финансирования программы NNI;
- междисциплинарные исследования и разработки, проводимые силами специализированных государственных научно-исследовательских организаций (институтов, центров и лабораторий).

**Задача № 2.** Содействие эффективному внедрению новых нанотехнологий во все сферы экономики.

**Задача № 3.** Развитие системы образования в сфере нанотехнологий, подготовка высококвалифицированных кадров и расширение производственной инфраструктуры.

**Задача № 4.** Поддержка наиболее важных (экономически оправданных) разработок в области нанотехнологий.

В интересах решения поставленных задач выделено семь следующих научно-технологических направлений работ (*Program Component Areas — PCAs*):

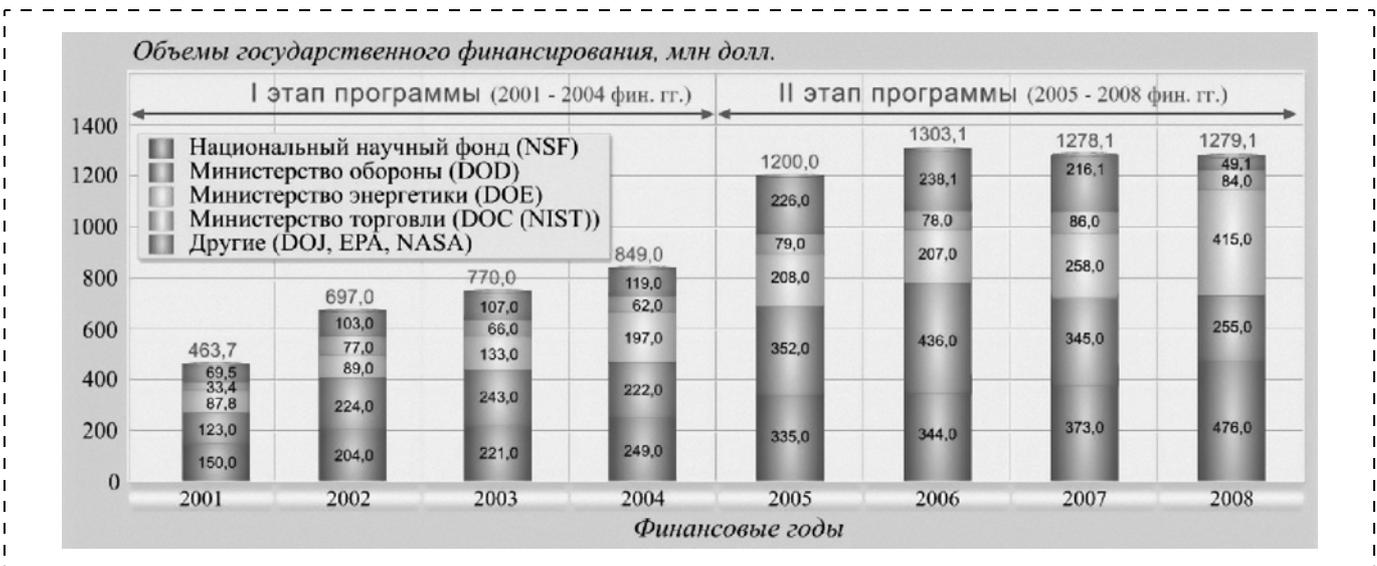


Рис. 1.4. Объемы финансирования программы NNI

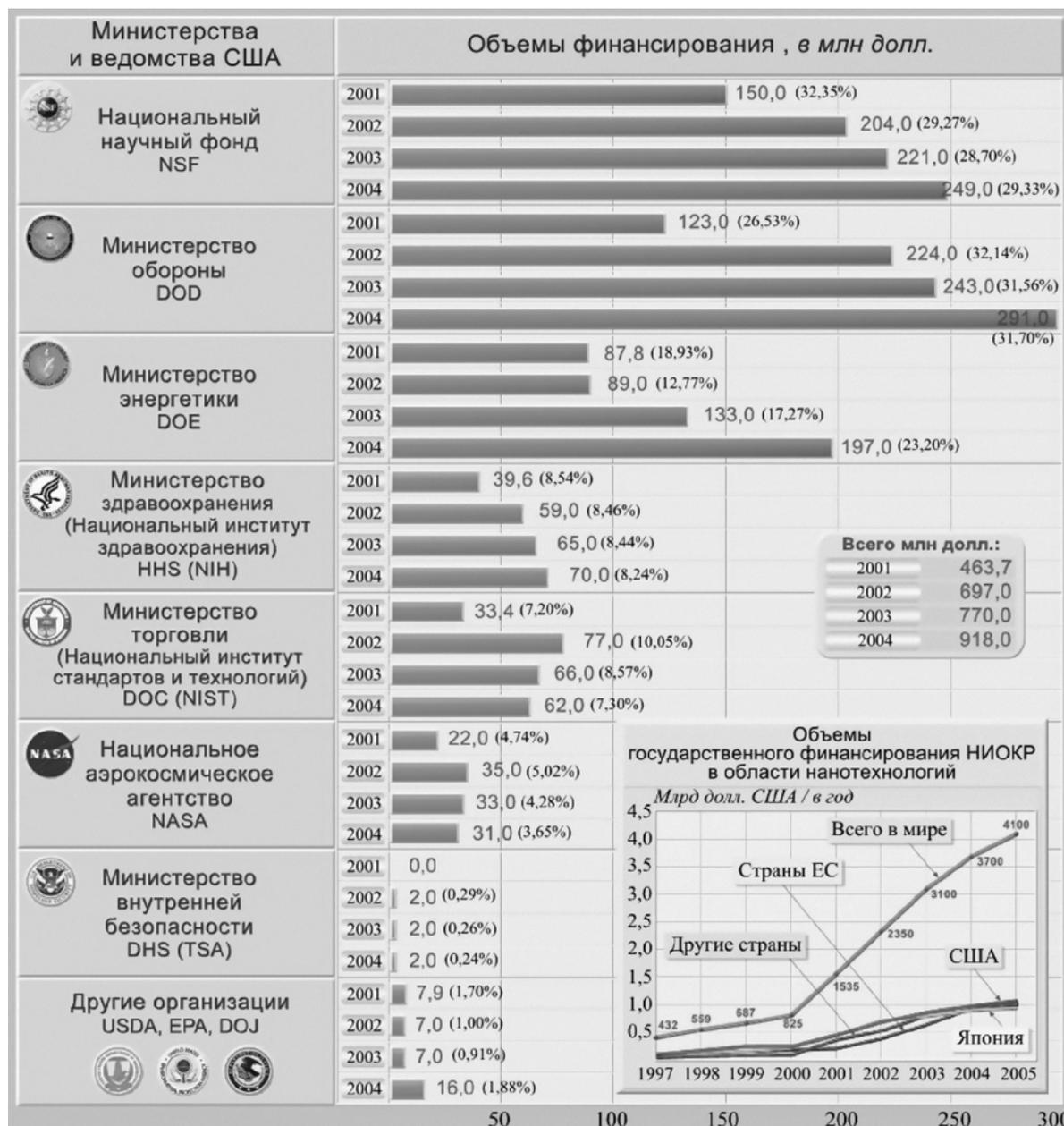


Рис. 1.5. Распределение объемов финансирования I этапа программы NNI по основным заказчикам исследований и разработок

1. Фундаментальные исследования в области наноауки (наномасштабные явления и процессы). Работы финансируются по статье бюджета "Basic Research — Фундаментальные исследования".

2. Наноматериалы (полупроводниковые наноструктуры, фотонные кристаллы, магнитные наноструктуры, молекулярные наноструктуры, фуллереноподобные материалы). Работы финансируются в рамках бюджетной статьи "Прикладные исследования и разработки".

3. Наноразмерные устройства и приборы (наносистемы и наноэлектроника). Работы финансируются в рамках бюджетной статьи "Прикладные исследования и разработки".

4. Научно-экспериментальная база, метрологи-

ческое обеспечение и стандартизация в области нанотехнологий.

5. Исследования по развитию технологической базы производства наноизделий.

6. Приобретение инструментов, приборов и технологического оборудования (для специализированных государственных научно-исследовательских учреждений).

7. Нанотехнологические исследования в интересах обеспечения социальных программ.

Взаимосвязь между задачами и научно-технологическими направлениями работ представлена в табл. 1.1.

Запланированное на 2006 фин. г. распределение объемов финансирования работ по научно-техни-

Взаимосвязь программных задач NNI и научно-технологических направлений работ

Научно-технологические направления NNI	Программные задачи NNI			
	Задача № 1	Задача № 2	Задача № 3	Задача № 4
Фундаментальные исследования в области нанонауки (наномасштабные явления и процессы)	Критическая важность	Вторичная важность	Первичная важность	Вторичная важность
Нanomатериалы (полупроводниковые наноструктуры, фотонные кристаллы, магнитные наноструктуры, молекулярные наноструктуры, фуллереноподобные материалы)	Критическая важность	Вторичная важность	Вторичная важность	Вторичная важность
Наноразмерные устройства и приборы (наносистемы и наноэлектроника)	Первичная важность	Критическая важность	Вторичная важность	Вторичная важность
Научно-экспериментальная база, метрологическое обеспечение и стандартизация в области нанотехнологий	Вторичная важность	Критическая важность	Вторичная важность	Вторичная важность
Исследования по развитию технологической базы производства наноизделий	Вторичная важность	Критическая важность	Первичная важность	Первичная важность
Приобретение инструментов, приборов и технологического оборудования (для специализированных государственных научно-исследовательских учреждений)	Первичная важность	Первичная важность	Критическая важность	Вторичная важность
Нанотехнологические исследования в интересах обеспечения социальных программ	Вторичная важность	Вторичная важность	Первичная важность	Критическая важность

ческим направлениям программы NNI 2 этапа представлено на рис. 1.6.

На период до 2008 г. основными заказчиками исследований и разработок в области нанонауки и нанотехнологий являются (рис. 1.7):

- ♦ Национальный научный фонд (*National Science Foundation — NSF*). На период 2005—2008 фин. гг. запланированный в рамках NNI объем финансирования составляет ~1,528 млрд долл. В 2006 фин. г. бюджет НИОКР в области нанонауки и нанотехнологий составляет ~344 млн долл.
- ♦ Министерство обороны (*Department of Defense — DOD*). Запланированный на период 2005—2008 фин. гг. объем финансирования исследований и разработок в области нанонауки и нанотехнологий составляет ~1,388 млрд долл. Начиная с 2004 фин. г., объемы финансирования нанотехнологических работ военного ведомства определяются в рамках собственного бюджета НИОКР (вне программы NNI). В 2006 фин. г. бюджет НИОКР в области нанонауки и нанотехнологий составляет ~436 млн долл.
- ♦ Министерство энергетики (*Department of Energy — DOE*). В рамках II этапа NNI запланировано выделение ассигнований в размере ~1,088 млрд долл. В 2006 фин. г. бюджет НИОКР в области нанонауки и нанотехнологий составляет ~207 млн долл.
- ♦ Министерство торговли. Работы координирует и заказывает Национальный институт стандартов и технологий (*National Institute of Standards and Technology — NIST*). На период 2005—2008 фин. гг. запланированный в рамках NNI объем финансирования составляет ~327 млн долл. В 2006 фин. г. этому министерству на проведение НИОКР в области нанонауки и нанотехнологий запланировано выделить ~78 млн долл.
- ♦ Национальное аэрокосмическое агентство (*National Aeronautics and Space Administration — NASA*). Планом II этапа NNI предусмотрено выделение ассигнований в размере ~162,3 млн долл. В 2006 фин. г. бюджет НИОКР Министерства здравоохранения в области нанонауки и нанотехнологий составляет ~50 млн долл.



Рис. 1.6. Распределение бюджетных ассигнований, запланированных на 2006 фин. г.

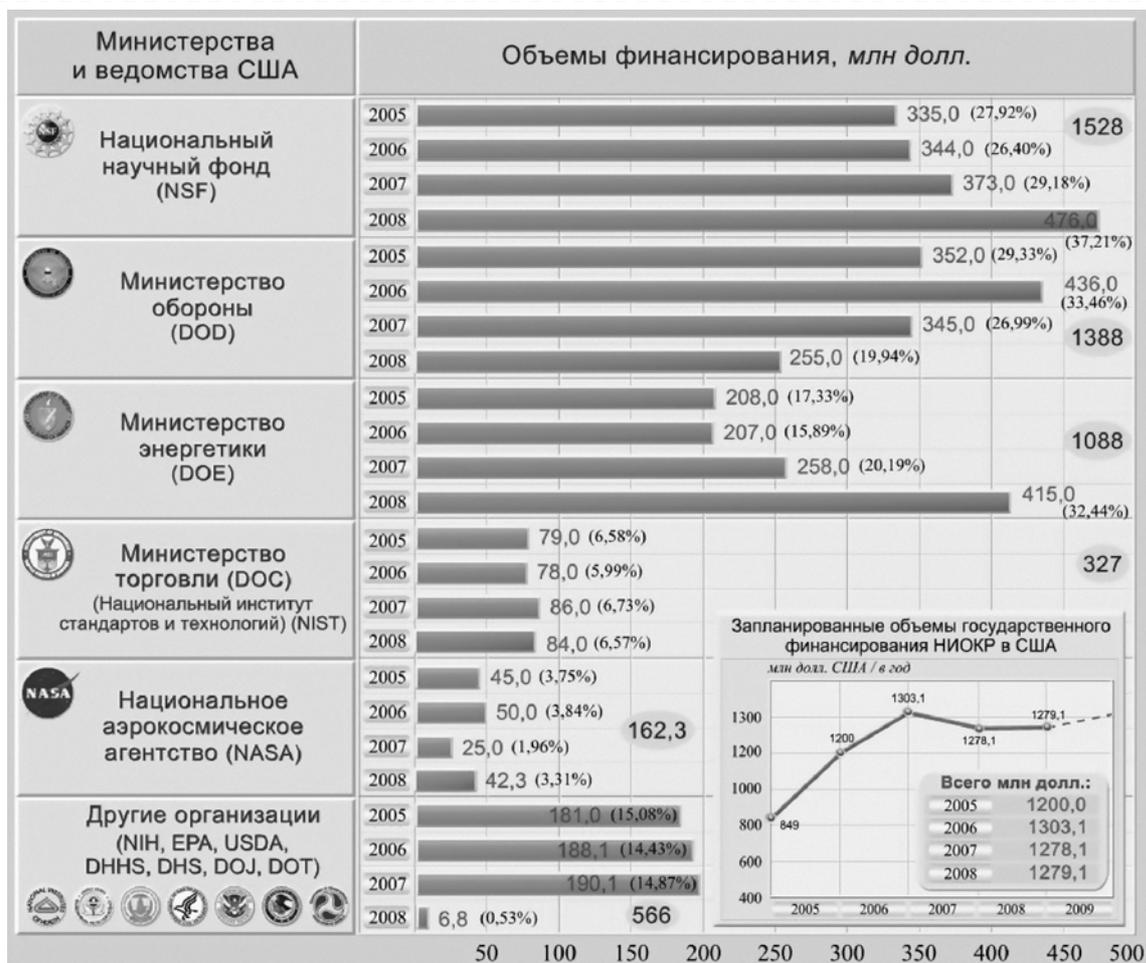


Рис. 1.7. Распределение запланированных объемов финансирования исследований и разработок в области нанотехнологий

- ◆ Национальный институт здравоохранения (*National Institutes of Health* — NIH) координирует и заказывает работы. Объемы финансирования работ определяются отраслевой программой. В 2006 фин. г. бюджет НИОКР Министерства здравоохранения в области наноауки и нанотехнологий составляет ~172 млн долл.
- ◆ Министерство внутренней безопасности (*Department of Homeland Security* — DHS) ведет работы в области нанотехнологий.

Доля ассигнований, выделяемых Министерству обороны США, составляет ~18–22 % от общего объема государственных инвестиций в развитие наноауки и нанотехнологий. До 95–96 % из этих средств выделяется на проведение исследований и разработок (научно-технические направления 1, 2, 3). Распределение по научно-техническим направлениям (программным областям) работ военного ведомства США представлено в табл. 1.2 (в млн долл.).

В рамках Министерства обороны США заказчиками исследований (фундаментальных и прикладных) и технологических разработок в области нанотехнологий являются: Армия США, ВМС США, ВВС США, Управление перспективных исследова-

Таблица 1.2

**Характеристика объемов финансирования Министерством обороны США работ в области нанотехнологий, млн долл.**

Научно-технические направления (программные области — PCA)	Финансовые годы			
	2004	2005	2006	Итого
1. Фундаментальные исследования в области наноауки (наномасштабные явления и процессы)	51	34	35	120
2. Наноматериалы (полупроводниковые наноструктуры, фотонные кристаллы, магнитные наноструктуры, молекулярные наноструктуры, фуллереноподобные материалы)	98	98	83	279
3. Наноразмерные устройства и приборы (наносистемы и наноэлектроника)	120	113	99	332
4. Научно-экспериментальная база, метрологическое обеспечение и стандартизация в области нанотехнологий	8	3	3	14
5. Исследования по развитию технологической базы производства нанопроизведений	2	1	2	5
6. Приобретение инструментов, приборов и технологического оборудования (для специализированных государственных научно-исследовательских учреждений)	10	6	6	22
7. Нанотехнологические исследования в интересах обеспечения социальных программ	2	2	2	6
<b>Итого</b>	<b>291</b>	<b>257</b>	<b>230</b>	<b>778</b>

ний и разработок Министерства обороны США (DARPA).

Типовое распределение объемов финансирования исследований (фундаментальных и прикладных) и разработок в области нанонауки и нанотехнологий по заказчикам Министерства обороны США (статьи бюджета Министерства обороны 6.1, 6.2, 6.3) показано на рис. 1.8.

Надо отметить, что в США принято различать понятия "нанонаука" (*Nanoscience*) и "нанотехнология" (*Nanotechnology*). Нанонаука, объединяя в себе наноэлектронику, наномеханику, наноматериалы и основываясь на достижениях в различных областях естественных наук (прежде всего в таких областях, как физика, химия, биология, математика и информатика), обеспечивает появление и развитие нанотехнологий. Государственное финансирование исследований в области нанонауки осуществляется в рамках бюджетной категории "фундаментальные исследования" (*Basic Research*, для Министерства обороны США — бюджетная статья 6.1). Доля фундаментальных исследований в общем объеме средств, выделяемых военному ведомству США на проведение работ в области нанотехнологий, составляет ~14—15%. Отметим, что на проведение фундаментальных исследований в интересах Министерства обороны США ежегодно выделяется ~1,4—1,5 млрд долл. В этом объеме доля расходов на исследования в области нанонауки составляет ~2,2—2,3%. В настоящее время работы в области нанонауки относятся к одному из шести стратегических (приоритетных) направлений развития фундаментальных исследований в интересах Министерства обороны США.

Рис. 1.9 иллюстрирует точную структуру Плана фундаментальных исследований МО США (т. е.

официального документа, публикуемого в Министерстве обороны США раз в два года). В правой стороне рисунка представлены приоритетные направления фундаментальных исследований (*Strategic Research Area — SRA*), а в левой стороне — области фундаментальных исследований (в соответствии с этим же Планом). Цифры в правой стороне (в кружках) означают номер области, т. е. показана взаимосвязь приоритетных направлений (SRA) с областями фундаментальных исследований (физика, химия и т. д.).

Приоритетные направления (*Strategic Research Area*) определяются Планом фундаментальных исследований Министерства обороны США, который, как правило, издается один раз в два года (последняя редакция плана — *DoD Basic Research Plan, February 2005*). Типовые объемы финансирования работ в рамках приоритетных направлений фундаментальных исследований представлены на рис. 1.10. На период 2001—2006 фин. гг. существенная (но далеко не вся) часть фундаментальных исследований Министерства обороны США в области нанонауки сконцентрирована в программе "Оборонные исследования университетов в области нанотехнологии — *Defense University Research Initiative on NanoTechnology — DURINT*".

**Справка:** Программа *DURINT* является составной частью программы "Междисциплинарные исследования в системе высшего образования — *MURI*" (входит в бюджетную программу "Университетские исследования" (*University Research Initiative — URI*)). Объем финансирования *URI* в 2005 фин. г. — 294 254 млн долл. (бюджетные проекты № 0601103A, № 0601103N, № 0601103F). В 2006 фин. г. фундаментальные исследования по



Рис. 1.8. Распределение объемов финансирования фундаментальных и прикладных исследований (ФПИ) и технологических разработок (ТР)

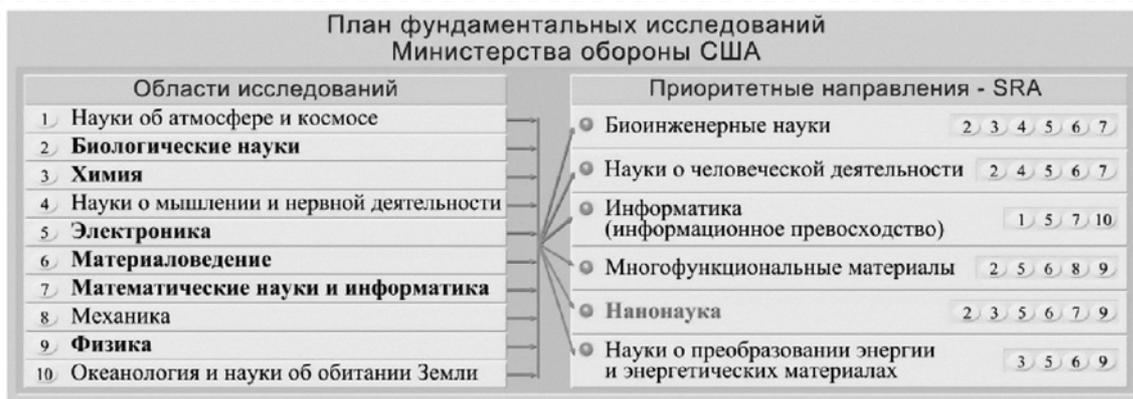


Рис. 1.9. Приоритетные направления фундаментальных исследований в интересах Министерства обороны США

заказу Министерства обороны США (бюджетная категория — 6.1) проводятся в рамках следующих восьми бюджетных программ:

1. Программа "Исследования в области оборонных наук" (Defense Research Sciences — DRS) (Проекты 0601102A, 0601153N, 0601102F, 0601101E).

2. Программа "Университетские исследования" (University Research Initiative — URI) (Проекты 0601103A, 0601103N, 0601103F).

3. Программа "Университеты и НИО промышленности" (University and Industry Research Centers — UIRC) (Проект 0601104A).

4. Программа "Защита от химического и биологического оружия — Фундаментальные исследования" (Chemical/Biological Defense — Basic Research) (Проект 0601384BP).

5. Программа "Независимые исследования в научных организациях Министерства обороны" (In-House Laboratory Independent Research — ILIR) (Проекты 0601101A, 0601152N, 0601101D8Z).

6. Программа "Программа фундаментальных исследований в области мощных лазеров" (High Energy Laser Initiative — HELI стартовала в 2002 фин. г.) (Проект 0601108F).

7. Программа "Исследования в области защиты здоровья военнослужащих" (Force Health Protection). Программа реализуется в рамках бюджетного проекта № 0601105A.

8. Программа "Экспериментальная программа стимулирования конкурентоспособных исследований" (Defense Experimental Program to Stimulate Competitive Research — DEPSCoR) (Проект 0601114D8Z). Исследования в области нанонауки запланированы в научно-технических направлениях 1, 2, 3, 5 и 7.

В рамках программы DURINT определено 15 научно-технических направлений исследований, проводимых высшими учебными заведениями США:

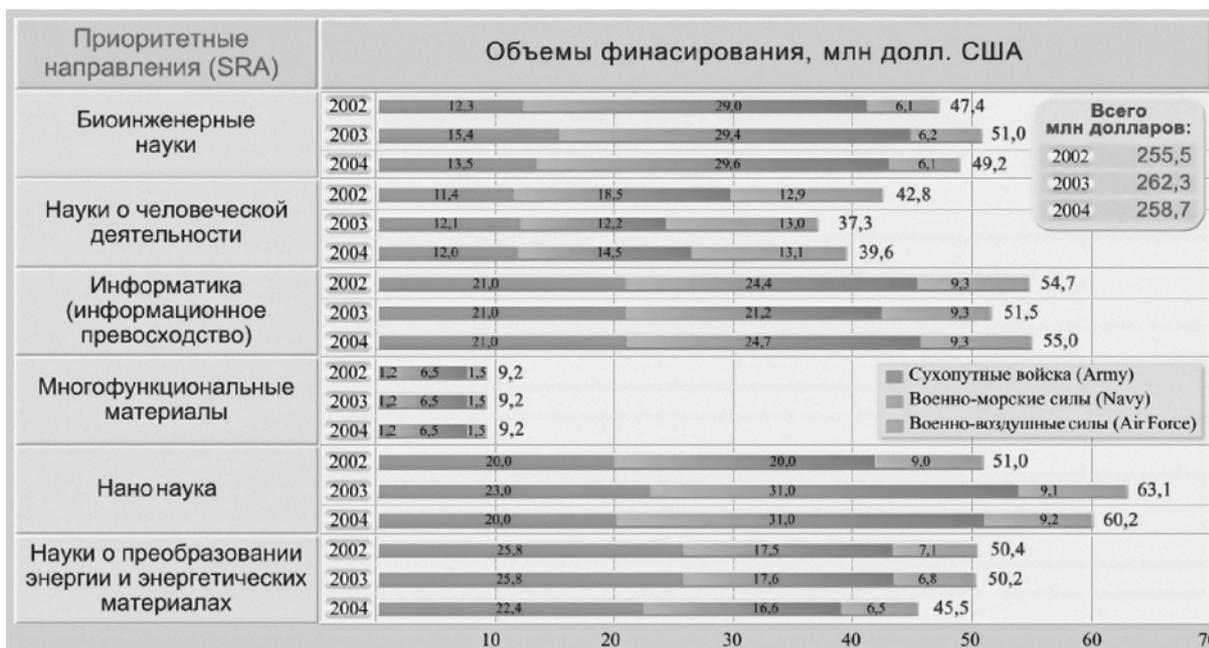


Рис. 1.10. Типовое распределение объемов финансирования фундаментальных исследований в рамках приоритетных направлений

1. Наноразмерные машины и двигатели. Координатор работ: Отдел научных исследований Армии США (*Army Research Office — ARO*). Головной исполнитель: *University of Colorado*.

2. Молекулярное управление процессами формирования нанозлектронных и наноманитных структур (молекулярные ансамбли (*molecular assemblies, selfaggregated systems*), единичные молекулы — "функциональные" молекулы (*smart molecules*), наноразмерные молекулярные стержни и проволоки (*molecular rods and wires*). Координатор работ: Отдел научных исследований Армии США. Головной исполнитель: *University of Washington*.

3. Наноматериалы и наноконструкции для источников энергии (наноразмерные элементы и системы для источников и преобразователей энергии). Координатор работ: Отдел научных исследований Армии США. Головной исполнитель: *University of Washington*.

4. Методы оценки свойств и характеристик наноразмерных элементов, устройств и систем (методы комплексного диагностирования свойств наноструктур). Координатор работ: Отдел научных исследований Армии США. Головной исполнитель: *Stevens Institute of Technology*.

5. Научные основы технологий производства углеродных нанотрубок. Координатор работ: Отдел научных исследований ВМС США (*Office Naval Research — ONR*). Головной исполнитель: *Rice University*.

6. Наноразмерные электронные устройства и архитектура их построения. Координатор работ: Отдел научных исследований ВМС США. Головной исполнитель: *Princeton University*.

7. Структуры с туннельно-прозрачными барьерами (транзисторы с резонансным туннелированием электронов и сверхрешетки), квантовые проволоки. Процессы формирования гетероструктур для элементной базы нанозлектроники. Координатор работ: Отдел научных исследований ВМС США. Головной исполнитель: *Carnegie Mellon University*.

8. Деформация, повреждения и разрушения в наноструктурах (нанотрубках, нанопластинах и нановолокнах). Координатор работ: Отдел научных исследований ВМС США. Головной исполнитель: *Massachusetts Institute of Technology*.

9. Наноструктуры — катализаторы химических реакций. Координатор работ: Отдел научных исследований ВВС США (*Air Force Office Science Research — AFOSR*). Головной исполнитель: *University of California at Santa Barbara*.

10. Полимерные нанокмозиты (высокотемпературные и высокопрочные) для летательных аппаратов (КА, авиационная техника, КР, УР, и гиперскоростные ЛА). Координатор работ: Отдел научных исследований ВВС США. Головной исполнитель: *Massachusetts Institute of Technology*.

11. Органические материалы для наноразмерной электроники и оптоэлектроники. Координатор работ: Отдел научных исследований ВВС

США. Головной исполнитель: *State University of New York at Buffalo*.

12. Квантовые вычисления и устройства, реализующие механизмы квантовых вычислений (раздел квантовой информатики). Координатор работ: Отдел научных исследований ВВС США. Головной исполнитель: *Massachusetts Institute of Technology* и *State University of New York at Stony Brook*.

13. Биомолекулярные системы (преобразователи сигналов, чувствительные элементы датчиков). Координаторы работ: Отдел оборонных наук Управления перспективных исследований и разработок МО США (*DSO DARPA*) и Отдел научных исследований ВВС США (*AFOSR*). Головной исполнитель: *Northwestern University*.

14. Синтез и модификация наноструктурных поверхностей. Координаторы работ: Отдел оборонных наук Управления перспективных исследований и разработок МО США (*DSO DARPA*) и Отдел научных исследований ВВС США (*AFOSR*). Головной исполнитель: *University of Southern California*.

15. Магнитные наноструктуры и наночастицы для применения в биотехнологиях. Координаторы работ: Отдел оборонных наук Управления перспективных исследований и разработок МО США (*DSO DARPA*) и Отдел научных исследований ВМС США (*ONR*). Головной исполнитель: *Harvard University*.

Следует заметить, что координаторы научных направлений программ не всегда являются основными заказчиками этих работ.

**Примечание.** *Фундаментальные исследования в области наноауки по заказам Управления перспективных исследований и разработок МО США (DARPA) объединяются в рамках программы "Defense Research Sciences" (бюджетный проект № 0601101E, работы координирует Отдел оборонных наук (DSO) DARPA).*

Интенсивное развитие наноауки и нанотехнологий требует кардинального совершенствования научно-экспериментальной базы исследований (метрологического обеспечения). Для проведения математического моделирования, экспериментальной оценки полученных результатов требуются мощные вычислительные комплексы и высокоточные средства измерительной техники (например, сканирующие зондовые микроскопы, лазерно-интерферометрические приборы и т. д.). Для пояснения на рис. 1.11 представлены сравнительные характеристики пространственно-временных процессов и явлений, исследуемых в области наноауки.

### **Историческая справка**

*В России создание национальной программы по нанотехнологии растянулось уже на 5 лет. Первые сводные предложения для программы, подготовленные рабочей группой во главе с Нобелевским лауреатом академиком Ж. И. Алферовым, были обсуждены на заседании Межфракционного депутатского объединения "Наука и высокие технологии" Государственной Думы Российской Федерации*

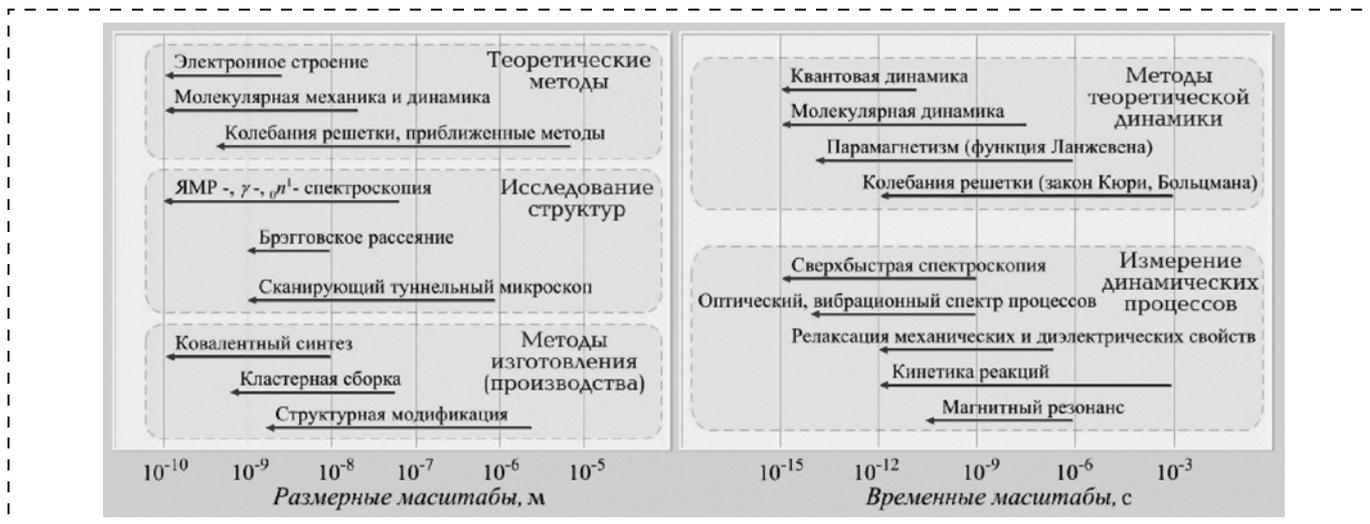


Рис. 1.11. Характеристика пространственно-временных масштабов изучаемых процессов и явлений

ции на тему: "Нанотехнологии — проблемы развития и подготовки кадров" 26 октября 2004 г. [1]. Рабочей группой под руководством генерал-лейтенанта Алфимова С. М. был подготовлен проект "Концепции развития в Российской Федерации работ в области нанотехнологий на период до 2010 года", который одобрен в основном Правительством Российской Федерации 18 ноября 2004 г. [2]. В рамках комплексной программы "Национальная технологическая база" (2005—2006 гг.) проводятся работы по созданию наноматериалов и нанотехнологий, перечень которых подготовлен рабочей группой под руководством академика Алфимова М. В.

Возможно, книга Ю. Альтмана "Военные нанотехнологии" [3] привлечет внимание Правительства Российской Федерации и будет способствовать увеличению бюджетного финансирования в области развития отечественных нанотехнологий и наноматериалов.

#### Список литературы

1. **Наноматериалы** и нанотехнологии / Ж. И. Алферов, А. Л. Асеев, С. В. Гапонов, П. С. Копьев и др. // Микросистемная техника. 2003. № 8. С. 3—13.
2. **Развитие** в России работ в области нанотехнологий / С. М. Алфимов, В. А. Быков, Е. П. Гребенников, С. И. Желудева и др. // Микросистемная техника. 2004. № 8. С. 2—8.
3. **Альтман Ю.** Военные нанотехнологии. М.: Техносфера, 2006. 353 с.

УДК 621.3.049

Ю. А. Новиков, д-р физ.-мат. наук,  
А. В. Раков, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
П. А. Тодуа, д-р физ.-мат. наук, проф.  
Научно-исследовательский центр по изучению  
свойств поверхности и вакуума, г. Москва

## НАНОМЕТРОЛОГИЯ В НАНОТЕХНОЛОГИЯХ

Специфические особенности нанотехнологии обусловили рождение и развитие нового серьезного направления в метрологии — нанометрологии, в которой основополагающая роль за метрологией линейных измерений в диапазоне от нанометра до сотен и более микрометров, обеспеченных абсолютной привязкой значений измеряемых величин к первичному эталону.

### Введение

Развитие всех сфер экономики идет по пути научно-технического прогресса. В XX веке состояние

экономики высокоразвитых стран определялось в значительной степени развитием, так называемых, "высоких технологий" в авиации, космонавтике, ядерной энергетике, электронике, а в конце века — микроэлектронике и информатике. Начало XXI в. охарактеризовалось созданием нового направления в науке и технике — нанотехнологии.

Во всем мире идет стремительное развитие нанотехнологии в научном, техническом и прикладном плане, включая решение многих экономических и социальных задач, что предопределяет необходимость системного подхода, как в организации самих научных исследований, так и во внедрении их результатов в различные сферы экономической жизни общества.

### 1. История нанотехнологии

В последнее время термин "нанотехнология" стал очень популярным и, даже можно сказать, почти обыденным. На самом же деле, нанотехно-

логия, которую точно определить затруднительно, возникла не вдруг, а постепенно, в течение многих десятков лет, в результате слияния и взаимодополнения многих научных направлений двадцатого столетия в физике, химии, биологии, математике, медицине и т. д. Можно сказать, что достижения в целом ряде наук, возникшие в виде отдельных кластеров, стали сближаться, перекрываться, формируя основу развития новых технологий.

**Нанотехнология в XX веке.** Спусковым крючком к развитию микро-, а потом и нанотехнологии послужили революционные преобразования в информатике, а именно изобретение в 1947 г. транзистора, заложившего основу полупроводниковой техники. С этого времени по настоящее время размеры элементов кремниевых устройств непрерывно эволюционируют, уменьшаясь вплоть до десятков нанометров [1, 2]. Эта область размеров стремительно осваивается нанотехнологией.

В конце 50-х годов прошлого столетия выдающийся американский физик, лауреат Нобелевской премии Ричард Фейнман (хорошо знакомый нам по прекрасному многотомному сборнику Фейнмановских лекций) прочел лекцию под названием "Внизу полным-полно места", в которой впервые была изложена идея атомарной сборки. Хотя самого термина "нанотехнология" в лекции не было, ее можно считать основополагающей для нанотехнологии.

**Национальная нанотехнологическая инициатива США.** Первой страной, оценившей фантастические возможности нанотехнологии, стали Соединенные Штаты Америки, где в феврале 2000 г. была принята обширная долгосрочная научно-техническая программа под названием Национальная Нанотехнологическая Инициатива [3], рассчитанная на 20 лет. Президент США, представляя эту проблему, в частности, особо выделил три важных на его взгляд направления:

- создание новых высокопрочных и, в то же время сверхлегких материалов, в том числе, на основе углеродных нанотрубок;
- разработка и создание сверхмощных информационных систем сверхмалых размеров на основе квантово-размерных эффектов;
- ранняя диагностика раковых заболеваний на основе био- и медицинских микророботов, сравнимых по размерам с биологической клеткой, которые можно вводить в организм человека для диагностики и уничтожения вирусов или клеток пораженных тканей.

**Нанотехнология в Японии и других странах.** Вслед за США в нанотехнологический прорыв вступила Япония. В докладе Японской Экономической Ассоциации (Кейданрэн) в марте 2001 г. изложена национальная научно-техническая программа "Нанотехнология и будущее общество. n-Plan21" [4], в которой сформулированы основные прорывные направления нанотехнологии в Японии, а именно: информационные технологии,

биология, энергетика, экология и материаловедение. Основной девиз развития нанотехнологии в Японии — "создание общества гармонии с природой".

В целом и в программе США, и особенно в программе Японии сильно влияние государственного планирования, поскольку нанотехнологический прорыв на первых этапах требует значительных государственных вложений. Не отстают от США и Японии ведущие страны Европы: Германия, Англия, Франция, Швеция, Швейцария, активно сотрудничающие в сети междисциплинарного обмена информацией, в основном в области нанопокровов, нанопорошков, нанокмполитов, нанодатчиков, нанозондов и т. д. По расчетам экспертов Японии объем рынка товаров и услуг в части нанотехнологии только внутри Японии в обозримом будущем — это сотни миллиардов долларов в год.

**Нанотехнология в России.** Не отстает от высокоразвитых стран и Россия [5]. В России работы в области нанотехнологии в основном представлены в перечне тем, выполняющихся в рамках Федеральной целевой научно-технической программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники" на 2002—2006 годы, раздел "Индустрия наносистем и материалы", сформированном на конкурсной основе [6]. Большая часть работ посвящена нанотехнологии и материалам, структурам и объектам нанотехнологии, как таковым, а также нанотехнологии создания и обработки композиционных и керамических материалов, технологии создания и обработки керамических материалов со специальными свойствами, технологии мехатроники и создания микросистемной техники, мембран и каталитических систем, ультрадисперсных сред и нанопорошков, а также покрытий. Примечательно, что в Российской программе большое внимание уделено проблемам моделирования наносистем и нанообъектов, в том числе созданию устройств для осуществления такого моделирования. Не меньшее внимание уделяется вопросам обеспечения единства измерений физико-химических параметров и свойств материалов, объектов и структур нанотехнологии. Создаваемая в настоящее время в России система Центров коллективного пользования аналитическим оборудованием во многом ориентирована на потребности нанотехнологии и связанных с ней областей науки, техники и производства.

**Два подхода к нанотехнологии XXI века.** В настоящее время в нанотехнологии существуют два подхода. Подход "сверху-вниз" основан на последовательном уменьшении размеров объектов. Классический пример — последовательное развитие фотолитографии: от использования видимого света к излучению ультрафиолетового диапазона [7], и далее к рентгеновской литографии.

Идея технологии "снизу-вверх" заключается в сборке объекта из элементов низшего порядка (атомов, молекул, структурных фрагментов биологических клеток и т. д.). Классический пример —

программируемая поштучная укладка атомов на поверхности кристалла с помощью зондового устройства. В настоящее время производительность методов "снизу-вверх" невысока, однако по прогнозам аналитиков именно им принадлежит будущее в нанотехнологии, поскольку методы "сверху-вниз" ограничены снизу физическими пределами самой природы этих методов.

**Перспективные проекты нанотехнологии.** В целом, фронт нанотехнологических исследований охватывает широкие области науки и техники от электроники и информатики до сельского хозяйства, в котором возрастет роль генномодифицированной продукции.

В числе флагманских разработок, результаты которых просматриваются в ближайшие 5—10 лет, — электроника и информационные технологии, на основе новых материалов, устройств, условий и техники монтажа, новых нанопозиционеров, методов записи и считывания, новых устройств фотоники в оптических линиях связи.

По прогнозам аналитиков в числе перспективных проектов, результаты которых войдут в жизнь в течение ближайших 10—20 лет — наноматериалы (нанотрубки, материалы для солнечной энергетики, топливные элементы нового типа), биологические наносистемы, наноустройства на основе наноматериалов, наноизмерительная техника, нанообработка. В наномедицине прогнозируется метод лечения не болезни, а индивидуально человека по его генетической информации, причем медикаментами с адресной нанодоставкой.

В особую область нанонауки выделена область, связанная с моделированием наносистем, поскольку успешное манипулирование с нанообъектами возможно только после тщательного изучения их свойств и характеристик, полученных с помощью модельных экспериментов.

## 2. Нанометрология

История развития науки и техники неразрывно связана с развитием системы, методов и средств измерений. Переход к нанотехнологии поставил перед наукой и техникой ряд новых специфических задач, обусловленных малыми размерами элементов структур, с которыми имеет дело нанотехнология.

Специфической особенностью нанотехнологий является их межотраслевой характер, при котором одно и то же явление, обусловленное масштабным эффектом, может быть использовано в различных отраслях экономической жизни общества, как-то: информационно-телекоммуникационные технологии, медицина, фармакология, производство новых материалов и материаловедение, сельское хозяйство, диагностика болезней на ранних стадиях, экология и многое другое. Межотраслевой характер нанотехнологий, различная терминология и различные исследовательские, технологические и из-

мерительные подходы и методы, используемые в различных отраслях научными центрами и лабораториями, привели к некой разобщенности, затрудняющей осуществление успешного обмена технической информацией. Этим обстоятельством, в первую очередь, инициировано создание Технического комитета ИСО (Международной организации по стандартизации) — ИСО/ТК 229 "Нанотехнологии" [8]. Свое первое заседание ИСО/ТК 229 провел 9—11 ноября 2005 г. в Лондоне. Организатор заседания — Британская организация по стандартизации, которая и осуществляет ведение секретариата этого комитета.

Первоочередные задачи ИСО/ТК 229, сформулированные участниками заседания — странами-участниками ИСО, крайне заинтересованными в развитии этой области человеческого знания, состоят в стандартизации в области нанотехнологий в следующих направлениях: термины и определения, метрология и методы испытаний и измерений, стандартные образцы состава и свойств, моделирование процессов, медицина и безопасность, воздействие на окружающую среду.

Решение этих первоочередных задач даст мощный импульс развитию нанотехнологий и их практическим применениям и внедрениям в различных отраслях.

Область деятельности Технического комитета ИСО/ТК 229, как и следует из названия, — стандартизация в нанотехнологиях. При этом под нанотехнологиями подразумевается следующее:

- знание и управление процессами, как правило, в масштабе 1 нм, но не исключаяющее масштаба менее 100 нм, в одном или более измерениях, когда ввод в действие размерного эффекта (явления) приводит к возможности новых применений;
- использование свойств объектов и материалов в нанометровом масштабе, которые отличаются от свойств свободных атомов или молекул, а также от объемных свойств вещества, состоящего из этих атомов или молекул, для создания более совершенных материалов, приборов, систем, реализующих эти новые свойства.

Не противоречат этим первым шагам в стандартизации терминов и определений, скорее даже дополняют и расширяют наше терминологическое представление об этой бурно развивающейся области, термины, принятые в "Концепции развития в Российской Федерации работ в области нанотехнологий на период до 2010 года", одобренной, в целом, Правительством Российской Федерации 18 ноября 2004 г., где:

**"нанотехнология"** — совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, хотя бы в одном измерении, и в результате этого получившие принципиально новые качества, позволяющие осуществлять их интегра-

цию в полноценно функционирующие системы большего масштаба; в более широком смысле — этот термин охватывает также методы диагностики, хактерологии и исследований таких объектов;

**"наноматериал"** — материал, содержащий структурные элементы, геометрические размеры которых, хотя бы в одном измерении, не превышают 100 нм, и благодаря этому, обладающий качественно новыми свойствами, в том числе заданными функциональными и эксплуатационными характеристиками;

**"наносистемная техника"** — создание полностью или частично на основе наноматериалов и нанотехнологий функционально законченных систем и устройств, характеристики которых кардинальным образом отличаются от показателей систем и устройств аналогичного назначения, созданных по традиционным технологиям;

**"наоиндустрия"** — вид деятельности по созданию продукции на основе нанотехнологий, наноматериалов и наносистемной техники.

Специфика нанотехнологии привела к рождению и развитию нового серьезного направления в метрологии — нанометрологии, в которой обеспечению единства линейных измерений принадлежит основополагающая и лидирующая роль. Действительно, из самого определения нанотехнологии, оперирующей с объектами нанометровой протяженности, естественным образом следует первоочередная задача измерений геометрических параметров объекта, что, в свою очередь, обуславливает необходимость обеспечения единства линейных измерений в нанометровом диапазоне. Но этим обстоятельством роль нанометрологии линейных измерений не исчерпывается. Метрология линейных измерений в неявном виде присутствует в подавляющем большинстве методов и средств обеспечения единства измерений физико-химических параметров и свойств объектов нанотехнологии, таких как механические, оптические, электрические, магнитные, акустические и т. д. Во многом из

перечисленного необходимо осуществлять прецизионное пространственное позиционирование зонда измерительного устройства в место требуемого съема измерительной информации. При этом диапазон линейного сканирования по каждой координате может простирается от единиц нанометров до сотен и более микрометров, а требуемая точность выставления координаты составлять десятые доли нанометра (рис. 1).

Фундаментальные исследования, связанные с прямыми измерениями физико-химических параметров веществ и материалов нанотехнологии, элементов и устройств нанотехники, требуют понимания закономерностей взаимодействия измерительного средства с объектом измерения. Особую важность приобретают вопросы метрологии и стандартизации таких измерений, метрологического обеспечения, вопросы передачи размера единицы физической величины в нанометровый диапазон [9, 10], характеризующийся своими специфическими особенностями.

**Нанометрология линейных измерений.** В настоящее время вся деятельность человека может быть охвачена единой шкалой размеров (рис. 2). Во главе этой шкалы стоит Первичный эталон единицы длины — метр. Разные отрасли экономической деятельности человека занимают разные области на этой шкале.

В конце XX и начале XXI века на передний план развития выдвигаются высокие технологии, главными из которых являются микроэлектроника и нанотехнология. Микроэлектроника оперирует с элементами рельефа поверхности твердого тела, имеющими минимальные размеры (критические размеры — КР) в сотни нанометров, и в ближайшие годы ожидается переход к десяткам нанометров (табл. 1 и 2), а нанотехнология оперирует с характерными размерами от сотен нанометров до десятых долей нанометра (расстояние между атомами в твердом теле). При этом необходимо учесть, что эволюция технологии микроэлектроники в на-



Рис. 1. Эталон в нанотехнологии

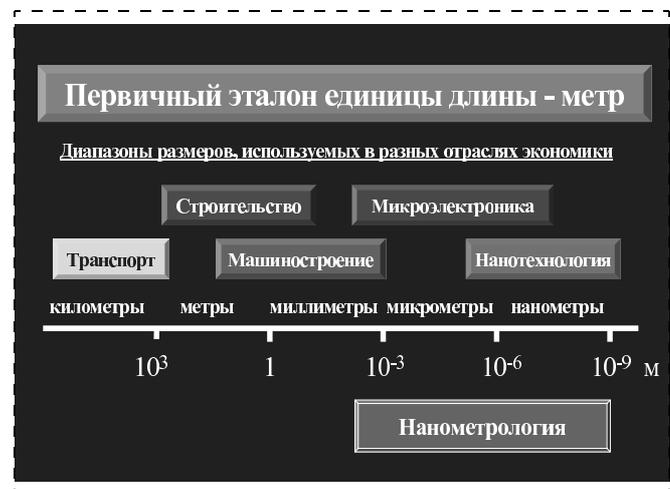


Рис. 2. Шкала линейных размеров в экономической деятельности человека

Таблица 1

**Перспективы развития технологии [1] полупроводниковой микроэлектроники США на период 1995–2010 гг.**

Технологические характеристики	Годы					
	1995	1998	2001	2004	2007	2010
Критический размер (КР), нм	350	250	180	130	100	70
Точность измерений КР, нм	3,5	2,5	1,8	1,3	1,0	0,7

нотровую область опережает прогнозы аналитиков (табл. 1 и 2). Так, появились сообщения о готовности технологии с критическими размерами 65 нм к выпуску микросхем, в то время как согласно Программе США [1], заканчивающейся в 2010 г., критические размеры 70 нм должны быть достигнуты в 2010 г., а согласно Международной программе [2] критические размеры 65 нм должны быть достигнуты в 2007 г.

Эти обстоятельства подчеркивают необходимость решения проблемы создания методов и средств линейных измерений в нанометровом диапазоне и обеспечения единства таких измерений с абсолютной привязкой к Первичному эталону длины — метру.

**История развития метрологии линейных измерений.** Научно-технический прогресс XIX века, углубляющиеся экономические, торговые и культурные связи между разными странами настоятельно потребовали не только ликвидации разнобоя в определении и применении единиц физических величин внутри каждой отдельно взятой страны, но и их унификации и создания единой и общей для всех стран гармоничной системы измерений.

20 мая 1875 г. в Париже 17 государств, в том числе и Россия, подписали Метрическую Конвенцию, в соответствии с которой метрическая система мер и весов была принята под покровительство этих государств, и тем самым ее развитие обрело межгосударственный статус.

На I Генеральной конференции по мерам и весам в сентябре 1886 г. в Париже в качестве Международного эталона метра был избран платиновом-иридиевый жезл (прототип), на внутренней поверхности его были нанесены метки-штрихи, рас-

Таблица 2

**Планируемые в Международной Программе развития полупроводниковой промышленности [2] минимальные размеры элементов микросхем по годам**

Технологические характеристики	Годы						
	2001	2004	2007	2010	2013	2016	2018
Критический размер (КР), нм	130	90	65	45	32	22	18
Точность измерений КР, нм	1,3	0,9	0,6	0,4	0,3	0,2	0,18

стояние между которыми соответствовало одной сорокамиллионной части длины земного меридиана, проходящего через Париж. Государства-участники Метрической конвенции получили по прототипу-эталону метра. Длина международного эталона метра, хранящегося в Международном бюро мер и весов в Париже, была определена с неопределенностью 0,1 мкм (относительная неопределенность  $10^{-7}$ ), а расхождение в длине национальных эталонов не превышало 0,2 мкм.

XX век потребовал большей точности измерений линейных размеров. Реальная возможность определения единицы длины — метра через длину волны оптического излучения появилась лишь после фундаментальных работ американского физика Майкельсона по применению интерферометрии в линейных измерениях, выполненных в конце XIX века.

На XI Генеральной конференции по мерам и весам в 1960 г. было принято новое определение метра, а именно: метр есть длина, равная  $1650763,73$  длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между  $2p_{10}$  и  $5d_5$  уровнями атома криптона-86.

Переход от прототипа метра на эталонную длину волны излучения позволил:

- реализовать возможность воспроизведения единицы длины в различных лабораториях;
- повысить точность измерений более чем на порядок;
- обеспечить неуничтожимость эталона основной физической величины, т. е. возможность его воссоздания в случае утраты.

Использование монохроматического оптического излучения решило проблему воспроизведения и передачи размера единицы длины от эталона к средствам измерений более низшего разряда в иерархии эталон — рабочие средства измерений с помощью оптических интерферометров для измерения концевых или штриховых мер — носителей размера.

**Первичный эталон единицы длины.** Достижения фундаментальных и прикладных исследований в физике в XX веке позволили создать новый Первичный эталон длины. В его основу легли три великих открытия XX века.

Открытие и бурное развитие оптических квантовых генераторов — источников монохроматического излучения с высокой степенью пространственной и временной когерентности, привнесло в метрологию линейных измерений возможность перехода от линии излучения криптона-86 к излучению оптического квантового генератора, имеющих более высокую стабильность и добротность.

Прямые измерения частоты оптического излучения высокостабилизированного He—Ne лазера позволили определить скорость света  $c$ , исходя из соотношения

$$c = \lambda \nu,$$

где частота  $\nu$  определена, исходя из эталона частоты, а длина волны  $\lambda$  — исходя из определения эталона метра.

Третьим заключительным открытием, легшим в основу нового первичного эталона длины, является постоянство скорости света в любой инерциальной системе координат.

Вместо двух основных первичных эталонов (длина и время) решено использовать новые основные эталоны: скорость света и частоту. Это позволило XVII Генеральной конференции по мерам и весам в 1983 г. принять в качестве неизменяемой фундаментальной константы значение скорости света в вакууме

$$c = 299\,792\,458 \text{ м/с.}$$

На этой же конференции метр был определен как длина пути, проходимого светом в вакууме за  $1/c$  секунды.

На 9-й сессии Консультативного комитета по длине в сентябре 1997 г. рекомендованные значения частоты и длины волны излучения He—Ne/J<sub>2</sub> лазера, стабилизированного по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде, составили

$$\begin{aligned} \nu &= 473\,612\,214\,705 \text{ кГц,} \\ \lambda &= 632,99139822 \text{ нм.} \end{aligned}$$

Первичный эталон метра [11], реализующий этот физический принцип, обеспечивает воспроизведение единицы длины — метра с относительным средним квадратичным отклонением (неопределенностью)  $2 \cdot 10^{-11}$ . Таким образом, за промежуток времени немногим более 100 лет (активная жизнь трех поколений) точность эталона метра увеличилась более чем на четыре порядка (10 000 раз).

**Интерферометрия — основа измерения длины.** Новый Первичный эталон длины тесно связан с двумя физическими эффектами, осуществляющими передачу размера от первичного эталона к рабочим средствам измерений. Это дифракция и интерференция. Однако только интерференция позволяет осуществлять эту функцию во всех диапазонах длин, используемых человеком.

Измерения длины (линейные измерения) можно разбить на два диапазона: измерения больших длин (длина много больше длины волны излучения) и измерения малых длин (значения порядка и менее длины волны излучения). Диапазон измерений больших длин простирается от единиц—десятков микрометров и далее (см. рис. 2), включая метры, километры вплоть до длин, таких как: астрономическая единица длины ( $1,5 \cdot 10^{11}$  м — расстояние от Земли до Солнца), световой год ( $9,5 \cdot 10^{15}$  м — расстояние, которое свет пройдет за время, равное 365 земным суткам) и парсек ( $3,1 \cdot 10^{16}$  м). Диапазон измерений малых длин простирается от единиц микрометра до нуля, который, впрочем, также недостижим, как ноль градусов Кельвина. Характерные размеры здесь:  $10^{-6}$  метра — микрометр,  $10^{-9}$  метра — нанометр,  $10^{-10}$  метра — ангстрем.

Диаметр первой невозбужденной орбиты электрона в атоме водорода как раз составляет примерно один ангстрем.

Если использование интерферометрии в передаче размера единицы длины в области больших длин не встречает принципиальных трудностей и ограничено лишь пространственно-временной когерентностью источника эталонного излучения, то линейные измерения объектов, характеризующихся значениями размеров меньших и много меньших длины волны излучения, требуют принципиально нового подхода.

**Нанометрология линейных измерений в XXI веке.** Нанометрология оперирует с наноразмерными объектами, что предопределяет необходимость решения первоочередной проблемы создания методов и средств линейных измерений в нанометровом диапазоне, а также обеспечения единства таких измерений с абсолютной привязкой к Первичному эталону метра.

Достижение предельных возможностей при измерениях длины в нанометровом диапазоне связано с использованием высокоразрешающих методов растровой электронной и сканирующей зондовой микроскопии в сочетании с лазерной интерферометрией и фазометрией при сохранении абсолютной привязки к Первичному эталону метра.

В результате длительных исследований в России с мировым приоритетом концептуально решена задача создания основ метрологического обеспечения измерений длины в диапазоне 1...1000 нм. При этом созданы:

- методология обеспечения единства измерений в диапазоне длин от 1 нм до 1 мкм, основанная на принципах зондовой микроскопии и лазерной интерферометрии-фазометрии;
- эталонный комплекс средств измерений, обеспечивающий воспроизведение и передачу размера единицы длины в диапазоне 1 нм...1 мкм вещественным мерам длины с погрешностью 0,5 нм;
- новое поколение мер малой длины для калибровки средств измерений в диапазоне 1 нм...1 мкм, в том числе меры нанорельефа поверхности;
- методология и алгоритмы измерения параметров профиля элементов микро- и наноструктур и пакет компьютерных программ для автоматизации таких измерений.

В соответствии с концепцией обеспечения единства измерений длины передача размера единицы длины от Первичного эталона длины в нанометровый диапазон осуществляется *эталонной 3-мерной лазерной интерферометрической системой измерений наноперемещений*. Эталонная система (рис. 3), созданная на основе атомно-силового микроскопа оригинальной конструкции и лазерных интерферометрических измерителей наноперемещений, предназначена для измерения линейных перемещений по трем координатам и аттестации мер и стандартных образцов, используемых

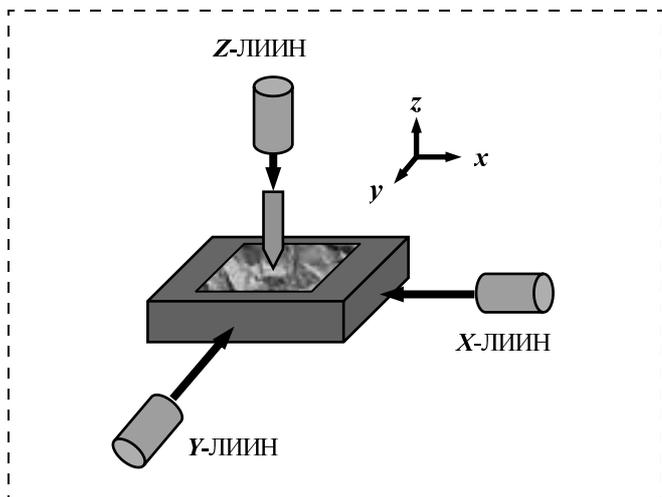


Рис. 3. Схема эталонной 3-мерной лазерной интерференционной системы измерений перемещений (ЛИИН — лазерный интерференционный измеритель наноперемещений)

для калибровки измерительных систем потребителей. Диапазон области перемещений по  $X$  и  $Y$  составляет 1...3000 нм, по  $Z$  — 1...1000 нм. Точность измерений перемещений по  $X$  и  $Y$  составляет 0,5 нм, по  $Z$  — 0,5...3 нм. Диапазон смещений области перемещений — 0...100 мкм.

Непосредственное измерение наноперемещений в эталонной системе осуществляет *лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений* (рис. 4). В его конструкции заложена комбинация методов интерферометрии и фазометрии. Три таких измерителя, встроенные в эталонную трехмерную лазерную интерферометрическую систему измерений наноперемещений, выполняют измерения перемещений по трем координатам.

Однако лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений имеет и самостоятельное значение. Его назначение заключается в измерении линейных перемещений в реальном масштабе времени, в том числе, калибровке систем сканирования и позиционирования в микро- и нанотехнологии, точном машиностроении, микромеханике, робототехнике, растровой электронной и скани-

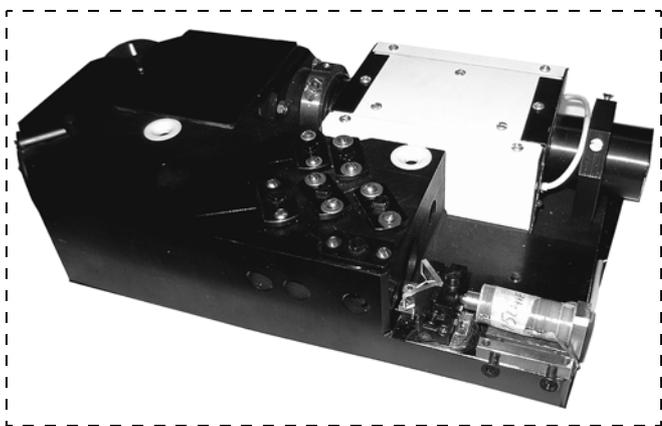


Рис. 4. Лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений

рующей зондовой микроскопии. Диапазон измерений перемещений составляет 1 нм...10 мм, дискретность отсчета 0,1 нм. Абсолютная погрешность измерений лежит в диапазоне 0,5...3 нм при максимальном значении измеряемой скорости перемещения 3 мм/с.

В реальной практике измерения геометрических параметров объектов в нанометровой области проводят с помощью *растровых электронных (РЭМ) и сканирующих зондовых (СЗМ) микроскопов*, расположенных у потребителя. Для обеспечения единства измерений необходимо проводить калибровку этих сложных измерительных устройств по эталонным образцам — мерам малой длины, выполненным в виде рельефных шаговых структур с заданными шириной, высотой (глубиной) и формой профиля.

Важнейшей задачей метрологического обеспечения линейных измерений в нанометровом диапазоне является создание *вещественных носителей размера — мер* с программируемо заданным нанорельефом поверхности, обеспечивающих калибровку средств измерений с наивысшей точностью. В настоящее время в разных странах используются разные линейные меры. Все они применяются для калибровки растровых электронных и атомно-силовых (АСМ) микроскопов. Однако только одна из них (МШПС-2.0К — мера ширины и периода специальная, номинальный размер 2,0 мкм, кремниевая), разработанная в Научно-исследовательском центре по изучению свойств поверхности и вакуума (НИЦПВ), имеет в качестве аттестуемого элемента ширину линии, и только с помощью этой меры возможно осуществлять наряду с калибровкой увеличение и измерение диаметра электронного зонда РЭМ, а в случае атомно-силовых микроскопов — еще и радиусов острых зондов (кантилеверов), линейности шкал и неортогональности сканеров. Именно такие *трехмерные меры* малой длины — материальные носители размера, позволяющие осуществлять комплексную калибровку и контроль основных параметров растровых электронных и сканирующих зондовых микроскопов, предназначены для перевода этих сложных устройств из разряда устройств для *визуализации* исследуемого объекта в разряд *средств измерений*, т. е. в разряд *приборов* для измерения линейных размеров объектов исследования, обеспечивающих привязку измеряемых величин в нанометровой области к Первичному эталону единицы длины — метру.

Общий вид меры представлен на рис. 5, а. Мера состоит из пяти групп шаговых структур по три структуры в каждой (рис. 5, б). На рис. 5, в приведено изображение одной из шаговых структур. Структура состоит из 11 канавок с трапециевидным профилем в кремнии. Боковые стенки канавок соответствуют кристаллографическим плоскостям кремния {111}, а дно канавки и верх выступа — плоскостям {100}. Высокое качество меры МШПС-2.0К демонстрируют изображения сколов

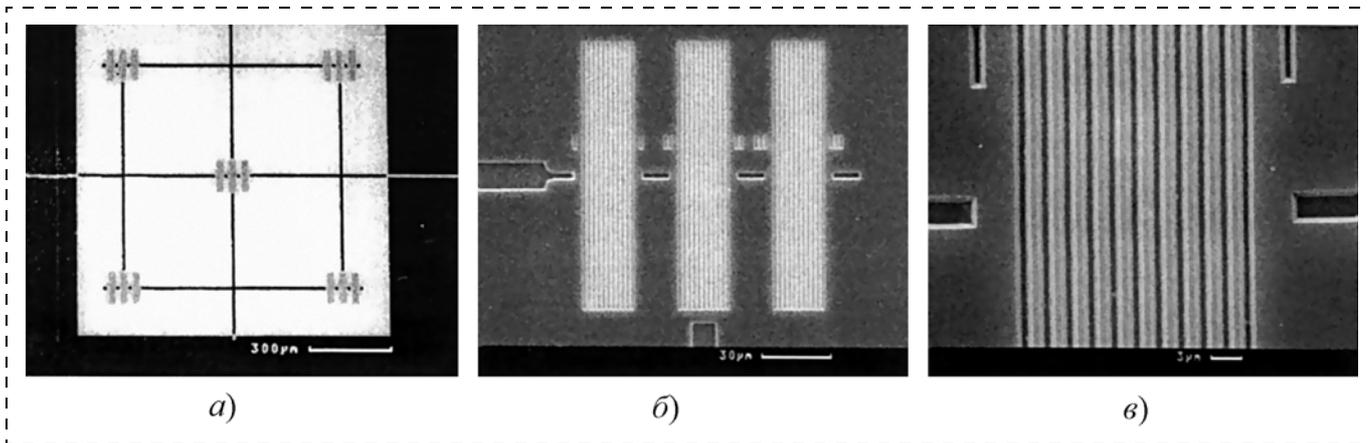


Рис. 5. Микрофотографии меры МШПС-2.0К, выполненные на РЭМ при разных увеличениях

шаговой структуры в РЭМ (рис. 6) и трехмерные изображения элементов структуры в АСМ (рис. 7).

Аттестация меры МШПС-2.0К осуществляется на эталонной 3-мерной интерферометрической системе измерений наноперемещений, представленной выше. Аттестуются шаг меры и размеры верхних и нижних оснований выступов и канавок (ширина линии), а также высота (глубина) рельефа. Отметим, что аттестация ширины линии про-

водится *впервые в мире*. При одном и том же шаге структуры возможно изготовление меры с ширинами линии в диапазоне 10...1500 нм и высотой рельефа 100... 1500 нм.

Меры МШПС-2.0К позволяют по одному изображению меры в растровом электронном микроскопе (даже по одному сигналу), что очень важно для контроля технологических процессов, выполнить калибровку микроскопа (определить увеличе-

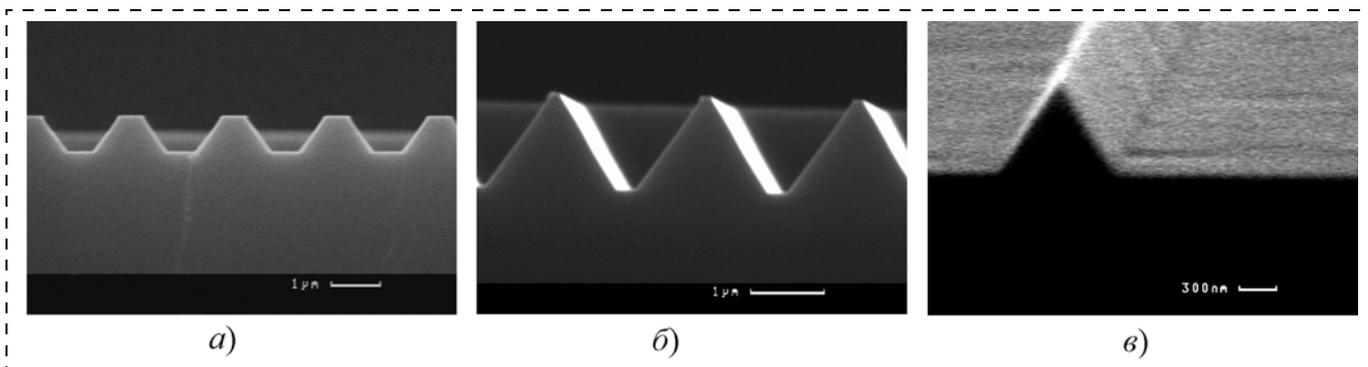


Рис. 6. Изображение в РЭМ сколов меры МШПС-2.0К с разными высотами и ширинами выступов:

*a* — верх выступа 520 нм, низ канавки 560 нм, высота структуры 650 нм; *б* — верх выступа 110 нм, низ канавки 260 нм, высота структуры 1150 нм; *в* — верх выступа 30 нм, высота структуры 320 нм

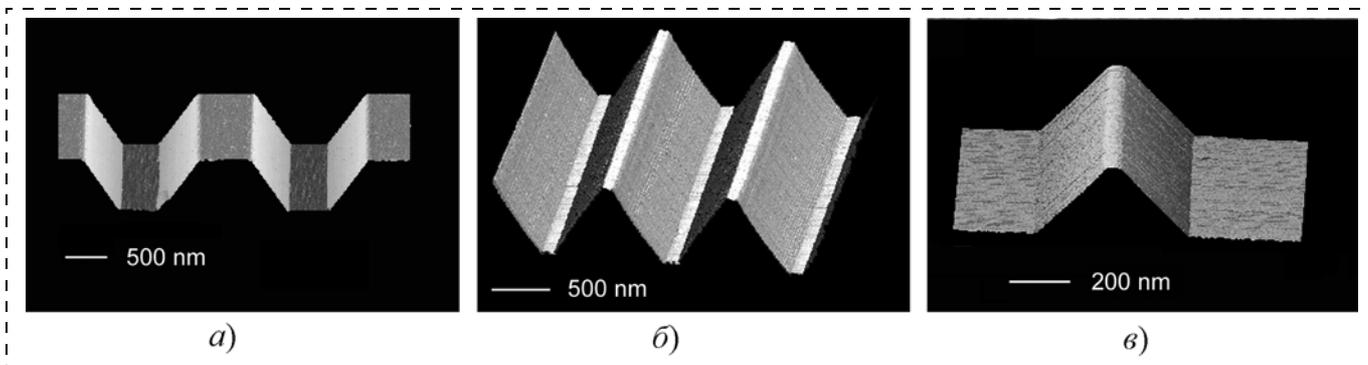


Рис. 7. Изображение отдельных элементов меры МШПС-2.0К с разными шириной и высотами выступов, полученные на АСМ:

*a* — верх выступа 520 нм, низ канавки 560 нм, высота структуры 650 нм; *б* — верх выступа 110 нм, низ канавки 260 нм, высота структуры 1150 нм; *в* — верх выступа 30 нм, высота структуры 320 нм

ние микроскопа, линейность его шкал и диаметр электронного зонда). Кроме того, при необходимости подтверждения правильности измерений можно осуществить контроль параметров растрового электронного микроскопа непосредственно в процессе проведения измерений размеров исследуемого объекта, что является дополнительной гарантией высокого качества измерений.

Мера МШПС-2.0К позволяет легко автоматизировать линейные измерения на РЭМ и создавать на основе растровых электронных микроскопов автоматизированные измерительные комплексы. Ряд таких комплексов уже существует. В частности, такой автоматизированный комплекс линейных измерений в области размеров 30 нм...100 мкм создан в НИЦПВ на основе растрового электронного микроскопа JSM-6460LV.

Аналогичным образом по заданным параметрам меры проводится калибровка и контроль таких характеристик атомно-силовых микроскопов, как цена деления и линейность шкал по всем трем координатам, ортогональность систем сканирования, радиус острия зонда (кантилевера), настройка параметров и выход микроскопа в рабочий режим.

Системы калибровки и аттестации атомно-силовых микроскопов успешно внедряются на предприятиях Москвы и Зеленограда, специализирующихся на создании оборудования для нанотехнологии.

Развитие нанотехнологии ужесточает требования к измерительным системам, погрешности измерений которых должны быть сравнимы с межатомными расстояниями. Все это требует серьезного отношения к вопросу обеспечения единства линейных измерений в нанометровом диапазоне.

Растровый электронный и сканирующий зондовый микроскопы только тогда могут считаться средствами измерений, когда их параметры будут соответствующим образом аттестованы, калиброваны и осуществлен их контроль, причем последнее выполнено непосредственно в процессе измерений. Трехмерные меры — материальные носители размера — своеобразный мост между объектом измерений и эталоном метра, являются идеальным средством для осуществления таких операций.

Непреложно одно, культура измерений требует, чтобы любой растровый электронный или сканирующий зондовый микроскоп, независимо от того, где он находится — в научной или промышленной лаборатории, в учебном заведении или участвует в технологическом процессе, был укомплектован мерами, обеспечивающими калибровку и контроль параметров этого сложного устройства. Только тогда измерения, проводимые на нем, могут претендовать на достоверность.

Кроме того, использование методов и средств калибровки и аттестации растровых электронных и сканирующих зондовых микроскопов производителями соответствующих приборов дадут возможность им создавать новые приборы с лучшими характеристиками, которые, в свою очередь, позволят продвинуться дальше на пути развития нанотехнологии.

Все это создает предпосылки и закладывает основы ускоренного развития высоких технологий в России и особенно главной из этих технологий — нанотехнологии.

## Заключение

Развитие нанотехнологии, широкое внедрение ее достижений в науку, технику, производство, обеспечение качества продукции немислимы без опережающего развития методов и средств измерений. Если невозможно измерить, то нельзя сделать. Эта фраза характеризует развитие любой отрасли. Опережающее развитие метрологического обеспечения нанотехнологий и, в первую очередь, обеспечение единства линейных измерений в нано- и прилегающем к нему диапазонах — основа основ нанометрологии, один из основных факторов успешного развития нанотехнологии в целом.

## Список литературы

1. **The National Technology Roadmap for Semiconductors.** 1994. SIA. San Jose. California. USA. 168 p.
2. **International Technology Roadmap for Semiconductors.** 2004 Update. Metrology / public.itrs.net.
3. **National Technology Initiative.** The Initiative and its Implementation Plan. Subcommittee on Nanoscience, Engineering and Technology. 2000. / www.nano.gov.
4. **Кобаяси Н.** Введение в нанотехнологию: Пер. с япон. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2005. 134 с.
5. **Алфимов С. М., Быков В. А., Гребенников Е. П., Желудева С. И., Мальцев П. П., Петрунини В. Ф., Чаплыгин Ю. А.** Развитие в России работ в области нанотехнологий // Микросистемная техника. 2004. № 8. С. 2—8.
6. **Приоритетное** направление "Индустрия наносистем и материалы" // Федеральная целевая научно-техническая программа "Исследования и разработки по приоритетным направлениям науки и техники" на 2002—2006 гг. / fasi.gov.ru/fcp/technika/konkurs.
7. **Гапонов С. В.** Экстремальная ультрафиолетовая литография — будущее наноэлектроники // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 2. С. 2—4.
8. **International Organization for Standardization.** / www.iso.org.
9. **Postek M. T.** The Challenge of Nanometrology // Proceedings of SPIE. 2002. V. 4608. P. 84—96.
10. **Тодуа П. А., Быков В. А., Волк Ч. П., Горнев Е. С., Желкобаев Ж., Зыкин Л. М., Ишанов А. Б., Календин В. В., Новиков Ю. А., Озерин Ю. В., Плотников Ю. И., Прохоров А. М., Раков А. В., Саунин С. А., Черняков В. Н.** Метрологическое обеспечение измерений длины в микрометровом и нанометровом диапазонах и их внедрение в микроэлектронику и нанотехнологию // Микросистемная техника. 2004. № 1. С. 38—44. № 2. С. 24—39. № 3. С. 25—32.
11. **Федорин В. Л.** Государственный первичный эталон единицы длины // Российская метрологическая энциклопедия. С.-Пб.: Лики России. 2001. С. 228—231.

УДК 531.787.089

**А. И. Желонкин**, канд. техн. наук  
Московский государственный открытый  
университет

## МОЛЕКУЛЯРНО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НАНОМЕТРОВОГО УРОВНЯ

*Физические процессы молекулярно-электронных (МЭ) преобразователей, использующих закономерности образования, распределения и переноса зарядов на границе раздела твердой и жидкой фаз при конвективном движении жидкости, определили построение различных сенсорных систем. Рассматриваются основные информационные направления молекулярной электроники, приводятся основные методы синтеза и анализа и характеристики МЭ преобразователей неэлектрических сигналов малого энергетического уровня.*

### Основы построения МЭ преобразователей

Теоретические исследования физико-химических процессов, происходящих на границе твердой и жидкой фаз в пределах размеров двойного электрического слоя (от единиц до нескольких десятков нанометров), определили развитие нового научно-технического направления — молекулярной электроники. Одним из результатов исследований взаимодействий ионного и электронного способов переноса электрических зарядов является разработка информационно-измерительных преобразователей неэлектрических сигналов малого энергетического уровня [1—5].

В зависимости от целевого использования различных физических процессов, определяющих принцип действия преобразователей, рассматривают несколько направлений. Такую условную классификацию, имеющую некоторые специфические особенности в различных работах, представим в виде следующих групп.

*Твердофазные электрохимические преобразователи*, основанные на обратимых явлениях, связанных с растворением или осаждением металла на электродах электрохимической ячейки. Количественные параметры определяются на основе закона Фарадея. К этой же группе можно отнести преобразователи, использующие необратимые явления образования на металлах оксидной пленки и изменения ее физико-химических свойств под действием поляризирующего тока. Использование этих процес-

сов определило разработку интеграторов дискретного действия, управляемых резисторов, счетчиков машинного времени с применением электрохимических кулометров, переключателей, индикаторных устройств.

*Преобразователи, использующие поверхностные и капиллярные явления* на границе раздела двух и более фаз. Это — электрокинетические преобразователи, принцип действия которых основан на эффекте образования потенциала протекания; электроосмотические системы — с обратным эффектом, электролитические преобразователи.

*Мембранные системы*, построенные на принципах ионной избирательности коллоидных, полимерных и биологических пленок, а также разработанные ранее электрохимические аналитические измерительные приборы и устройства для определения концентраций, состава и физико-химических параметров жидких сред.

*Диффузионные преобразователи*, которые наряду с электрокинетическими системами находят применение в области измерения параметров механического движения, механических и акустических воздействий и волновых полей (преимущественно в инфранизкочастотном диапазоне). Основными составляющими таких преобразователей являются инертные электроды, образующие с электролитом окислительно-восстановительные системы. В электролите растворены реагирующие частицы в окисленной и восстановленной форме. Электроды служат для подвода и отвода электронов, участвующих в реакции. Сила тока, протекающего через такой преобразователь, зависит от природы реагирующих частиц, состава и концентрации электролита, приложенного напряжения, способов подачи и отвода реагентов к поверхности электродов. Процессы переноса вещества определяются главным образом миграцией, диффузией и конвекцией. Разработка преобразующих ячеек с выполнением определенных условий — пренебрежимо малым влиянием миграции, естественной конвекции и постоянным процессом диффузии — определила построение систем преобразования, использующих зависимость вынужденной конвекции от действия направленных внешних факторов.

С учетом состава и принципов действия рассмотренных типов преобразователей, соединяющих электрохимические процессы в молекулярных средах с участием электронов электродных систем, теоретические исследования и практические разработки ведутся в рамках нового научно-технического направления — молекулярной электроники (МЭ).

При разработке измерительных преобразователей, обеспечивающих более высокие по сравнению с существующими технико-экономические показатели, учитываются требования к повышению точности, расширению диапазонов преобразования, к снижению массогабаритных параметров, уменьшению производственных и эксплуатационных затрат, которые предъявляются к современным средствам измерения и контроля. Актуальны эти требования и при разработке систем регистрации отдаленных землетрясений, измерений колебаний крупномасштабных объектов, а также систем навигации, стабилизации и управления.

В области медленно меняющихся механических процессов при низком энергетическом уровне используются два направления, основанные на различных физических процессах, происходящих в области двойного слоя:

- образование разности потенциалов при протекании полярной жидкости через капилляр (или пористое тело) — *электрокинетический способ преобразования*;
- изменение силы протекающего тока через электрохимическую ячейку с окислительно-восстановительной системой за счет конвективного изменения концентрации электроактивных компонентов — *диффузионный способ преобразования*.

Перспективность диффузионных преобразователей, построенных на высокообратимых окислительно-восстановительных системах, обусловлена физико-химическими процессами, происходящими в жидком теле с весьма малыми значениями сдвиговых напряжений ( $10^{-3}$  Н/м<sup>2</sup>) и высокой концентрацией электропроводящих и электроактивных компонентов (до  $10^{27}$  м<sup>-3</sup> и  $10^{26}$  м<sup>-3</sup> соответственно), благодаря чему маломощный входной механический сигнал управляет в  $10^4 \dots 10^6$  раз более мощным выходным электрическим сигналом.

МЭ преобразователи по своей физической сущности являются низкочастотными, так как подвижность носителей электрических зарядов — ионов в растворе — во много раз меньше подвижности электронов в твердом теле или газе. Известные в настоящее время приборы такого типа имеют ограничения и по нижней частоте (0,1...1 Гц) и по динамическому диапазону ( $10^{-5} \dots 10^{-1}g$ ), что определяется принципиальными особенностями диффузионных систем. Преобразователи электрокинетического типа работают в более высокочастотной области (до десятков килогерц), но обладают меньшей чувствительностью в низкочастотной области. Для диффузионного преобразователя с конвективным переносом зарядов уравнение пограничного диффузионного слоя может быть представлено в виде

$$V_x \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \frac{\partial C}{\partial y} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2},$$

где  $C$  — концентрация электроактивного компонента в электролите;  $D$  — коэффициент диффузии;  $V_x$ ,  $V_y$  — скорости течения электролита по координатам  $x$ ,  $y$ .

Описание гидродинамики и диффузии в канале преобразователя предполагает совместное решение уравнений Навье—Стокса и конвективной диффузии. Решение системы уравнений можно заменить независимым решением уравнения гидродинамики и использовать полученный результат для решения уравнения конвективной диффузии. Плотность тока, характеризующая скоростью диффузии электроактивных ионов электролита к считывающему электроду, и полная сила тока определяются следующими выражениями:

$$i = FD \frac{\partial C_3}{\partial n}; \quad I = FD \int_S \frac{\partial C_3}{\partial n} dS_3,$$

где  $F$  — число Фарадея;  $S_3$  — площадь поверхности считывающего электрода;  $n$  — нормаль к фронтальной поверхности, определяющей движение электролита;  $C_3$  — концентрация электролита в приэлектродной зоне.

Распределение безразмерной концентрации  $\theta$  для цилиндрического канала определяется выражением

$$\theta = \frac{C_3}{C_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2I_0(\lambda_n \frac{2z}{d})}{\lambda_n I_1(\lambda_n)} \exp(-\lambda_n^2 F_0),$$

где  $I_0$ ,  $I_1$  — функции Бесселя первого рода нулевого порядка;  $\lambda_n$  — корни функции Бесселя;  $C_0$  — концентрация электролита в основном объеме, практически равная исходной  $C$ ;  $z$  — зарядность ионов;  $F_0 = 4Dt/d^2$ .

Среднее значение концентрации  $\bar{\theta}$  в элементарном объеме в функции времени  $t$  определяется формулой

$$\bar{\theta} = \frac{\bar{C}_3(t)}{C_0} = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \exp(-\lambda_n^2 F_0);$$

$$\bar{C}_3(t) = \frac{2}{r^2} \int_0^{d/2} r C_3(r, t) dr,$$

где  $r$  — текущий радиус элементарного объема;  $b_n = 4/\lambda_n$ .

Изменение средней концентрации в потоке электролита определяется как

$$\pi r^2 \frac{\partial C}{\partial t} dx = \pi r^2 C_0 \frac{\partial \theta}{\partial t} = -J_x 2\pi r dx.$$

Поток массы электролита на стенках цилиндрического канала

$$J_x(t) = 0,5r C_0 \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{C_0 D}{2r} \sum b_n \lambda_n^2 \exp\left(-\frac{\lambda_n^2 D t}{r^2}\right).$$

Учитывая, что  $t = x/V$  и интегрируя по активной поверхности считывающего электрода, получим зависимость силы тока преобразователя от гидродинамического потока электролита и от перепада давления:

$$I = zF \int_0^{S_3} J\left(\frac{x}{V}\right) dx =$$

$$= \pi r^2 z F C_0 V \sum_{n=1}^{\infty} b_n \left[ 1 - \exp\left(\frac{\lambda_n^2 D t}{r^2}\right) \right] =$$

$$= \frac{\pi r^4 z F C_0}{8 \mu l} \Delta P \sum_{n=1}^{\infty} b_n \left[ 1 - \exp\left(\frac{\lambda_n^2 D t}{r^2}\right) \right],$$

где  $\mu$  — динамическая вязкость электролита;  $z$  — зарядность ионов;  $l$  — длина катода;  $\Delta P$  — перепад давления.

Ток преобразователя представляет сумму бесконечного числа экспонент, затухающих с постоянной времени  $T_d = h^2/\lambda_n^2 D$ , где  $h$  — межэлектродное расстояние. В практических расчетах ограничиваются первым слагаемым:

$$I = 2,2 r^2 z F C_0 V [1 - \exp(-5,75 D t / r^2)] =$$

$$= \frac{0,2752 r^2 z F C_0}{\mu l} \Delta P [1 - \exp(-5,75 D t / r^2)]. \quad (1)$$

Минимальное значение длины катода  $l$ , при котором выходной ток можно считать с заданной погрешностью линейной функцией, равно:  $l_{кр} = -0,132 \ln BVh^2/D$ , где  $B$  — отклонение от линейности. Начальный ток преобразователя ( $I_n = z F C_0 / \delta$ ;  $\delta$  — толщина двойного электрического слоя) и его частотный диапазон зависят от числа подводимых в единицу времени к электродам считывания электроактивных ионов. Интенсивность такого подвода определяется коэффициентом диффузии и может быть увеличена путем введения постоянной конвекции, например, с помощью ультразвука. Расширение частотного диапазона при этом приводит к заметному схемному усложнению.

В конструкциях с перемещающимися электродами диффузионный ток характеризуется следующими выражениями:

$$I_{01} = z F D C_0 b \Delta x / h; \quad I_{02} = z F D C_0 b S_K / (a + \Delta a),$$

где  $a$  — начальное расстояние между электродами;  $\Delta x < \delta$ ;  $\Delta a < \delta$ .

Принципиально такие системы работоспособны с нулевой частоты, однако получить достаточную точность, определяемую фиксированием перемещения электродов в одном направлении в пределах толщины диффузионного слоя, без изменения остальных геометрических параметров, крайне затруднительно.

Передаточные функции диффузионного преобразователя будут иметь вид

$$W_{\delta 1}(p) = \frac{I(p)}{\Delta P(p)} = \frac{K_{\delta 1}}{T_{\delta} p + 1};$$

$$W_{\delta 2}(p) = \frac{I(p)}{V(p)} = \frac{K_{\delta}}{T_{\delta} p + 1};$$

$$W_{\delta 3}(p) = \frac{I(p)}{x(p)} = \frac{K_{\delta} p}{T_{\delta} p + 1}; \quad (2)$$

где

$$K_{\delta 1} = 0,0172 C_0 z F d^2 / (\mu l); \quad K_{\delta} = 0,55 C_0 z F d^2;$$

$$T_{\delta} = d^2 / 23 D; \quad d = 2r; \quad (3)$$

$x$  — смещение электролита.

Для преобразователя с переменной площадью электродов получим [4]:

$$W'(p) = \frac{I(p)}{x(p)} = \frac{K_{\delta}}{T_{\delta} p + 1}; \quad (4)$$

$$K_{\delta} = 2,2 C z F D d_3 / \delta, \quad (5)$$

где  $d_3$  — диаметр электрода.

Полученные характеристики преобразования для элементарных форм канала — плоской щели, цилиндрической и пористой — позволяют оптимизировать гидродинамические и диффузионные процессы и определить направления расширения частотного динамического диапазонов.

Актуальной проблемой для изучения пространственного распространения неэлектрических сигналов — сейсмических, акустических, гидроакустических и других, является исследование идентичности характеристик МЭ измерительных устройств. Перспективным направлением можно считать разработку методов гибкой коррекции и разработку адаптивных систем, обеспечивающих устойчивую работу в изменяющихся условиях. Принципиальные особенности МЭ систем, обладающих большой энергетической емкостью двойного электрического слоя, определяют широкие возможности параметрического управления основными характеристиками преобразователя.

Решение этих задач и разработка методов расчета и проектирования измерительных устройств с различными типами МЭ преобразователей, оптимизация согласованного взаимодействия МЭ и других физических методов преобразования позволят создать новый класс преобразователей механических сигналов с улучшенными характеристиками и расширенными функциональными возможностями [3, 4].

Расширение частотного и динамического диапазонов, повышение точности могут быть достигнуты при построении системы с согласованным взаимодействием МЭ и инерционного преобразователей, а также с помощью обратных связей, обеспечивающих коррекцию динамических свойств общей це-

пи за счет изменения характерных параметров в соответствии с вариациями входного сигнала.

Основной теоретической задачей является разработка обобщенной для различных схем взаимодействия математической модели, позволяющей проводить машинный синтез и анализ систем измерения для различных диапазонов входных сигналов на фоне шумов и помех.

Анализ физических процессов в различных электрохимических системах определяет направления исследований и разработок методов технологической коррекции характеристик МЭ преобразователей. Новые перспективы открываются при изучении механизмов суперпозиционного воздействия электрических и электромагнитных процессов на основной (электрохимический) процесс преобразования.

Разработка инвариантной математической модели, описывающей различные по принципу действия и сложности структуры, позволит перейти к единой методике машинного проектирования и исследования измерительных систем практически любого назначения, существенно сократив технологические процессы синтеза и анализа [4, 5].

Одним из направлений повышения качественных показателей МЭ преобразователей неэлектрических величин является построение систем согласованного взаимодействия инерционного, молекулярно-электронного и обратных силовых преобразователей.

Важной задачей является построение многоканальной системы регистрации распределенных волновых полей, определяющей требования по идентичности характеристик преобразователей, что может быть достигнуто путем жесткой и гибкой коррекции динамических свойств измерительного канала, в первую очередь, преобразователя-приемника сигналов.

### Моделирование инерционного МЭ преобразователя

Зависимость выходного тока МЭ диффузионного преобразователя от входного механического сигнала определяется характеристиками собственно преобразователя и его инерционной части.

Математическая модель системы преобразования с жидкостной массой находится с помощью структурного анализа или методом электромеханических аналогий по эквивалентной электрической схеме и может быть представлена в виде обобщенной передаточной функции, объединяющей диффузионный и инерционный процессы [5]:

$$W(p) = \frac{I(p)}{x(p)} = \frac{K_0 T_1 T_2 p^n}{(T_1 p + 1)(T_2 + 1)(T_0 + 1)}; \quad n = 2, 3;$$

$$T_1 = \frac{R_\Gamma S^2}{K} \gg T_2 = \frac{M}{R_\Gamma S^2}; \quad T_0 = d^2/23D, \quad (6)$$

где  $M$  — инерционная масса;  $K$  — жесткость упругих элементов;  $R_\Gamma$  — гидросопротивление;  $S$  — эффективная площадь мембран.

Значение  $T^2 = T_1 T_2 = M/K$ , входящее в общий коэффициент преобразования  $K_{об} = K_0 T^2$  при использовании рабочей жидкости в качестве инерционной массы, что имеет место в большинстве конструкций, весьма мало (порядка  $10^{-3} \text{ с}^2$ ). Его увеличение ограничено одновременным увеличением жесткости упругих элементов — мембран. Используя основную особенность МЭ чувствительного элемента — его значительное гидросопротивление, путем подключения дополнительных инерционных элементов (массы из материала с высокой плотностью, установленной на упругом подвесе) удастся заметно повысить значение  $T^2$  (в 10 и более раз). Эффективность такого построения заключается в том, что для низкочастотной области комплексное сопротивление, характеризующее инерционностью и жесткостью, меньше скоростного сопротивления, определяемого величиной  $C_v = R_\Gamma S^2$ . Механическая система в этом случае имеет две степени свободы. При соотношении жесткостей подвеса  $K$  (основной инерционной массы  $M$ ),  $K_1$  (жидкостной массы  $m$ ) и жесткости их соединения  $K_2$

$$K \ll K_1 \gg K_2$$

математическая модель МЭ преобразователя в области низких частот принимает вид исходной функции (6). При указанном соотношении обеспечивается наиболее полная передача энергии входного сигнала в поток электролита, преобразуемый в пропорциональный электрический сигнал. Для данной системы можно получить АЧХ по смещению в области низких частот, если выполнить условие:  $K_2/K_1 < 1 = \alpha$ ;  $K \gg K_1$ . Передаточная функция может быть записана в виде

$$W_H(p) = \frac{W_H(p)}{1 + W_H(p)W_K(p)}, \quad (7)$$

где  $W_H(p) = \frac{T^2 p^2}{T^2 p^2 + 2\beta T p + 1}$  — функция исходной системы;

$$W_K(p) = \frac{\alpha(T_K^2 p^2 + 2\beta_K T_K p + 1)}{T_{K1}^2 p} \quad \text{— функция звена}$$

жесткой обратной (компенсационной) связи;

$$T_K = T_{K1} + T_{K2} \sqrt{\frac{M}{K+K_1}} + \sqrt{\frac{M}{K_2}};$$

$$\beta = \frac{C_v}{2\sqrt{KM}} \quad \text{— коэффициент демпфирования};$$

$$\beta_K = \frac{C_v}{2\sqrt{(M+m)(K+K_1)}}.$$

Формула (7) позволяет определить значения основных параметров и установить диапазоны режимов работы (по смещению, скорости, ускорению).

Структура МЭ систем благодаря большой подвижности электролита и его электроактивных компонентов позволяет изменять основные параметры как при построении, так и в процессе работы. Регулировка геометрии измерительного канала, активной площади электродов позволяет расширить динамический диапазон, изменение концентрации электролита приводит к изменению коэффициента преобразования. Имеется возможность воздействовать на характеристики и путем варьирования инерционных параметров. Эффективным способом управления характеристиками является применение обратной связи, охватывающей различные участки цепи преобразования [4]. Внутренняя обратная связь, осуществляемая путем изменения концентрации в приэлектродных зонах, для инерционных преобразователей пропорциональна первой, второй и третьей производным от смещения и изменяет коэффициент преобразования на всех режимах. Однако в области низких частот АЧХ по ускорению имеет наклон 20 дБ/дек, что определяет интегрирование входного сигнала.

Более широкая коррекция достигается внешней обратной связью с помощью электроосмотического преобразователя, осуществляющего дополнительное силовое воздействие на основную систему через любой ее элемент [4].

В области низких частот электроосмотический преобразователь является усилительным звеном с коэффициентом преобразования  $K_\xi$ , который характеризуется силой  $F_{дв}$ , развиваемой электроосмотическим давлением  $P$  под действием приложенного напряжения  $U$  и определяется дзета-потенциалом  $\xi$  и параметрами электроосмотического преобразователя (радиусом  $r_\Pi$  и числом  $N$  пор, площадью мембраны  $S_M$ , площадью перегородки  $S_{эф}$ ):

$$K_\xi = \frac{P}{U} = \frac{F_{дв} S_{эф}}{U} = \frac{2\xi\varepsilon}{\pi r_\Pi^2} = \frac{2\xi\varepsilon N}{S_M},$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая постоянная.

Параллельное соединение прямого и обратного преобразователей образует систему с одной степенью свободы. Последовательное соединение через упругий или демпфирующий элементы дает систему с двумя степенями свободы и многоконтурную обратную связь, увеличивая ее воздействие.

Сравнительный анализ проведен по аналитическим выражениям различных систем с приведенными характерными параметрами (постоянной времени  $T$ , коэффициентом демпфирования  $\beta$ , коэффициентом преобразования  $K_\delta$ ) и определены значения коэффициентов обратной связи. Характеристики определялись по инвариантным моделям пониженного порядка, аппроксимирующим ис-

ходные модели, представляющие собой дробно-линейные функции 3-го порядка для систем с одной степенью свободы и 5-го порядка для систем с двумя степенями свободы:

$$W_1(p) = \frac{K_\delta T^2 p^{2-s}}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 \pm KK_\xi p^{2-s-r}};$$

$$W_2(p) = \frac{K_\delta T^2 p^{1-s} (b_2 p^2 + b_1 p + b_0)}{a_5 p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 \pm KK_\xi p^{2-s-r}}.$$

Здесь коэффициенты  $p$  при операторе  $a, b$  устанавливаются по характерным параметрам для конкретных схем:

$$a_0 = 1; a_1 = T_\delta + 2\beta T; a_2 = 2\beta T T_\delta + T^2;$$

$$a_3 = T^2 T_\delta; a_4 = T_1^2 T_2^2; a_5 = T_1^2 T_2^2 T_\delta;$$

$$b_0 = T_1 + T_2; b_1 = 2\beta T_1 T_2; b_2 = T_1^2 T_2^2;$$

показатель степени  $s$  определяет измеряемый параметр;  $r$  — характеризует параметр обратной связи.

Понижение порядка выполнялось на основании условия равенства интегральных квадратичных оценок динамических процессов, описываемых исходным и упрощенным уравнениями:

$$\int_0^\infty [X^{(j)}]^2 dt = \int_0^\infty [X_1^{(j)}]^2 dt; \quad (j = 0, 1, 2, \dots, m-1);$$

где  $X, X_1$  — координаты исходного и пониженного уравнений;  $m$  — порядок пониженного уравнения.

Большую точность дает метод раздельной аппроксимации — в низкочастотной области, когда приравниваются первые производные ( $i = 0, 1, \dots, m-1$ ), и в высокочастотной — когда приравниваются высшие производные ( $j = n-m, n-m+1, \dots, n-1$ ). В результате понижения порядка найдены следующие выражения передаточных функций:

- для систем с одной степенью свободы

$$W_1(p) = \frac{K_\delta T^2 p^n}{a_3 p^2 + \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3}{a_1} p + a_0 a_1 + \xi^m},$$

где  $a_i$  — обобщенные коэффициенты.

Коэффициент  $\xi^m$  принимает следующие значения: при воздействии обратной связи по ускорению  $\xi'' = KK_\xi$ ; по скорости  $\xi' = \frac{A_0 a_3 K' K_\xi}{a_1 (a_1 + K' K_\xi)} + KK_\xi$ ; по смещению  $\xi = KK_\xi p + \alpha KK_\xi$ ;

- для систем с двумя степенями свободы

$$W_2(p) = \frac{K_\delta T^2 p^n}{a_{30} p^2 + \frac{a_{10} a_{20} - a_0 a_{30}}{a_{10}} p + a_0 a_{10} + \xi^m}$$

Сравнение АЧХ, рассчитанных по исходным и инвариантным моделям с применением программы AlgEq.exe, показало: точность аппроксимации составляет от 0 до 5 %, время вычислений сокращается до 40 %. Точность численного автоматизированного решения составляет от 15 до 37 %.

Воздействие обратной связи оценивается по изменению характерных обобщенных параметров. Для систем с одной степенью свободы обратная связь, пропорциональная второй производной, характеризуется коэффициентом  $KK'_\xi$  и изменяет коэффициент демпфирования — отрицательная обратная связь увеличивает его, а положительная ограничена значением

$$T(2\beta T_\delta + T) > |KK'_\xi| > \frac{2\beta T(T^2 + T_\delta^2 + 2\beta TT_\delta)}{T_\delta + 2\beta T} \approx 2\beta TT_\delta.$$

Положительная обратная связь по смещению уменьшает собственную частоту и увеличивает коэффициент демпфирования. При этом коэффициент обратной связи ограничивается следующим значением

$$1 > |KK_\xi| < \frac{2\beta(T_\delta^2 + 2\beta TT_\delta + T^2)}{TT_\delta}.$$

Характер влияния обратной связи в системах с двумя степенями свободы такой же. Коэффициенты обратной связи характеризуются соотношениями

$$|KK_\xi| < a_2 \text{ — по смещению;}$$

$$a_{10} > |KK'_\xi| < \left( \frac{a_{10} T_\delta + a_{20}}{2} \pm \sqrt{\frac{(a_{10} T_\delta + a_{20})^2}{4} - a_{10} a_{20} + a_0 a_{30}} \right) \text{ — по скорости;}$$

$$\frac{a_2 a_{10}}{a_2 T_\delta + a_3} > |K'K'_\xi| < \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3 + a_0 a_2 T_\delta \xi}{a_2 T_\delta + a_3} \text{ — по ускорению.}$$

Коэффициенты  $a_i$  определяются через исходные параметры — коэффициент демпфирования  $\beta$  и механическую постоянную времени  $T$ .

## Выводы

На основе анализа инвариантных математических моделей установлено [4, 5]:

- положительная обратная связь по ускорению увеличивает чувствительность во всем исследуемом диапазоне (выше  $f_H$ ), при этом АЧХ имеет подъем 40 дБ/дек в сторону повышения частот;
- скоростная обратная связь позволяет получать горизонтальный участок АЧХ в некотором диапазоне частот или узкополосный низкочастотный фильтр с дополнительным усилением;
- обратная связь по смещению расширяет диапазон по скорости в сторону низких частот; использование двухконтурной обратной связи по скорости и смещению и интегрирующего звена в прямой цепи расширяет частотный диапазон по смещению и увеличивает чувствительность;
- системы с двумя степенями свободы имеют большую чувствительность на всех режимах измерения и больший диапазон того же характера изменений характеристик.

Направления исследований определяются разработкой (на основе изучения физических процессов диффузионной и электрокинетики) теоретических положений молекулярной электроники, современных методов синтеза и анализа МЭ преобразователей информации, расширяющих арсенал информационно-измерительных устройств и систем.

Методы построения инвариантных математических моделей и методы синтеза и анализа по таким моделям, обеспечивающие упрощение и сокращение времени исследований, могут быть применены при исследованиях преобразующих систем различного назначения, основанных на любых физических принципах.

## Список литературы

1. Делакс П. Двойной слой и кинетика электродных процессов. М.: Мир, 1967.
2. Введение в молекулярную электронику / Под общей ред. Н. С. Лидоренко. М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Графов Б. М. Теория квазиравновесных электрохимических реакций. Дисс. ... на соискание ученой степени д-ра хим. наук. М., ИЭЛАН, 1970. 345 с.
4. Желонкин А. И. Молекулярно-электронные аналоговые преобразователи неэлектрических сигналов. М.: Квадрат — С, 2004. 140 с.
5. Желонкин А. И. Инвариантный метод спектрального анализа систем преобразования сигналов // Технология приборостроения. 2003. № 4 (8). С. 24—30.

С. А. Хворостов, акад. РАМН  
НПО "Экомед"

## ВЛИЯНИЕ АВТОНОМНОГО МИКРОРОБОТА "ЭЛЕКТРОННЫЙ НОРМАЛИЗАТОР" НА СОСТОЯНИЕ УГЛЕВОДНОГО И ЛИПИДНОГО ОБМЕНА У БОЛЬНЫХ САХАРНЫМ ДИАБЕТОМ

*Описываются результаты применения микроробота "Электронный нормализатор", который не содержит привычных для инженерного понимания манипуляторов, а в жидкостной среде организма продуцирует электрохимический процесс для лечения больных сахарным диабетом.*

Разработанный НПО "Экомед" автономный микроробот "Электронный нормализатор" (ЭН) типа 01 представляет собой микроэлектронную капсулу (проглатываемый процессор со встроенным источником питания, цилиндрический сфероид размером  $\varnothing 11 \times 22$  мм), не содержащую манипуляторов, которая воздействует на гомеостаз электрическими полями, импульсными токами и ионным облаком, формируемым микропроцессором устройства в электрохимических средах организма. ЭН создан на базе работы "Комплекс-1" (г. Ленинград, 1982 г.), не является традиционным медикаментозным средством, нехимичен и не вызывает аллергических и токсических реакций, корректируя ошибки, накопившиеся в системе управления.

ЭН является автономным устройством, состоящим из двух металлических полукорпусов, внутри которых размещен микропроцессор и блок питания. Процессор обеспечивает контроль проводимости между колпаками, переключение токовых режимов, содержит встроенную нагрузку, устройство защиты от короткого замыкания и пр. Его задачей также является формирование ионного потока и его пространственная регуляция.

Микроробот ЭН не содержит привычных для инженерного понимания манипуляторов, а в жидкостной среде организма продуцируется электрохимический процесс, при котором оторванные ионы движутся по силовым линиям многоструктурного электрического поля. Интегральная траектория содержит точки перегиба, где ион приобретает ускорение, равное нулю, тормозится и остается в тканях организма, устраняя микроэлементный дефицит. Пространственная структура ионного облака представляет собой тело вращения размером около 20 см и диаметром 15 см. Деформация этой полевой структуры достигается изменением струк-

туры и АЧХ слагающих ее полей, что позволяет выборочно воздействовать на различные виды обменов и гомеостаз живого организма.

Вторым видом манипуляторов является собственная мышечная система организма, на которые ЭН воздействует токовым сигналом. Поля содержат сверхнизкочастотные, низкочастотные и высокочастотные составляющие, часть из которых необходима для преодоления сопротивления организма внешнему воздействию, а часть является собственно сигналом коррекции.

Программа испытаний начата в 1989 г. и продолжается до настоящего времени. Во всех видах медицинских испытаний отмечается отсутствие последующего модуляционного эффекта, что позволяет предположить взаимосвязь высокой эффективности влияния ЭН с его способностью вовлечения в гомеостаз неиспользуемых, резервных возможностей организма. Приводимые результаты многократно задублированы испытаниями в других клиниках и центрах МЗ, МО, РАМН. Наблюдения за испытуемыми через пять лет показали остаточный сниженный уровень ЛПНП.

По данным А. S. Krolewski и соавторов [1], у больных сахарным диабетом (СД) 1-го типа летальность вследствие инфаркта миокарда в возрасте 55 лет составляет 35 % по сравнению с 6 % у лиц того же возраста, но не страдающих диабетом. Повышение частоты инфаркта миокарда у больных СД является следствием нескольких факторов: автономной нейропатии, микроангиопатии и диабетической кардиомиопатии. СД — частая причина слепоты, смерти от уремии. Более 40 % всех не обусловленных травмой ампутаций нижних конечностей проводится в связи с синдромом диабетической стопы и гангреной нижних конечностей. Дистальная полинейропатия и автономная нейропатия являются причиной низкого качества жизни, нарушения трудоспособности и инвалидизации большого числа больных СД.

Несмотря на общность патогенеза макро- и микроангиопатий клинические и патоморфологические характеристики этих поражений различны. Атеросклероз, который значительно чаще встречается при СД, развивается как результат взаимодействия нескольких факторов риска: гиперлипидемии и дислипидемии, инсулиновой резистентности и гиперинсулинемии, гипертензии, повышенной агрегации тромбоцитов, повышения свертываемости крови, снижения фибринолиза, нарушения функции эндотелия сосудов. Потенциальные атерогенные факторы при диабете [2]:

- изменение артериальной сосудистой стенки — изменения в клеточной биологии, эндотелиальных клеток, клеток гладкой мускулатуры; изменения метаболизма, липогенез, стимулированный инсулином, накопление сорбитола, гипоксия, накопление конечных продуктов гликозилирования;
- гипертензия;

- нефропатия — с гипертензией или без нее, недостаточность функции почек, микро- и макроальбуминурия;
- нарушение тромбогенеза — патология тромбоцитов, повышение уровня фибриногена, снижение активности PAI-1 (ингибитор-1 активатора плазминогена);
- гипергликемия;
- ожирение (самостоятельное влияние или через другие атерогенные факторы);
- гиперинсулинемия и/или резистентность к инсулину;
- дислипидемия.

Макроангиопатия при СД практически не отличается от атеросклеротического поражения сосудов, которое имеет место и у больных без диабета, но поражение сосудов у больных диабетом проявляется на 8—10 лет раньше, чем у их сверстников, не страдающих диабетом. Одним из факторов развития атеросклероза при СД наряду с нарушением углеводного обмена является дислипидемия, которая в большей степени и более часто имеет место при СД 2-го типа. Нарушение липидного обмена, как правило, не сопровождается достоверными изменениями концентрации холестерина липопротеидов низкой плотности (ЛПНП) в плазме крови [3]. Изучению патогенеза нарушений липидного обмена при СД и методам его коррекции посвящено большое число работ [4—6]. Тем не менее, вопросы эффективной терапии нарушенного обмена липидов при СД остаются актуальными.

## Материалы и методы

Целью исследования было изучение влияния "Электронного нормализатора" (ЭН), разработанного и производимого НПО "Экомед", на состояние углеводного и липидного обмена при СД. В предыдущих наших исследованиях показано, что прием ЭН у больных СД 1- и 2-го типа способствует нормализации липидного обмена и на 30-й день после приема капсулы отмечалось достоверное снижение исходно повышенного уровня холестерина, триглицеридов, липопротеидов низкой плотности, при одновременном существенном повышении концентрации липопротеидов высокой плотности (М. И. Балаболкин, 1994).

Исследования по изучению влияния капсул ЭН проведены по методикам Всемирной организации здравоохранения двойным слепым методом. Из 95 больных СД 2-го типа выбраны 20 больных, у которых отмечалась различная степень нарушений липидного обмена и которые дали информированное согласие на участие в проводимых исследованиях. После рандомизации больные разделены на две группы по 10 человек (1-я — двое мужчин и восемь женщин; 2-я — трое мужчин и семь женщин). Больные женского пола были в возрасте от 43 до 66 лет ( $56,4 \pm 7,5$ ), с длительностью заболевания от 1 до 22 лет ( $10,13 \pm 3,18$  лет). Возраст обследован-

ных мужчин составлял от 45 до 69 лет (в среднем  $53,2 \pm 7,3$ ). Длительность заболевания была от 2 до 16 лет ( $9,8 \pm 3,1$  лет). В стационаре проводилось полное обследование: анализы крови, содержание иммунореактивного инсулина-ИРИ, С-пептида, эстрадиола, тестостерона, свободного тироксина и кортизола, гликированного гемоглобина.

Исследования биохимических и гормональных показателей проводились до приема капсулы ЭН и через 30 дней после приема. В тот же день (после взятия крови для исследования) больной получал вторую капсулу ЭН. Еще через 30 дней (или на 60-й день после приема первой капсулы) вновь проводили перечисленные биохимические и гормональные исследования. Больные по поводу основного заболевания принимали различные сахароснижающие препараты: манинил, диабетон или глюренорм, а часть больных с инсулинопотребной формой СД 2-го типа — пероральные препараты в сочетании с инсулинотерапией. В период проведения исследований использовано 20 действующих капсул ЭН (ТУ 9444-014-1155014) и 20 плацебо.

## Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены данные о состоянии углеводного обмена у больных, которые получили капсулу ЭН.

Таким образом, через 30 дней после приема капсулы ЭН отмечалось достоверное снижение среднесуточной гипергликемии, глюкозурии. Однако нормализации или компенсации углеводного обмена не было достигнуто, об этом свидетельствует и достоверное снижение содержания гликированного гемоглобина через 60 дней после приема капсулы ЭН. Разница содержания ИРИ и С-пептида у 10 больных, получивших вначале капсулу ЭН, достоверна ( $p < 0,025$  и  $p < 0,001$  соответственно). Следует отметить, что наблюдаемое повышение секреции ИРИ и С-пептида, как и их концентрация до приема капсулы, находились в пределах нормальных значений у здоровых лиц без нарушений углеводного обмена. У больных после

Таблица 1  
Показатели углеводного обмена у больных СД до и после приема капсулы ЭН

Показатели	До приема	После приема через 30 дней	Ошибка измерения $p$
Среднесуточная гликемия, ммоль/л	$9,98 \pm 0,37$	$7,99 \pm 0,49$	$<0,048$
Среднесуточная глюкозурия, г/сут	$57,61 \pm 5,02$	$22,76 \pm 3,85$	$<0,025$
Гликированный гемоглобин (HbA1c), %	$10,31 \pm 0,37$	$8,1 \pm 0,31^*$	$<0,048$
ИРИ, мкЕД/мл	$16,66 \pm 2,91$	$26,69 \pm 3,89$	$<0,025$
С-пептид, нмоль/л	$0,43 \pm 0,05$	$1,0 \pm 0,13$	$<0,001$
*Через 60 дней приема активной капсулы.			

Таблица 2  
Показатели липидного обмена у больных СД до и после приема ЭН

Показатели	До приема	После приема через 30 дней	Ошибка измерения <i>p</i>
Общий холестерин, ммоль/л	8,66 ± 0,44	6,37 ± 0,37	<0,001
Холестерин липопротеидов низкой плотности, ммоль/л	4,75 ± 0,45	3,39 ± 0,44	<0,027
Холестерин липопротеидов высокой плотности, ммоль/л	1,25 ± 0,13	1,78 ± 0,26	<0,048
Триглицериды, ммоль/л	4,17 ± 1,06	2,55 ± 0,5	<0,027

назначения капсулы-плацебо через последующие 30 дней концентрация ИРИ в сыворотке крови снизилась до 11,9 + 1,63 мкЕД/мл, а уровень С-пептида — до 0,5 + 0,06 нмоль/л ( $p < 0,003$ ) по сравнению с уровнем через 30 дней после приема капсулы и отсутствие статистической разницы с этими же показателями до приема капсулы ЭН. В табл. 2 представлены показатели уровня липидов в сыворотке крови у больных через 30 дней после приема капсулы ЭН.

У больных этой группы через 30 дней после приема плацебо показатель общего холестерина в сыворотке крови был 7,17 + 0,23 ммоль/л, что означает отсутствие достоверной разницы по сравнению с 30-м днем после приема активной капсулы ЭН, но уровень холестерина по сравнению с исходным отличается статистически достоверно ( $p < 0,02$ ). Содержание триглицеридов в сыворотке крови через 30 дней после приема капсулы плацебо составило 2,76 + 0,33 ммоль/л (разница недостоверна), холестерина ЛПВП 1,42 ± 0,1 ммоль/л (разница недостоверна). Содержание холестерина ЛПНП в сыворотке крови через 30 дней после приема плацебо повысилось по сравнению с уровнем на 30-й день после приема активной капсулы и составило 4,28 ± 0,48 ммоль/л, т. е. отмечено некоторое снижение уровня холестерина ЛПНП по сравнению с исходным значением (различие недостоверно).

Таблица 3  
Показатели углеводного обмена у больных СД, получивших капсулу плацебо

Показатели	До приема	После приема плацебо	Ошибка измерения <i>p</i>
Среднесуточная гликемия, ммоль/л	10,03 ± 1,77	8,97 ± 1,69	нд
Суточная глюкозурия, г/сут	76,60 ± 2,9	28,73 ± 1,9	<0,05
ИРИ в сыворотке крови, мкЕД/ед	11,7 ± 1,61	17,68 ± 3,35	нд
С-пептид, нмоль/л	0,25 ± 0,03	0,46 ± 0,16	<0,05
Гликированный гемоглобин (HbA1c), %	9,51 ± 0,48	9,44 ± 0,38	нд
Примечание. нд — недостоверно.			

Показатели углеводного обмена у больных СД, которые вначале получили капсулу плацебо, выявило некоторые закономерности (табл. 3).

Несмотря на некоторое улучшение показателей углеводного обмена у больных этой группы не была достигнута компенсация диабета. Содержание ИРИ в сыворотке крови до приема капсулы плацебо на 30-й день после приема статистически недостоверно. Через 30 дней после приема активной капсулы у больных этой же группы уровень ИРИ в сыворотке крови повысился до 29,63 ± 2,81 мкЕД/мл ( $p < 0,003$ ; разница достоверна); разница уровней ИРИ до приема плацебо и на 30-й день после приема активной капсулы также достоверна ( $p < 0,004$ ). Содержание С-пептида до приема плацебо составило 0,25 ± 0,03 нмоль/л; через 30 дней после приема капсулы плацебо — 0,46 ± 0,16 нмоль/л (разница недостоверна). Через 30 дней после приема активной капсулы у больных этой группы уровень С-пептида крови повысился до 0,81 + 0,11 нмоль/л ( $p < 0,046$ ).

Показатели липидного обмена у больных после приема капсулы плацебо практически не изменились, тогда как через 30 дней после приема активной капсулы содержание общего холестерина снизилось до 6,44 ± 0,43 ммоль/л ( $p < 0,031$ ); достоверно и различие между содержанием холестерина на 30-й день после приема капсулы плацебо и на 30-й день после приема активной капсулы. Изменение уровня холестерина в сыворотке крови до приема капсулы плацебо и на 30-й день после приема активной капсулы недостоверно.

Содержание холестерина ЛПВП до и через 30 дней после приема плацебо осталось почти без изменений, тогда как после приема активной капсулы уровень холестерина ЛПВП повысился до 1,96 ± 0,37 ммоль/л ( $p < 0,045$ ). Аналогичная тенденция одновременно наблюдалась и в снижении холестерина ЛПНП. На 30-й день после приема капсулы плацебо его уровень не изменился, а через 30 дней после приема активной капсулы концентрация снизилась до 2,8 ± 0,42 ммоль/л ( $p < 0,002$ ). При сравнении уровня холестерина ЛПНП до приема капсулы плацебо с его содержанием на 30-й день после приема активной капсулы показатели были достоверными ( $p < 0,003$ ). Содержание триглицеридов после приема капсулы плацебо практически не изменилось, тогда как через последующие 30 дней после приема активной капсулы их уровень снизился и составил 2,39 ± 0,37 ммоль/л ( $p < 0,04$ ).

## Выводы

- Использование микроробота ЭН, производимых НПО "Экомед", в комплексной терапии сахарного диабета 2-го типа сопровождается улучшением компенсации, что подтверждается снижением уровня гликированного гемоглобина.

- Прием микроробота ЭН сопровождается достоверным повышением уровня ИРИ и С-пептида в сыворотке крови.
- Под влиянием микроробота ЭН у больных диабетом 2-го типа наблюдается статистически достоверное повышение уровня холестерина ЛПВП и снижение уровня общего холестерина, триглицеридов и холестерина ЛПНП. Липид-снижающее влияние ЭН продолжается не менее 30 дней. Отмечается долгосрочное (60-й день) позитивное действие активной капсулы на липидный обмен.
- Микроробот ЭН не является традиционным медикаментозным средством, нехимичен и не вызывает аллергических и токсических реакций, корректируя ошибки, накопившиеся в системе управления.

- Микроробот ЭН не содержит привычных для инженерного понимания манипуляторов, а в жидкостной среде организма производится электрохимический процесс.

#### Список литературы

1. **Krolewski A. S., Czyzyk A., Janeczko D. and et.** // *Diabetologia*. 1997. Vol. 13. P. 345–350.
2. **Steiner G.** // *Diabetes Care*. 1991. Vol. 14. P. 1077–1081.
3. **Savanne M. and Taskinen M. R.** // *Lancet*. 1997. Vol. 350, suppl. 1. P. 20–23.
4. **Gerrity R. G.** Arterial endothelial structure and permeability as relates to susceptibility to atherogenesis. / S. Glagov and et. // *Pathobiology of the human atherosclerotic plaque*, Springer, Berlin, 1990. P. 13–45.
5. **Ginsberg H. N.** // *Diabetes Care*. 1991. Vol. 14. P. 839–855.
6. **Балаболкин М. И.** Сахарный диабет. М.: Медицина, 1994.
7. **Патент РФ № 2071379** "Способ изменения липидного обмена".
8. **ТУ 9444-014-11555014.** Автономный микроробот "Электронный нормализатор".

## МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

УДК 539.216

**А. Т. Козаков**, д-р физ.-мат. наук,  
**А. В. Никольский**, канд. физ.-мат. наук,  
**В. В. Еремкин**, канд. физ.-мат. наук,  
**В. Г. Смотряков**, канд. хим. наук,  
 Научно-исследовательский институт физики  
 при Ростовском государственном университете

### ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МАТЕРИАЛАХ С МЕТАСТАБИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ В СВЕТЕ ЭФФЕКТА АНОМАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

*Явление аномальной электронной эмиссии (АЭЭ), первоначально обнаруженное на монокристаллических поверхностях сегнетоэлектриков с электретными свойствами, исследовано на керамиках систем твердых растворов  $PbTiO_3-CaTiO_3$  и  $PbTiO_3 - PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ . Показано, что в керамиках указанных составов АЭЭ излучается в основном границами зерен, определяющими многие важные электрофизические характеристики керамик.*

Традиционные методы электронной спектроскопии направлены на исследование электронного строения и химического состава поверхностных слоев материалов. На протяжении 10 лет нами разрабатывается методика исследования электрофизических свойств поверхности, основанная на эффекте

электронной эмиссии из поверхностей поляризованных сегнетоэлектриков, обладающих электретным эффектом [1–3]. При реализации этого метода свободная поверхность сегнетоэлектрика с предварительно инжектированным в нее неравновесным электронным зарядом облучается мягким рентгеновским излучением из алюминиевого анода ( $h\nu < 3$  кэВ). В этой области энергий возбуждение и транспорт электронов сопровождаются мощными вторично-эмиссионными процессами, в результате которых в нейтральном (неполяризованном) образце в области около нуля кинетических энергий образуется большое число электронов, составляющее по оценкам до 95 % всего вторичного электронного спектра. Спектр этих электронов  $I(E)$  для нейтрального образца, т. е. зависимость интенсивности  $I$  от кинетической энергии электронов  $E$ , обычно имеет так называемую каскадную форму с максимумом около 2–4 эВ. Экспериментальный спектр с поверхности поляризованных сегнетоэлектриков — электретов (спектр АЭЭ) с отрицательным значением потенциала имеет обычно тонкую структуру, энергетическое положение и интенсивность которой связаны с величиной и рельефом потенциала на поверхности [1–2].

Первоначально теория АЭЭ была разработана для монокристаллических сегнетоэлектриков, обладающих электретным эффектом [1–3]. Вместе с тем, наряду с монокристаллами классических сегнетоэлектриков танталата и ниобата лития [4] эффект АЭЭ был обнаружен в монокристаллах сегнетоэлектрика-релаксора магнониобата свинца

(МНС) [1–3] и в сегнетоэлектрической керамике ПКР-70 [3], представляющей собой твердый раствор на основе системы  $\text{PbTiO}_3\text{—CaTiO}_3$  (ТС—ТК, где ТС — титанат свинца, ТК — титанат кальция). Это наводит на мысль о расширении области действия эффекта АЭЭ на значительную часть материалов электронной техники.

В данной работе изучена возможность получения спектров АЭЭ в системах твердых растворов ТС—ТК и ТС—МНС, являющихся основой ряда пьезоэлектрических и электрострикционных материалов, предназначенных, например, для применения в ультразвуковых и электроакустических преобразователях, а также в высокоточных устройствах перемещения. С методической точки зрения указанные системы интересны тем, что одним из их компонентов является классический сегнетоэлектрик ТС, а другим — несегнетоэлектрический электрет ТК и релаксорный сегнетоэлектрик МНС, обладающий электретными свойствами. Это дает возможность провести экспериментальную проверку предложенных ранее теоретических соотношений между сегнетоэлектрическими и электретными свойствами [1, 2] и выявить особенности влияния нормального и релаксорного сегнетоэлектрического поведения на эффект АЭЭ.

В системе ТС—ТК для исследований был выбран следующий ряд образцов:

- монокристалл ТС, полученный выращиванием из свинцово-боратного раствора-расплава по методике [5];
- керамика ПКР-70, содержащая по оценкам спонтанной деформации ~20 % ионов кальция;
- пьезоэлектрические материалы  $\text{Pb}_{0,76}\text{Ca}_{0,24}(\text{Co}_{0,5}\text{W}_{0,5})_{0,05}\text{Ti}_{0,95}\text{O}_3$  (I),  $\text{Pb}_{0,70}\text{Ca}_{0,30}(\text{Co}_{0,5}\text{W}_{0,5})_{0,05}\text{Ti}_{0,95}\text{O}_3$  (II) и  $\text{Pb}_{0,66}\text{Ca}_{0,34}(\text{Co}_{0,5}\text{W}_{0,5})_{0,05}\text{Ti}_{0,95}\text{O}_3$  (III), изготовленные в соответствии с методикой [6];
- керамика титаната кальция, полученная спеканием при температуре 1530—1550 К с использованием 3 вес. % стеклодобавки состава  $0,4\text{PbO—}0,4\text{B}_2\text{O}_3\text{—}0,2\text{GeO}_2$ .

В системе твердых растворов ТС—МНС исследовались керамические образцы с содержанием ТС в количестве 7,5 и 25 мол. %. Синтез осуществлялся при температуре 1070 К (4 ч) с использованием  $\text{MgNb}_2\text{O}_6$  в качестве промежуточного соединения,

спекание проводили при температуре 1530 К в течение 2 ч.

ПКР-70 и материалы I, II, III обладают свойственной ТС тетрагональной кристаллической структурой, описываемой пространственной группой симметрии  $R4mm$ , и при комнатной температуре являются сегнетоэлектриками. В этом ряду ПКР-70 согласно [7, 8] имеет наибольшие значения спонтанной деформации тетрагональной перовскитовой ячейки  $c/a = 1,048$  и температуры Кюри  $T_c = 597$  К, а также минимальную относительную диэлектриче-

скую проницаемость  $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0 = 120$ . По мере увеличения содержания ионов кальция в керамиках I, II и III спонтанная деформация решетки при комнатной температуре уменьшается, а относительная диэлектрическая проницаемость растет (табл. 1). В табл. 1 также приведены значения спонтанной поляризации, рассчитанные исходя из имеющейся связи однородного параметра деформации  $\delta$  и спонтанной поляризации [9]:

$$\delta \approx 2/3((c/a) - 1), \quad \delta = k P_S^2, \quad (1)$$

где  $k = 0,76 \cdot 10^7 \text{ см}^4/\text{Кл}^2$ .

Таким образом, исследование спектров АЭЭ в кристаллах ТС, керамиках ПКР-70, I, II и III дает возможность рассмотреть эффект в условиях плавно изменяющейся спонтанной деформации, а следовательно, и спонтанной поляризации, характеризующей сегнетоэлектрическое состояние. Твердый раствор ТС—МНС с содержанием титаната свинца 7,5 мол. % при комнатной температуре находится в релаксорном состоянии, а при 25 мол. % содержании титаната свинца является нормальным сегнетоэлектриком [10]. Значения поляризации и другие параметры для этих составов приведены в табл. 2. Таким образом, образцы этой системы позволяют исследовать эффект АЭЭ в разных сегнетоэлектрических фазовых состояниях.

Керамические образцы имели форму дисков диаметром 8 мм и толщиной 1 мм. Монокристалл титаната свинца представлял собой пластину толщиной 200 мкм и площадью  $10 \times 10$  мм. При поляризации сегнетопьезоэлектрических керамик использовались вожатые серебряные электроды, а в случае ПКР-70 также и монель, нанесенная методом катодного распыления. Характер спектров

Таблица 1

Электрофизические и электронно-эмиссионные характеристики керамик системы ТС—ТК

Параметр	$\text{PbTiO}_3$	ПКР-70	I	II	III	$\text{CaTiO}_3$
Тетрагональное искажение ячейки $c/a$ [6, 8]	1,0635	1,048	1,037	1,027	1,012	—
Спонтанная поляризация $P_0$ , Кл/м <sup>2</sup> [14]	0,7	0,201	0,2	0,199	0,195	—
Относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon/\epsilon_0$	30	120	200	315	595	170
Максимальный электретный потенциал $V_e$ , В	15	150	120	0	0	340
Максимальная плотность электретного заряда $\sigma$ , Кл/м <sup>2</sup>	$5 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	0	0	$5 \cdot 10^{-4}$
Положение пика в спектре АЭЭ $E_{\text{max}}$ , эВ	—	140	22	—	—	180
Суммарная интегральная интенсивность спектра АЭЭ, I	—	42,8	13,25	—	—	305

Таблица 2

Электрофизические и электронно-эмиссионные характеристики керамики системы ТС—МНС

Параметры	0,925МНС— 0,075ТС	0,75МНС— 0,25ТС
Спонтанная поляризация при 296 К	$6 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-1}$
Относительная диэлектрическая проницаемость при 296 К	$\sim 10^4$	$\sim 10^4$
Максимальный электретный потенциал $V_e$ , В	$t = 293$ К	140
	$t = 433$ К	30
Максимальная плотность электретного заряда $\sigma$ , Кл/м <sup>2</sup>	$t = 293$ К	$1,3 \cdot 10^{-2}$
	$t = 433$ К	$3 \cdot 10^{-3}$
Энергетическое положение АЭЭ спектра, $E_{\text{max}}$ , эВ	$t = 296$ К	—
	$t = 433$ К	60
Суммарная интегральная интенсивность АЭЭ	$t = 293$ К	—
	$t = 433$ К	180

АЭЭ не зависел от материала электродов. Для приложения электрического поля к керамике ТК, кристаллам ТС и керамике системы ТС—МНС применяли накладные металлические электроды.

Поляризацию сегнетопьезоэлектрических керамик I, II и III в соответствии с [6] осуществляли при комнатной температуре в силиконовом масле при приложении электрического поля напряженностью  $E = 60$  кВ/см, время поляризации — 0,5 ч. Для создания систем микротрещин часть образцов керамики I подвергалась циклической переполаризации при температуре 423 К в условиях приложения противоположного по направлению (в соседних циклах) постоянного электрического поля напряженностью 60—110 кВ/см. Применительно к настоящей работе эта процедура приводит к увеличению дефектности керамики, оказывающей влияние на ее электретные свойства, о чем свидетельствует снижение механической добротности образцов.

При поляризации имеющихся в распоряжении авторов и использованных ранее [2, 3] для исследования спектров АЭЭ образцов керамики ПКР-70 не удалось обеспечить оптимальный режим, приведенный в работе [8]:  $T = 433$  К,  $E = 75$  кВ/см,  $t = 0,25$  ч. Максимально возможные условия поляризации были следующими:  $T = 423$  К,  $E = 55$  кВ/см,  $t = 0,25$  ч. Значение пьезоэлектрического модуля  $d_{33}$  не превышает 70 пКл/Н, что составляет ~60 % от приведенного в [7] значения. Таким образом, используемая нами керамика ПКР-70 более дефектна не только по сравнению с керамиками I, II и III, но также и с известным из литературы [7] составом.

Поляризацию керамики титаната кальция проводили на воздухе при  $T = 423$  К в постоянном электрическом поле напряженностью 1,4 кВ/см в течение 1 ч. Инжекция электретного заряда в монокристалл ТС осуществлялась при комнатной температуре при приложении постоянного элект-

рического поля напряженностью 10—12 кВ/см. Керамические образцы системы ТС—МНС поляризовались в электрическом поле напряженностью 8 кВ/см как при комнатной температуре, так и при 433 К.

Спектры АЭЭ снимались на рентгеноэлектронном спектрометре [11] в соответствии с методикой, изложенной в [1, 2]. Параметры физического состояния образца после электрической поляризации перед и после записи спектров (т. е. перед и после облучения рентгеновскими лучами образца), а также положение и суммарная интегральная интенсивность спектров АЭЭ представлены в табл. 1 и 2. Облучение мягким рентгеновским излучением приводит к двойному эффекту: с поверхности образца уходит электретный заряд (что сопровождается уменьшением измеряемого электретного потенциала и соответствующего ему энергетического положения спектра АЭЭ), а в приповерхностном слое происходит релаксация поляризации. Эти процессы сопровождаются уменьшением интенсивности электронной линии АЭЭ и ее энергетического положения. По истечении определенного времени (при этом образец может находиться либо в объеме спектрометра в вакууме, либо в воздушной среде вне спектрометра) излучающая способность поверхности восстанавливается, а иногда и превосходит прежнюю. Поэтому спектр образца можно снимать по циклам (длительностью 6—7 ч), пока не наступает такой момент, когда после релаксации образца спектр снять становится невозможным. Суммарная интегральная интенсивность всех полученных спектров и ее зависимость от времени или от длительности съемки является в определенной степени характеристикой поляризованного состояния исследуемого образца. Временные зависимости  $E(t)$  и  $I(t)$  были детально изучены для монокристалла МНС и имели экспоненциальный вид [13]. Из построенных зависимостей  $E(t)$  и  $I(t)$  в [2, 12] удалось определить характерное время электретной релаксации  $\tau$  для монокристалла МНС, совпадающее с данными электрофизических измерений [13]. На рис. 1 и 2 аналогичные зависимости ( $E(n)$  и  $I(n)$ , где  $n$  — номер спектра в их временной последовательности) приведены для керамических образцов ПКР-70 и ТК для многих циклов измерений. Номера спектров отложены на оси абсцисс. По оси ординат вверх отложено значение энергетического положения спектра АЭЭ, а вниз — значение интегральной интенсивности спектра АЭЭ. Резкий подъем — это значение интенсивности и энергетического положения спектра АЭЭ после релаксации образца. Зависимость на рис. 1 была получена с поверхности, поляризованной сегнетоэлектрическим способом пьезокерамики ПКР-70, а на рис. 2 — с поверхности поляризованного электретной поляризацией образца ТК. После поляризации ПКР-70 области со спонтанной поляризацией в зернах керамики ориентируются по полю, так что образец в целом обладает поляризацией  $P_0$ . ТК

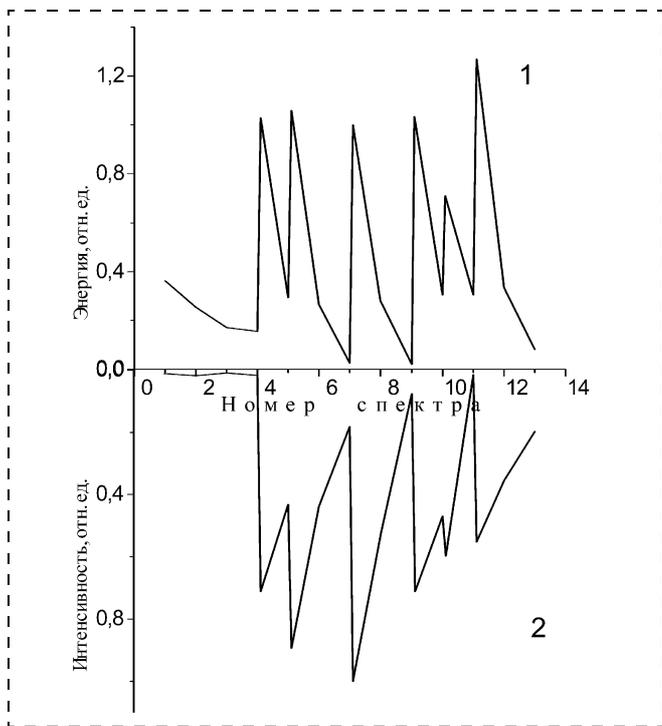


Рис. 1. Корреляционная зависимость между энергетическим положением (1) и интенсивностью (2) для ПКР-70

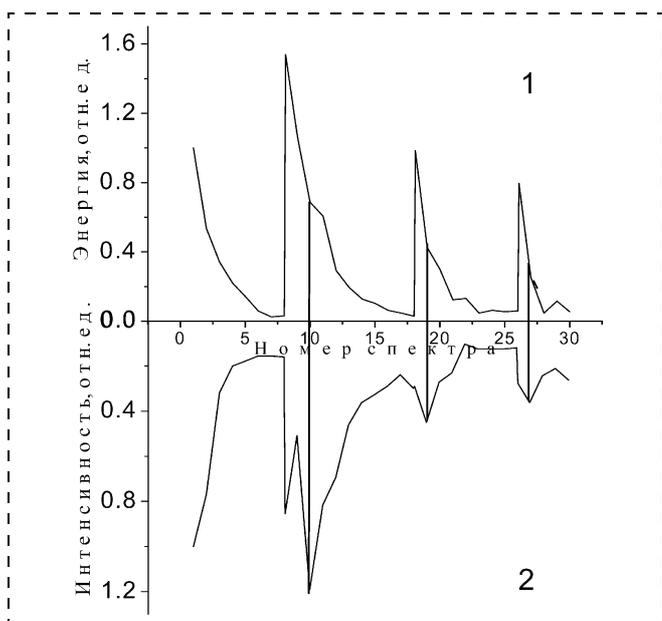


Рис. 2. Корреляционная зависимость между энергетическим положением (1) и интенсивностью (2) для керамического образца  $\text{CaTiO}_3$

является электретом и после снятия поля также находится в поляризованном состоянии, имеющем иное физическое происхождение. В этом отношении до настоящих экспериментов было неясно, возможен ли в ТК эффект АЭЭ. В связи с тем, что спектры АЭЭ в настоящей работе устойчиво получались не только для сегнетоэлектрических керамик ПКР-70 и I, но и для ТК, не обладающего сегнетоэлектрическими свойствами (причем спектры были более интенсивны и излучающее состояние

образца длилось дольше), представляется необходимым более детально рассмотреть модель АЭЭ, изначально предложенную для монокристаллических образцов. Описание модели АЭЭ и выражения для распределения электрического поля  $E(z)$  по глубине приведены в работах [1–3]. Исходя из этих выражений для электрического поля  $E(z)$  в поверхностных слоях поляризованного сегнетоэлектрика-электрета в [2] и учитывая, что  $E(z) = -d\varphi/dz$ , можно получить следующую формулу для распределения потенциала  $\varphi(z)$ :

$$\varphi(z)/\varphi_0 = 1 - (1 - P_0/\sigma)z/L - \exp(-z/L). \quad (2)$$

При этом принимается, что распределение инжектированного в поверхность монокристалла неравновесного электронного (электретного) заряда в поверхностном слое сегнетоэлектрика-электрета имеет вид

$$\sigma(z) = \sigma_0 \exp(-z/L).$$

На рис. 3, а представлены распределения потенциала, рассчитанные по формуле (2) для разных

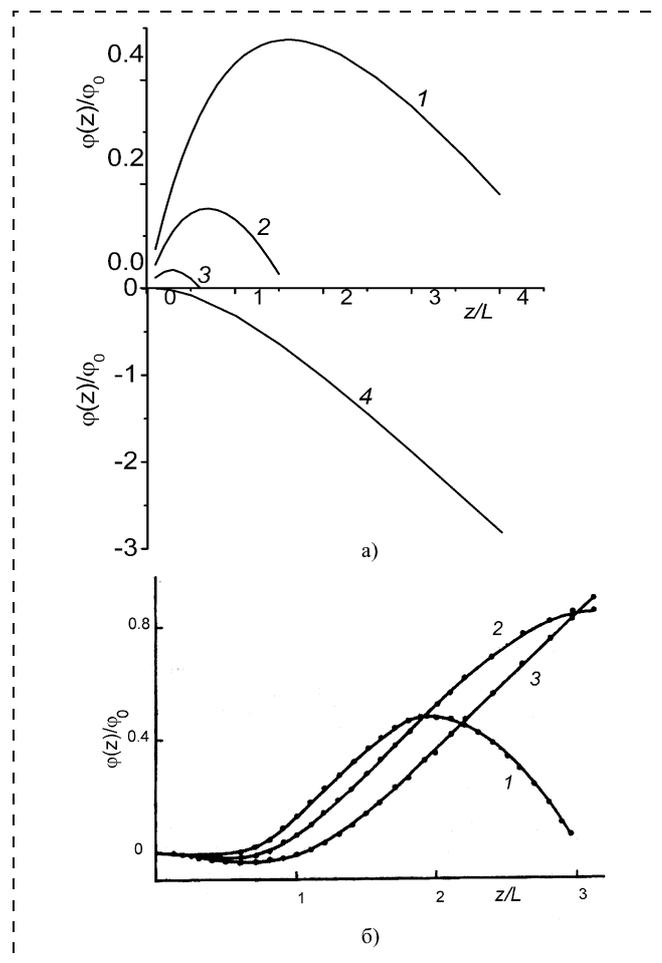


Рис. 3. Распределение потенциала  $\varphi(z)/\varphi_0$  по глубине в поверхностных слоях поляризованного монокристаллического сегнетоэлектрика-электрета:

а – рассчитанное по формуле (2),  $\sigma/P_0$ : 1 – 1,25; 2 – 2; 3 – 4; 4 – 20; б – в соответствии с расчетом [1],  $\sigma/P_0$ : 1 – 1,51; 2 – 1,31; 3 – 1,1

значений  $\sigma/P_0$ . Под потенциалом, как и в [1], понимается потенциальная энергия электрона. Видно, что если образец является слабым сегнетоэлектриком, т. е.  $P_0$  мало, а отношение  $\sigma/P_0$  велико (кривая 4), то поле в поверхностном слое образца является тормозящим для всех электронов, возбужденных в поверхностном слое образца мягким рентгеновским излучением. АЭЭ из образца при такой форме потенциального распределения по глубине образца отсутствует. Согласно модели АЭЭ эта кривая соответствует несегнетоэлектрическому монокристаллу ТК. При сохранении значения электретного заряда постоянным с увеличением  $P_0$  (при этом отношение  $\sigma/P_0$  уменьшается, кривые 3; 2; 1) в поверхностном слое сегнетоэлектрического образца появляется максимум. Передний склон этого максимума обращен к излучающей поверхности. Все электроны, возбужденные в образце, слева от этого максимума ускоряются в поверхностном слое образца и выходят наружу в виде спектра АЭЭ. Как видно на рис. 3, а максимум не только растет, но и отодвигается в глубь образца. Эта же тенденция имеет место и для распределения потенциала, рассчитанного нами по уточненной модели [1], в которой в разложении  $E(p)$  учитываются не только члены, пропорциональные  $P_0$ , но и  $P_0^3$ ,  $P_0^5$  (рис. 3, б). На рис. 3, б видно, что с уменьшением отношения  $\sigma/P_0$  максимум не только отодвигается, но и становится более пологим вблизи излучающей поверхности, что, с учетом ограниченной глубины выхода электронов из образца [1], в конечном итоге приводит к ослаблению интенсивности электронной эмиссии, а при  $\sigma < P_0$  — к ее полному исчезновению. Это имеет место для монокристалла ТС, который обладает большим значением  $P_0$  и слабым электретным эффектом [2].

В свете изложенной выше модели АЭЭ рассмотрим корреляционную зависимость между энергетическим положением спектра АЭЭ и его интенсивностью для сегнетокерамики ПКР-70 (см. рис. 1). Считается, что электретный эффект в сегнетокерамике носит объемный характер [14, 15]. В то же время нами ранее было показано [16], что АЭЭ в керамике ПКР-70, хотя и была наиболее интенсивной на глубинах до 100 мкм от места нахождения инжектирующего электрода, но имела место и глубже (экспериментально она регистрировалась на глубинах до 0,5 мм для образца толщиной в 1 мм). Для монокристаллических образцов АЭЭ регистрировалась только для первых нескольких микрометров от поверхности, в которую был инжектирован электретный заряд. Дальше АЭЭ отсутствовала. При устойчивом значении спонтанной поляризации отсутствие АЭЭ, согласно ее модели, связано с тем, что на этих расстояниях по глубине от инжектирующего электрода неравновесный электретный заряд либо отсутствует, либо он меньше  $P_0$ . Поэто-

му наличие интенсивной АЭЭ в сегнетокерамике с поверхностей, отстоящих на больших расстояниях от места инжекции электронов, может означать, что необходимое значение  $\sigma$  для АЭЭ находится не возле инжектирующего электрода, а распределено по довольно толстому слою от электрода.

Эта разница между керамикой и монокристаллом в распределении захваченного электронного заряда, очевидно, обусловлена как микро-, так и мезоскопическим строением керамики, в первую очередь, наличием в ней большого числа внутренних поверхностей, где может разместиться электретный заряд. Кроме того, природа этого избыточного заряда на границах зерен сегнетокерамики может быть и не связана с поверхностной электретизацией, а обусловлена процессами разделения заряда на границах микрокристаллитов при объемной сегнетоэлектрической поляризации, в том числе и приводящими к Максвелл—Вагнеровской релаксации [14, 17]. После выключения рентгеновской трубки заряд на поверхности восстанавливается как за счет этих процессов, так и за счет хотя и слабой, но конечной проводимости керамики. Резкий подъем энергетического положения и интенсивности АЭЭ в начале каждого цикла измерений на рис. 1 мы относим к восстановлению электретного заряда на излучающей поверхности керамики ПКР-70 за счет вышеуказанных процессов. Спад в этих характеристиках связан с ослаблением электретного заряда при облучении поверхности рентгеновскими лучами во время съемки спектра: согласно рассматриваемой модели (рис. 3) при постоянном  $P_0$  это ведет к уменьшению отношения  $\sigma/P_0$  и, следовательно, к сдвигу максимума в распределении потенциала в глубину поверхностного слоя поляризованного сегнетоэлектрика-электрета. В целом это приводит к уменьшению как энергетического положения, так и интенсивности спектров АЭЭ. После прекращения съемки образец вновь релаксировал к прежним или даже большим значениям потенциала, что позволяло вновь проводить измерения. Корреляционные зависимости между интенсивностью и энергетическим положением спектров при их последовательной съемке для сегнетоэлектрической керамики ПКР-70, как видно на рис. 2, являются симбатными.

При рассмотрении корреляционных зависимостей между  $E$  и  $I$  для спектров АЭЭ с поверхности керамики ТК можно заметить как общие черты в их поведении с аналогичными зависимостями для ПКР-70, так и отличия. Сходство заключается в том, что на рис. 2 можно выделить отдельные циклы измерений, в пределах которых энергетическое положение спектров АЭЭ уменьшается по мере ослабления в поверхностном слое неравновесного электретного заряда. Однако, в отличие от рис. 1, на каждой спадающей зависимости  $E(n)$  ( $n$  — номер спектра, пропорциональный времени проведения эксперимента) рис. 2 можно выделить точку, которой соответствует не спад интенсивно-

сти, а ее резкое увеличение. На рис. 2 эти точки соединены вертикальными линиями.

Если считать, что принципиальная схема АЭЭ, развитая для монокристаллических сегнетоэлектрических образцов и распространенная нами выше на сегнетоэлектрические керамики, остается в силе, то антибатность в поведении  $E(n)$  и  $I(n)$  на рис. 2 можно отнести только за счет особенностей механизма возникновения остаточной поляризованности в керамическом электрете ТК. Хотя она не обусловлена спонтанной поляризацией отдельных областей в микрокристаллитах [15, 18, 19], поляризацию электрета формально представляют в виде, очень похожем на поляризацию в сегнетоэлектрике:  $P(z) = P_H + \chi E(z)$  [15] ( $P_H$  — остаточная поляризация,  $\chi$  — диэлектрическая восприимчивость,  $E(z)$  — напряженность электрического поля). Для ее разориентации требуется время и внешние условия (температура и т. д.), способствующие преодолению некоторого потенциального барьера.

В этом и в других отношениях сегнетоэлектрические керамики и электреты ведут себя похоже, что позволило объединить их в группу материалов с метастабильной электрической поляризацией [14, 19]. С точки зрения формального математического аппарата теории АЭЭ наличие остаточной поляризации  $P_p$  достаточной величины в электретной керамике ТК также обуславливает максимум в распределении потенциала по глубине приповерхностного слоя в поляризованном образце ТК, как и наличие спонтанной поляризации  $P_0$  в сегнетоэлектрическом образце при инжектировании в поверхностный слой неравновесного электронного заряда [1, 2] (конечно, при условии, что в месте излучения локальное значение электронного заряда превосходит  $P_p$ ). Последнее замечание детально будет обсуждено ниже.

Релаксация поляризации при съемке спектров АЭЭ обуславливает протекание как внутри диэлектрика, так и во внешней цепи релаксационного тока  $j_p = dP/dt$  [14, 15]. В этом смысле действие на поляризованный электрет рентгеновского излучения аналогично температурному воздействию. Та часть электронов в спектре АЭЭ (ток во внешней цепи), которая компенсируется релаксационным током в образце, отражает закономерности релаксационного процесса в нем. В разных материалах эти процессы протекают по-разному, в частности, в отличие от сегнетоэлектрической керамики ПКР-70 релаксационные зависимости  $E(n)$  и  $I(n)$  для поляризованного электрета ТК антибатны. В рамках модели это может иметь место, если предположить, что при ослаблении неравновесного электронного заряда  $\sigma$  под действием рентгеновских лучей при его определенном значении заряд становится недостаточным для удержания прежнего значения остаточной поляризации, и она уменьшается скачком. Отношение  $\sigma/P_p$  резко увеличивается и происходит переход излучающей ситуации

на другую ветвь (скажем, с кривой 1 на рис. 3, а на кривую 2 или, более точно, с кривой 3 на рис. 3, б на кривую 1). Согласно модели, интенсивность спектра АЭЭ должна увеличиться, что и происходит на самом деле. На рис. 3 этот процесс происходит трижды.

Опираясь на данные табл. 1 и 2, где приведены измеренные нами значения электретного заряда, а также данные о спонтанной поляризации  $P_0$ , нами построена зависимость экспериментально полученных интенсивностей АЭЭ от отношения  $\sigma/P_0$ , приведенная на рис. 4. Как видно из этой зависимости, она полностью соответствует модельным представлениям о механизме АЭЭ, за исключением одной детали, а именно, все значения  $\sigma/P_0$  на рис. 4 (внизу) меньше единицы, причем речь идет о порядках. Сравнение значений поляризации и измеренных нами электретных зарядов в табл. 2 с литературными данными для керамических образцов [14, 20] показывает, что они согласуются с литературными данными по порядку величины. Это означает, что значение неравновесного электретного заряда  $\sigma$  в исследованных образцах действительно меньше значения  $P_0$ , а не появляется вследствие недостатков в электретизации. Можно также оценить теоретически предельные значения электретного заряда, который может создавать электретную разность потенциалов, типичную для этих образцов в нашем эксперименте. Решая задачу о потенциале бесконечной протяженной пластины, заряженной с объемной плотностью  $\rho$  и толщиной  $a$  на расстоянии  $x$  от ее поверхности, можно получить

$$\varphi(x) = -\frac{\rho a}{\epsilon_0} |x| + \frac{\rho a^2}{\epsilon_0} \left(1 - \frac{1}{2\epsilon}\right). \quad (3)$$

Для  $V = 100$  В вне образца при  $a = 10^{-3}$  м при указанных в таблицах значениях  $\epsilon$  для  $\varphi$  получается значение порядка  $10^{-2}$  Кл/м<sup>2</sup>. Таким образом, как

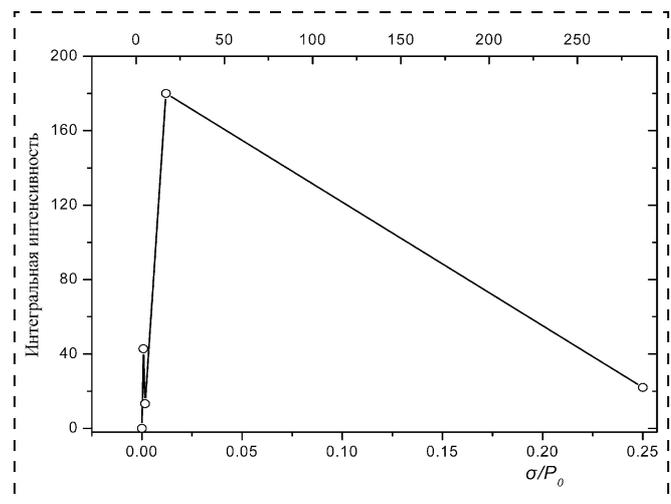


Рис. 4. Зависимость  $I(\sigma/P_0)$ . Внизу — экспериментальное значение отношения  $\sigma/P_0$ ;верху — значение  $\sigma/P_0$  в пересчете на размер границ зерен при неизменной поляризации  $P_0$

из экспериментальных данных, так и по теоретическим оценкам неравновесный электретный заряд для исследованных в настоящей статье образцов не превосходит значения спонтанной поляризации. Противоречие между модельными представлениями и экспериментом можно устранить, если предположить, что электретный заряд распределен по поверхности образца не равномерно, а находится, в основном, на границах зерен. Это предположение хорошо согласуется с представлениями модели электрета с дискретным поверхностным зарядом [21], а также с экспериментальными данными [22]. Принято считать, что эта неоднородность обусловлена реальной макроскопической неоднородностью электретного материала и фактической неоднородностью условий электретирования [21, 23]. Поэтому допустимо предположить, что керамическое зерно является естественной неоднородностью в распределении электретного заряда [21, 23], а границы зерен — местом, где он располагается.

Это предположение согласуется с представлениями о процессах разделения заряда в поляризованных сегнетоэлектрических керамических образцах или в электротехнических керамиках при протекании в них тока [14, 17] и нашими экспериментами по исследованию зависимости интенсивности АЭЭ на керамических образцах ПКР-70 от расстояния от инжектирующего электрода, обсужденными выше. Для несегнетоэлектрического титаната кальция предположение о неравномерном распределении электретного заряда по границам зерен керамики является наиболее вероятным в объяснении АЭЭ в рамках модели АЭЭ. Действительно, в проведенном выше обсуждении вкладов в электретную поляризацию, в рамках современного состояния теории и эксперимента электретного эффекта,  $P_p$  это фактически и есть электретный заряд (по аналогии с тем, что для сегнетоэлектриков  $P_0$  — поверхностный заряд), равномерно распределенный по поверхности образца. Тогда для идеального монокристалла отношение  $\sigma/P_p$  должно равняться единице. При этом, согласно теории, АЭЭ должна отсутствовать, что и имеет место для монокристаллического электрета MgO [24]. В то же время теоретически [1, 2] и экспериментально [3] показано, что спектры АЭЭ происходят от участков монокристаллической поверхности, в которых имеются экстремумы в распределении поверхностного потенциала. Поэтому, вообще говоря, АЭЭ может быть обусловлена неоднородностями в распределении заряда и поляризации, в том числе и на границах зерен керамики.

Считая, что весь электретный заряд расположен по границам зерен (при постоянном значении  $P_0$ ), при разумной ширине границы зерна в 40 Å и размере зерна 10 мкм мы получили значения  $\sigma/P_0$ , приведенные на рис. 4 вверху. Они вполне согласуются с моделью АЭЭ: при значениях  $\sigma/P_0 < 1$  (случай монокристалла ТС) эмиссия отсутствует,

она мала при значениях  $\sigma/P_0$ , близких к единице, проходит через максимум и уменьшается при дальнейшем возрастании  $\sigma/P_0$ . Интересно отметить, что принятый в расчете размер зерна, удовлетворяющий ожидаемым в модели значениям отношения  $\sigma/P_0$ , хорошо согласуется с его значением, определенным экспериментально и типичным для керамик свинцово-кальциевых титанатов (5–7 мкм) [25]. Как следует из проведенного рассмотрения, в керамических образцах АЭЭ ожидается в основном там, где выполняется соотношение  $\sigma > P_0$ , т. е. по границам микроструктур. Это позволяет понять, например, разницу в эмиссионной способности поверхностей сегнетоэлектрических керамик ПКР-70, I–III. Эмиссионная способность керамики I в проведенных экспериментах была меньше, чем в ПКР-70, а в керамиках II и III практически на уровне фона (см. табл. 1). Из плотностей этих керамик [7] и из их поведения при поляризации следовало, что керамика ПКР-70 более дефектна, чем остальные, причем остальные представляли собой высокоплотную керамику. В [14] отмечается, что в высокоплотных керамиках при охлаждении и переходе в сегнетоэлектрическую фазу вещество вблизи границ зерен упруго зажато соседними зернами, т. е. на границах могут возникать большие механические напряжения, влияющие на доменную конфигурацию и динамику доменов в зернах, что, в свою очередь, может приводить к подавлению поляризации. Уменьшение или даже исчезновение поляризации на границах зерен согласно рассматриваемой модели влечет за собой ослабление (или полное отсутствие) эффекта АЭЭ, что и наблюдается для керамик I, II и III по сравнению с ПКР-70. Малым значением поляризации  $P_0$  в поляризованном образце состава 0,925МНС—0,075ТС, по сравнению с электретным зарядом  $\sigma$  (см. табл. 2) также можно объяснить небольшую интенсивность спектров АЭЭ в проведенных исследованиях.

## Выводы

- Показано, что аномальная электронная эмиссия имеет место не только для сравнительно узкого круга монокристаллических сегнетоэлектриков с электретными свойствами, но и для широкого круга керамических материалов с метастабильной электрической поляризацией, широко используемых в электронике и электротехнических приложениях.
- Зависимости интенсивности и энергетического положения спектров АЭЭ можно применять для исследования релаксационных процессов в материалах с метастабильной электрической поляризацией.
- В связи с размещением электретного заряда, определяющего вместе с остаточной поляризацией свойства АЭЭ, по границам зерен, АЭЭ может быть использована для исследования за-

рядовых условий и поляризованности на границах зерен электротехнических керамик, определяющих их прикладные применения.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 05-02-16345.*

#### Список литературы

1. **Козаков А. Т., Колесников В. В., Сахненко В. П.** и др. Аномалии возбужденной мягким рентгеновским излучением эмиссии медленных электронов из магнитообата свинца // ФТТ. 1996. Т. 38. № 8. С. 2524—2536.
2. **Kozakov A. T., Sakhnenko V. P., Novikov I. V.** Electron emission from charged surfaces of ferroelectrics — electrets. Part 1. Properties of the electron emission // J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena. 2005. V. 142. P. 59—66.
3. **Kozakov A. T., Sakhnenko V. P., Novikov I. V.** Electron emission from charged surfaces of ferroelectrics — electrets. Part 2. Fundamentals underlying interpretation of spectra of anomalous electronic emission (AEE) // J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena. 2005. V. 142. P. 59—66.
4. **Козаков А. Т., Колесников В. В., Никольский А. В., Сахненко В. П.** Аномальная электронная эмиссия из монокристаллов ниобата и танталата лития // ФТТ. 1997. Т. 39. № 44. С. 679—682.
5. **Фесенко Е. Г., Гавриляченко В. Г., Спинко Р. И.** и др. Выращивание кристаллов титаната свинца и исследование их доменного строения // Кристаллография. 1972. Т. 17. № 1. С. 153—157.
6. **Смотраков В. Г., Еремкин В. В., Дорошенко В. А.** и др. Получение и свойства анизотропных керамических материалов системы  $PbTiO_3-CaTiO_3$  // Неорганические материалы. 1994. Т. 30. № 2. С. 241—242.
7. **Данцигер Н. Л., Разумовская О. Н., Резниченко Л. А.** и др. Высокоэффективные керамические материалы: Справочник. Ростов-на-Дону: АО "Книга", 1994. 32 с.
8. **Мирошниченко Е. С., Гринева Л. Д., Разумовская О. Н.** и др. Пьезокерамические материалы с малой добротностью для ультразвуковой дефектоскопии и толщинометрии // Пьезоактивные материалы. Физика. Технология. Применение в приборах: Сб. статей / Под ред. А. Е. Панича. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та. 1991. Вып. 9. С. 196—201.
9. **Фесенко Е. Г.** Семейство перовскита и сегнетоэлектричество // М.: Атомиздат. 1972. 246 с.
10. **Emelyanov S. M., Savenko F. I., Trusov Yu. A.** et al. Delute Ferroelectric in Random Electric Field: Phase Transitions in  $Pb(Mg_{2/3}Nb_{2/3})_{1-x}Ti_xO_3$  Crystals // Phase Transitions. 1993. V. 45. P. 251—270.
11. **Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Козаков А. Т.** и др. Исследование фрикционного переноса политетрафторэтилена методом рентгеноэлектронной спектроскопии // Вестник машиностроения. Л.: 1985. № 2. С. 33—36.
12. **Никольский А. В., Козаков А. Т.** Спектры аномальной электронной эмиссии и поляризационные явления в монокристалле магнитообата свинца // ФТТ. 1997. Т. 39. № 8. С. 1446—1451.
13. **Kozakov A. T., Panchenko E. M., Nikolskii et al.** Electret State and Surface Composition of the  $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$  single crystal // J. Phys. D: Appl. Phys. 1993. V. 26. P. 967—971.
14. **Лайнс М., Глас А.** Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. М.: Мир. 1981. 736 с.
15. **Электреты** / Под ред. Г. Сесслера. М.: Мир. 1983. 487 с.
16. **Колесников В. В., Козаков А. Т.** Влияние пространственного распределения инжектированного заряда на интенсивность возбужденной рентгеновским излучением электронной эмиссии из сегнетоэлектриков — электретов // ФТТ. 2000. Т. 42. № 11. С. 2085—2086.
17. **Holbling T. H., Soylemezoglu N., Waser R.** A Mathematical — Physical Model for the Charge Transport in *p*-Type  $SrTiO_3$  Ceramics Under dc Load: Maxwell-Wagner Relaxation // Journal of Electroceramics. 2002. № 9. P. 87—100.
18. **Губкин А. Н.** Электреты. М.: Наука. 1978. 190 с.
19. **Гриднев С. А.** Диэлектрики с метастабильной электрической поляризацией // Соросовский образовательный журнал. 1977. № 5. С. 105—111.
20. **Панченко Е. М., Трусов Ю. А., Загоруйко В. А.** и др. Электретный эффект в многокомпонентных твердых растворах на основе ширконата — титаната свинца // Неорганические материалы. 1991. Т. 27. № 7. С. 1497—1500.
21. **Ефашкин Г. В.** Модель электрета с дискретным поверхностным зарядом // Электротехника. 1985. № 7. С. 52—54.
22. **Дистлер Г. И.** Декорирование поверхности твердого тела. М.: Наука. 1976. 250 с.
23. **Гороховатский Ю. А.** Электретный эффект и его применение // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 8. С. 92—98.
24. **Козаков А. Т., Никольский А. В., Новиков И. В.** и др. Особенности аномальной электронной эмиссии с поверхности сегнетоэлектрических пленок состава  $PbTiO_3$  и  $Pb(Zr, Ti)O_3$  // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 16. С. 55—61.
25. **Alyoshin V. A., Grineva L. D., Razumovskaya O. N., Kozakov A. T.** et al. Specific Features and Properties of Lead-Titanate-based anisotropic Ceramic // Ferroelectrics. 1995. V. 167. P. 223—228.

УДК 621.865.8-5.001.5

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

## СБОРКА ГИБРИДНЫХ МЭМС НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

*Рассмотрены проблемы организации визуальной обратной связи при реализации технологических процессов сборки гибридных МЭМС. Показана возможность использования трехмерной реконструкции состояния технологической среды для расширения информативности традиционных каналов обратной связи.*

### Введение

На протяжении ряда лет в Институте механики УНЦ РАН ведутся работы по усовершенствованию алгоритмов управления сборочными микроробототехни-

ческими системами, разработке новых технических решений при конструировании микророботов, а также созданию инструментальных средств моделирования технологических процессов, выполняемых с их помощью. Дан-

ная работа выполнялась в рамках проекта по созданию виртуального имитатора производственного комплекса микросборки, технологические операции в котором выполняются с помощью роботов специального класса (микросборочных роботов или микророботов), использующих в качестве рабочих инструментов высокопрецизионные микроманипуляторы, способные обеспечить точность до 10 нм и проводить операции с компонентами сборки размерами не более 2—3 мм. Цель очередного этапа работ, результаты которого описаны в статье, заключается в разработке методов информационной поддержки и визуального сопровождения протекающих микросборочных про-

цессов на основе виртуальных технологий.

В настоящее время гибридные типы МЭМС со сложной интеграцией механики и электроники (микроэлектродвигатели, микронасосы, микроредукторы и другие типы микросистем, размеры которых в собранном виде не превышают 2—3 мм) в большинстве случаев собираются вручную, сборка ведется под микроскопом, что, в первую очередь, сказывается на их надежности и стоимости [1]. Учитывая темпы развития микросистемной техники и прогнозируемую в ближайшие десятилетия долю микросистем в общем объеме промышленного производства, не вызывает сомнений актуальность одного из новых направлений современной робототехники, предметом исследований которой является автоматизация микросборочных операций с МЭМС сложных объемных структур. Несмотря на большое число опубликованных результатов исследований [2—5], широкое использование микросборочных роботов затруднено масштабами, в которых необходимо выполнять технологические операции (измеряемые в микрометрах точность позиционирования, в долях микрометра — допуски), особенностями влияния окружающей среды (большее влияние оказывают адгезионные силы, а не гравитационные и инерционные), а также спецификой организации каналов обратной связи (сверхвысокая чувствительность тактильных и силометрических датчиков, сверхмалое фокусное расстояние оптических приборов систем технического зрения).

Предлагаемый в статье подход направлен на преодоление ряда проблем, связанных с организацией визуального канала обратной связи при выполнении микросборочных процессов, когда значительная часть информации о состоянии технологической среды формируется и реконструируется с помощью средств вычислительной техники на основе виртуаль-

ных моделей объектов сборки и технологического оборудования.

### **Проблемы моделирования и организации визуальной поддержки микросборочных операций**

Как было отмечено выше, масштабы микросистем и эксплуатационные характеристики устройств технологической оснастки накладывают особые требования к техническим аспектам построения автоматизированных микросборочных комплексов, а также их математическому и компьютерному моделированию. Особенности контактных процессов, возникающие при непосредственном взаимодействии с объектами внешней среды, определяют специфику математических моделей, описывающих выполнение микротехнологических операций. В отличие от макромира, где доминируют гравитационные и инерционные силы, в микромире большее влияние оказывают различные проявления адгезии — электростатические силы, контактная электрификация, эффекты сохранения зарядов, силы межмолекулярного взаимодействия, силы поверхностного натяжения и т. д., микросборочные процессы характеризуются возмущениями непредсказуемого и сложнопрогнозируемого характера, оказываемыми на технологическую оснастку, микроинструменты и объекты сборки со стороны внешней среды. В условиях, когда исследователю необходимо управлять ходом имитации целого технологического процесса, что подразумевает взаимодействие с многопараметрической моделью внешней среды, классическая схема моделирования с табличной формой представления результатов не может быть использована, поскольку анализ и интерпретация результатов моделирования требует значительных затрат времени и при этом проявляются проблемы адекватного отождествления положения

объектов в технологическом пространстве.

Есть и другая, не менее важная сторона проблемы качественного выполнения отдельных технологических операций. Конструктивное исполнение микросборочных систем в значительной степени определяется технологическими допусками, устанавливаемыми на выполнение микроманипуляционных операций. Допуски, прежде всего, определяют способ движения рабочих органов (контурное, дискретное), систему управления (программная, адаптивная) и типы используемых приводов (пьезоэлектрические, магнитострикционные и т. д.). От них зависят оптические параметры увеличительных приборов системы технического зрения — минимальное разрешение, фокусное расстояние, поле зрения, частота сканирования и т. д. Использование оптических приборов, в свою очередь, вносит коррективы в конструктивное исполнение микросборочных систем. Так, большое фокусное расстояние, которое отличает приборы для работы с объектами микрометровых и субмикрометровых масштабов, обуславливает тот факт, что качественная картина в поле их зрения может обеспечиваться только в весьма ограниченном диапазоне расстояний от объектива (сверхмалая глубина резкости), тем самым не позволяя одновременно получить отчетливое изображение детали и рабочего инструмента (рис. 1). Эта проблема становится еще более выраженной с повышением разрешающей способности приборов. Таким образом, эффективность визуального наблюдения определяется значениями номинальных перемещений, которые должны быть как можно меньше в поле зрения объектива при выполнении тех или иных операций рабочим органом микроманипулятора. Вместе с тем, уменьшение значений номинальных перемещений приводит к проблемам, связанным с ограничением манипуляционных возможностей и более сложным

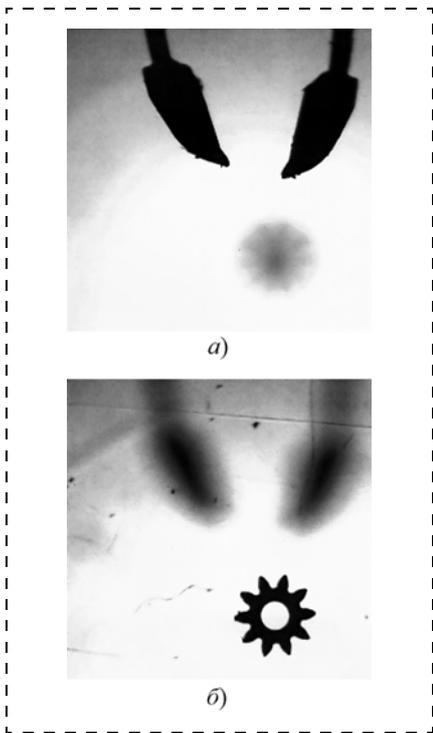


Рис. 1. Недостаточная глубина резкости оптических приборов не позволяет одновременно получить отчетливое изображение детали МЭМС и рабочего инструмента

выполнением операций по корректировке ориентации и положения компонентов сборки. Необходимо отметить, что качественная картина, обеспечиваемая приборами с большим фокусным расстоянием, в значительной степени определяется настройками освещения, типами используемых ламп, отсутствием теней и т. д. Проблемы с освещением начинают проявляться особенно остро при формировании стереоизображений, когда оператору необходимо идентифицировать и воспринимать сразу три и более проекций рабочей области.

В этих условиях перспективным является повышение информативности традиционных каналов обратной связи на основе формирования трехмерных изображений выполняемых операций и реконструкции состояния технологической среды, что позволит более адекватно воспринимать ход микросборочных процессов и преодолеть описанные выше проблемы интерпретации состояний рабочего пространства. На сего-

дняшний день в различных областях науки и техники с этой целью используются системы на основе технологий виртуальной реальности, визуализация в которых осуществляется с применением высокоточных геометрических моделей-копий (виртуальных моделей) объектов моделирования, что обеспечивает возможность получения стереоскопических изображений в различных ракурсах.

### Формирование данных для реконструкции

Для повышения информативности традиционных каналов обратной связи и визуальной поддержки микротехнологических процессов на базе виртуальных технологий было предложено использовать и обрабатывать два основных вида информации. Это априорные данные, описывающие реальные технологические объекты-прототипы: геометрическая форма и оптические свойства их поверхностей (цвет, отражательные свойства и т. п.), и апостериорные данные, поступающие в реальном времени из интерфейсного комплекса, в котором осуществляется взаимодействие с аппаратной частью (исполнительные устройства микроботов и сенсорные системы), и описывающие движения, состояния объектов и поведение их отдельных подсистем.

Формирование априорных данных начинается с построения геометрических моделей микросистем. Согласно конструкторской документации, используя ин-

струментальные средства 3D-моделирования, строят виртуальные модели составных деталей МЭМС. На рис. 2 показана модель относительно простой конструкции МЭМС, состоящей из четырех деталей. В более сложных микросистемах, например в микроэлектродвигателях постоянного тока или микроредукторах, число деталей может достигать 30–40.

Для каждой из виртуальных деталей проводится выбор направлений локальных систем координат, нормирование параметров расположения поверхностей, определяются возможные конфигурации в процессе сборки, целевые координаты, а также признаки, отвечающие за взаимное расположение в процессе сборки. Отдельное внимание уделяется составлению параметрической модели влияния окружающей среды на технологические процессы для оценки значений адгезионных сил в режиме моделирования микросборочных операций.

Что касается апостериорных данных, они формируются на основе информации, получаемой с системы технического зрения. Матрица изображения получается на фреймграббере путем дискретизации, выборки и квантования видеосигналов. Получение изображения идет в реальном масштабе времени, данные передаются по шине PCI в основную память со скоростью до 50 Мбайт/с, что соответствует частоте 70 кадр/с. На этапе предварительной обработки изображений решаются задачи непосредственного форми-

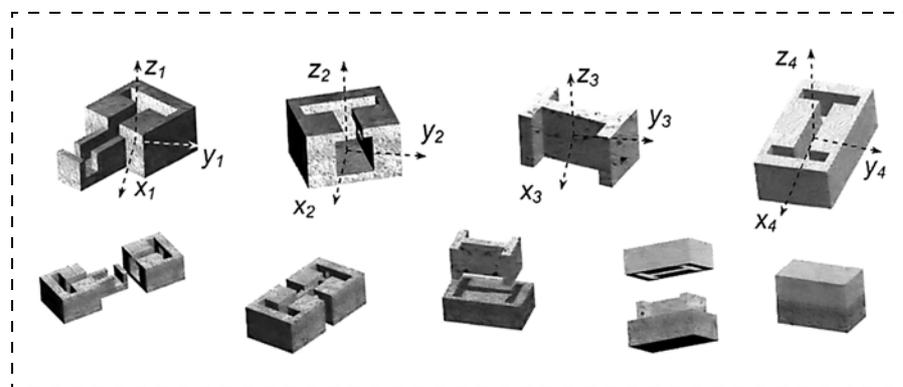


Рис. 2. Формирование априорных данных МЭМС на примере модели тензометрического датчика

рования изображений, процессы компенсации, такие, как уменьшение шума и выравнивание яркости. Для определения координат используется метод наложения, как самый эффективный по быстрдействию и алгоритму. Точность определения ориентации и положения микроманипулятора и деталей в значительной степени зависит от разрешения кадров и отношения размеров объектов к полю зрения камеры. Как показали эксперименты, при разрешении камеры  $513 \times 818$  и поле зрения  $39^\circ$  метод наложения позволяет определять координаты микроманипулятора с точностью до 5 нм, ориентацию — до  $10''$ . Определение координат деталей проводится с той же точностью за счет использования дополнительной камеры локального вида и снижения поля зрения до  $5^\circ$ . Таким образом, использование быстродействующих коммуникационных интерфейсов на базе скоростных портов ввода-вывода цифровых видеосигналов в сочетании с алгоритмами обработки изображений, оптимизированных для работы в реальном масштабе времени, является одним из главных условий формирования апостериорных данных.

Дальнейшая компьютерная обработка данных заключается в использовании априорной информации для синтеза изображений виртуальных объектов, апостериорной — для реконструкции состояния реальной среды (взаимное положение, ориентация) на момент наблюдения.

### **Трехмерная реконструкция технологических операций**

В основе подхода, использованного для реконструкции состояния технологической среды, лежит разработка копирующей системы виртуальной реальности, которая вместе с отражаемой в ней физической средой, на основе заложенных априорных и получаемых апостериорных данных составляет единый имитационно-технологический комплекс.

Полученное таким образом виртуальное пространство технологической среды будет адекватно отображать состояние реальных объектов и поэтому может являться основой для поддержки традиционных каналов визуальной обратной связи и создания высокоуровневого человеко-машинного интерфейса оператора технологических процессов. При этом появляется возможность обеспечить различные уровни человеко-машинного взаимодействия, определяемые спецификой информационного взаимодействия между физической и виртуальной средами. Выделим три основных вида взаимодействия, которые будут отвечать различным режимам работы виртуальной системы — моделирование, динамическое отражение и управление.

Режим моделирования характеризуется отсутствием информационного обмена с натурными элементами объекта моделирования, — взаимодействие с аппаратной частью технологического оборудования не реализуется. Оператор получает реалистичные результаты моделирования и пространственное отображение результатов скоординированной работы разрабатываемых микросистем как с уже существующими, так и новыми типами устройств, исследует системы планирования и управления технологическими процессами, а также проводит другие интерактивные технологические расчеты.

Режим "динамическое отражение" используется при проведении операций, требующих визуальных каналов обратной связи. Аппаратно-программный интерфейс обеспечивает динамическую настройку параметров и изменение состояний объектов моделирования, трансформируя состояние физической среды в виртуальное пространство. Оператор определяет положение и ориентацию рабочих органов и объектов сборки, оценивает состояния между отдельными объектами и

проводит другие операции, требующие визуального контроля.

В режиме управления появляется возможность не только наблюдать за состоянием физической среды, но также и осуществлять обратное воздействие на реальное технологическое оборудование. Двухнаправленность информационного обмена между физической и виртуальной средами открывает принципиально новую возможность контроля технических объектов, позволяя оператору реализовать дистанционное управление (телеуправление).

Предлагаемый подход к построению системы, предусматривающий интеграцию с физическими компонентами реального микротехнологического процесса, позволяет не только реконструировать ход технологических операций, но создать на базе системы человеко-машинный интерфейс, который может быть использован при построении автоматизированных рабочих мест конструкторов, технологов и операторов технологических процессов.

Проведенный анализ различных архитектур виртуальных систем позволил выбрать оптимальную по ряду соображений иерархическую архитектуру, базовая конфигурация которой представляет многомодульную информационно-управляющую систему, построенную с учетом особенностей взаимодействия виртуальных и реальных микросистем, и разработать программное и алгоритмическое наполнение системы [6, 7]. Как показали результаты первых экспериментов с системой в режиме моделирования, реализуемая в ней визуальная информационная поддержка на основе реконструкции состояний (параметров) технологических процессов обеспечивает высокий уровень интерпретации и отображения стереоскопических картин, позволяя обойти множество проблем, которые имеют место при формировании изображений с помощью традиционных каналов обратной связи.

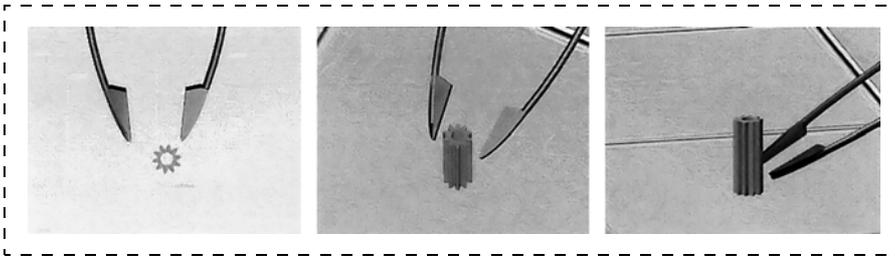


Рис. 3. Трехмерная реконструкция сборочных фаз в различных ракурсах

Несколько необычным способом может быть поставлена и решена задача коррекции положения компонентов МЭМС. При обычной постановке задачи для минимизации ошибки позиционного позиционирования микроманипулятора необходим локальный контур видеонаблюдения за реализуемыми воздействиями на микродеталь. Поскольку технические средства наблюдения на микроуровне не всегда позволяют адекватно оценивать взаимное расположение микроманипулятора и детали, то задача коррекции может стать невыполнимой. В предлагаемой постановке без ущерба для выполнения основной задачи оператор может наблюдать рабочую среду из любой точки в пространстве, под любым ракурсом и планом, получать наиболее информативную проекцию интересующего объекта сборки (рис. 3). Стереоскопическое визуальное отображение переводит наблюдаемую область в "привычный" объемный вид, что значительно облегчает задачу восприятия. Возможна реализация функции наблюдения под несколькими произвольными ракурсами одновременно с помощью виртуальных камер, что в принципе невозможно на микроуровне при использовании реальных оптических приборов вследствие ограниченной рабочей среды.

Наряду с тем, что использование виртуальной системы предоставляет качественно новые возможности для восприятия и мониторинга состояния технологической среды, также появляется

возможность решения с ее помощью сопутствующих задач на этапах проектирования нового технологического оснащения и предварительной отработки, апробации алгоритмов планирования и управления технологическими процессами. Удалось добиться снижения стоимости разработки новых конструкций микромеханических систем, затрат на внедрение новых алгоритмов в системы планирования и управления, а также менее затратного проведения натуральных и полунатурных экспериментов [8, 9].

### Заключение

Предложенные методы реконструкции микросборочных операций были опробованы в экспериментах при разработке автоматизированных технологических процессов на базе прототипа микросборочного комплекса. Показана возможность применения разработанных математического и программного обеспечения для моделирования и натурального воспроизведения движений высокопрецизионных микроманипуляторов. На основе проведенных экспериментов сформулированы технические предложения по дальнейшему расширению информативности визуального наблюдения на основе реконструкции состояния технологической среды. Предлагается повышение уровня погружения в виртуальную среду за счет использования более адекватных средств навигации внутри виртуального пространства и синтеза изображений виртуальных моделей. В настоящее время ведутся работы по организации

канала управления виртуальными моделями микророботов на базе кубического 3D-манипулятора. Предполагается, что в дальнейшем эти работы станут основой для реализации непосредственного управления реальными микроманипуляционными устройствами.

*Работа выполнена при финансовой поддержке программы № 16 фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН, грантов "Кандидаты наук РАН" Фонда содействия отечественной науке и РФФИ № 05-01-97906-р\_агидель\_а.*

### Список литературы

1. Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Манипуляционные микроробототехнические системы и проблемы производства гибридных МЭМС // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 2. С. 38—44.
2. Bohringer K. F., Donald B. R., Kav-raki L., Lamiroux F. L. Part orientation with one or two stable equilibria using programmable vector fields // IEEE Trans. Robotics and Automation. 2000. Vol. 16, No. 2. P. 157—170.
3. Dechev N., Cleghorn W. L., Mills J. K. Microassembly of 3-D MEMS Structures Utilizing a MEMS Microgripper with a Robotic Manipulator // Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA2003), Taipei, Taiwan, 2003. P. 14—19.
4. Klocke V., Gesang T. Nanorobotics for Micro Production Technology // SPIE Conference Photonics Fabrication Europe, Brugge, Belgium. 2002. P. 409—419.
5. Yamamoto Y., Konishi R., Negishi Y., Kawakami T. Prototyping ubiquitous micro-manipulation system. // Pr. 2003 IEEE International Conference. Advanced Intelligent Mechatronics, 2003.
6. Даринцев О. В., Мигранов А. Б., Верн Х. Имитационно-технологический комплекс для проектирования оснастки микророботов // Мехатроника, автоматизация и управление: Тр. 2-й Всерос. науч.-техн. конф. Уфа: УГАТУ, 2005. Т. 2. С. 143—148.
7. Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Виртуальная микротехнологическая среда: структура и особенности реализации // Информационные технологии и программирование: Межвуз. сбор. ст. Вып. 4 (9) М.: Изд. МГИУ, 2003. С. 17—23.
8. Ильясов Б. Г., Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Использование нейросетевого предиктора в системе управления микротехнологическим процессом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 8. С. 39—45.
9. Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Синтез алгоритмов управления сборочными микроробототехническими системами // Известия ТРТУ. 2004. № 9. С. 174—182.

УДК 621.382.002

**В. В. Аристов**, чл.-корр. РАН,  
**В. Н. Мордкович**, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
Институт проблем технологии микроэлектроники  
и особочистых материалов РАН,  
**П. П. Мальцев**, д-р техн. наук, проф.,  
Секция прикладных проблем  
при Президиуме РАН

## ТЕХНОЛОГИЯ "КРЕМНИЙ-НА-ИЗОЛЯТОРЕ" В МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ

*Обсуждаются перспективы применения технологии "кремний-на-изоляторе" (КНИ) для формирования микросистем различного функционального назначения (датчиковых, микроэлектромеханических, микрофотонных). Приводятся примеры успешного использования КНИ-технологии для создания разнообразных объектов микросистемотехники.*

В последние годы возникло и бурно развивается новое научно-техническое направление — микросистемная техника (МСТ). Это направление настолько новое, что в нем до сих пор еще не полностью сложилась канонизированная терминология. Воспользуемся одним из ряда существующих определений МСТ, предложенным компанией *Nexus* и представляющимся весьма удачным в контексте данной статьи: "Микросистема — это комбинация нескольких микрокомпонентов, оптимизированная как целостная система для выполнения одной или нескольких функций" [1]. Это определение позволяет нам с единых позиций рассмотреть достаточно общий технологический подход к реализации объектов МСТ различной функциональной и конструктивной природы. Для удобства изложения к таким объектам мы отнесем:

- датчиковые, содержащие в одном чипе первичные преобразователи физических и химических внешних воздействий в электрический сигнал и элементы обработки индуцированного воздействием сигнала, обеспечивающие стабильное функционирование контрольных и управляющих сенсорных устройств;
- микроэлектромеханические, преобразующие механические воздействия в электрический сигнал и управляющие таким сигналом или, наоборот, преобразующие электромагнитные воздействия в механическую реакцию системы;
- микрофотонные, в которых обрабатываемый информационный сигнал имеет оптическую

природу, а его обработка основывается на использовании так называемых фотонных кристаллов.

С материаловедческой точки зрения вне зависимости от функциональных и конструктивных особенностей практически все устройства МСТ объединяет необходимость использования многослойных систем, состоящих из материалов с различными электрофизическими, механическими, структурными и химическими свойствами. При этом очевидно, что эффективный с технических и экономических позиций процесс изготовления любых изделий МСТ должен максимально использовать возможности технологии микроэлектроники. Цель настоящей статьи состоит в том, чтобы привлечь внимание специалистов в области разработки и изготовления МСТ к широким возможностям так называемой технологии "кремний-на-изоляторе" (КНИ), являющейся в настоящее время, по сути, вершиной современной технологии микроэлектроники [2].

### КНИ-технология в микроэлектронике

КНИ-технология изготовления микроэлектронных приборов основана на том, что активные элементы прибора формируются в слое кремния, отделенном от кремниевой подложки слоем скрытого в ней диэлектрика (как правило,  $\text{SiO}_2$ ).

КНИ-интегральные схемы отличаются от своих кремниевых аналогов способностью работать при гораздо более высоких температурах и повышенной устойчивостью к облучению. Это связано с тем, что скрытый диэлектрический слой подавляет утечки тока из элементов ИС в кремниевую подложку и препятствует проникновению радиационно-индуцированных носителей заряда из подложки в приборный слой кремния. Кроме того, КНИ-приборы МОП-типа обладают повышенным быстродействием и пониженным энергопотреблением.

В КНИ-приборах конструктивно-технологического базиса МОП характерные толщины слоев  $\text{Si}$  и  $\text{SiO}_2$  составляют 0,05...0,1 мкм и 0,2...0,4 мкм соответственно. При этом МОП-транзисторы, сформированные на основе отсеченного слоя кремния, могут работать как в режимах инверсии, так и частичного или полного обеднения. КНИ-структуры с такими геометрическими характеристиками могут использоваться и для формирования БИ-МОП-базиса с латерально расположенными биполярными транзисторами [3]. Что касается КНИ-приборов традиционного биполярного базиса с вертикальными транзисторами, минимальная толщина отсеченного слоя кремния измеряется единицами микрометров. Такие КНИ-структуры весьма привле-

Сопоставление ПДХ с датчиками Холла зарубежных фирм

Производитель	Заявитель проекта	Sentron AG	Honeywell	Siemens	
Тип датчика	ПДХ	2D-VD-11	732SS211	KSY-10	RHY-17
Материал	КНИ	Si	Si	GaAs	InAs
Расстояние между холловскими контактами, мм	0,03	0,25	Нет данных	0,2	0,7
Рабочий ток, мА	< 0,3	2	5	5	60
Чувствительность, В/Тл	0,3...0,6	0,44	0,34	0,85...1,15	0,3
Относительная чувствительность*, В/мм·Тл	10...20	1,75	Нет данных	4,2...5	0,45
Удельная чувствительность, В/А·Тл	1000...5000	220	70...80	170...230	≥6
Температурный диапазон, °С	-265...300	-40...110	0...70	-40...150	-269...80

\* Чувствительность, приведенная к единичному расстоянию между холловскими контактами, позволяющая объективно сравнивать ДХ различного размера между собой.

кательны для изготовления ИС с полной диэлектрической изоляцией элементов [4].

В настоящее время наиболее распространенными методами формирования КНИ-структур являются компрессионное соединение кремниевых пластин через диэлектрический слой с последующим имплантационно-индуцированным или химико-механическим утонением и имплантационно-термический синтез скрытых диэлектрических слоев [5].

#### КНИ-датчики

В силу отмеченных выше достоинств технологии КНИ ее использование для создания чувствительных элементов датчиков обеспечивает возможность существенно повысить их надежность в экстремальных условиях эксплуатации, т. е. возможность функционирования при высоких рабочих температурах и высоких уровнях радиации. Однако КНИ-технология дополнительно вносит в традиционные конструкции чувствительных элементов принципиально новую возможность улучшить их характеристики: систему кремниевая подложка—скрытый диэлектрический слой можно использовать как полевой управляющий элемент. Проиллюстрируем это на примере магниточувствительного элемента нового типа, так называемого полевого датчика Холла (ПДХ) [6—8].

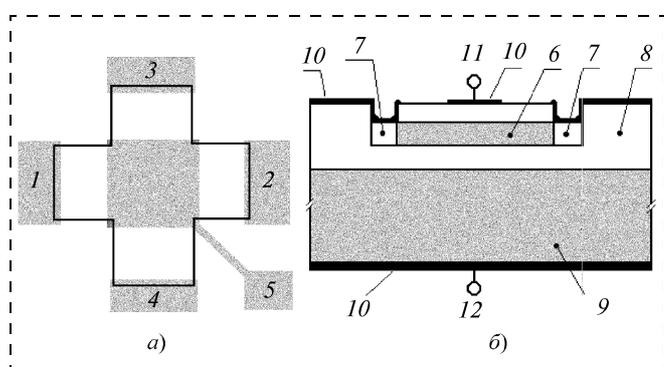


Рис. 1. Конструкция КНИ ПДХ:

*a* — вид сверху; 1, 2 — токовые электроды; 3, 4 — холловские электроды; 5 — электрод верхнего затвора; *b* — поперечное сечение; 6 — рабочий слой (*n*-Si); 7 — омические контакты (*n*<sup>+</sup>-Si); 8 — SiO<sub>2</sub>; 9 — подложка (*n*-Si); 10 — Al пленка; 11 — верхний затвор; 12 — нижний затвор

На рис. 1, где представлена конструкция ПДХ, видно, что сформированное в отсеченном слое кремния тело датчика расположено между двумя управляющими системами, одна из которых расположена на поверхности кремния и типична для МОП-приборов, другая — внутренняя — присуща лишь КНИ-приборам. Благодаря этому ПДХ, в отличие от традиционного датчика Холла, является активным элементом, способным не только регистрировать, но и усиливать магнитоиндуцированный сигнал. В ПДХ изменение потенциала на одном или обоих затворах позволяет регулировать динамический диапазон магниточувствительности, управлять значением рабочего тока, уменьшить зависимость магниточувствительного сигнала от изменений температуры окружающей среды, повысить устойчивость к радиации.

Более того, двухзатворная система открывает новые схемные возможности обработки полезного сигнала. Например, с помощью затворов можно осуществить модуляцию проводимости канала ПДХ, что в сочетании со схемой синхронного детектирования сигнала обеспечит резкое повышение отношения сигнал/шум, т. е., иными словами, повышение пороговой магниточувствительности. Отметим, что при различии частот модуляции потенциалов на затворах появляется возможность регистрировать воздействие магнитного поля не только по измерениям ЭДС Холла, но и по изменениям частоты выходного сигнала. И, наконец, система холловские электроды — управляющие затворы может использоваться как элемент обратной связи для регулировки динамического диапазона измерений.

Благодаря всему отмеченному выше, КНИ ПДХ по совокупности характеристик превосходит известные в настоящее время магниточувствительные элементы холловского типа (даже те из них, которые изготавливают на основе полупроводников с гораздо более высокой, чем у кремния, подвижностью носителей тока). Сопоставление КНИ ПДХ с типичными датчиками Холла известных мировых производителей приведено в табл. 1.

Как отмечалось выше, чувствительный элемент является лишь частью датчиковой микросистемы. Неотъемлемая ее часть — элементы обработки сиг-

нала, выработанного чувствительным элементом. Весьма желательно также, чтобы микросистема включала и элементы обеспечения надежного функционирования (такие как стабилизаторы напряжения и тока, компенсаторы изменений температуры и др.). Технологически вполне реально встроить локальный КНИ-чувствительный элемент в кремниевую обрабатывающую ИС. Примером такого подхода может служить магнитоуправляемая цифровая ИС [3, 9], структурная схема которой приведена на рис. 2.

Локальная область КНИ была создана в пластине кремния путем заглабленной имплантации ионов азота и кислорода и последующего отжига [2]. По сравнению с аналогичной схемой на основе объемного кристалла кремния использование КНИ ПДХ позволило заметно повысить чувствительность микросхемы и уменьшить энергопотребление (табл. 2).

Очевидно однако, что наибольший эффект будет достигнут, если все электронные элементы датчиковой микросистемы будут выполнены по КНИ-технологии. В этом случае вся система будет

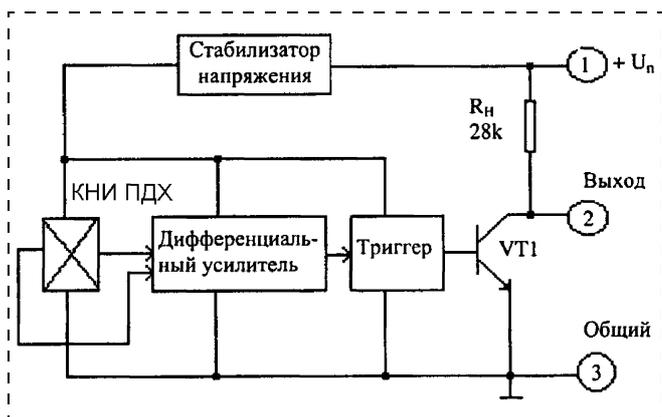


Рис. 2. Магнитоуправляемая цифровая ИС, содержащая локальный КНИ ПДХ

Таблица 2  
Сопоставление характеристик ИС TL170C Texas Instr., США и аналогичной ИС с КНИ ПДХ в качестве сенсора\*

Тип ИС	ИС, содержащая КНИ ПДХ	ИС TL170C Texas Instr., США
Тип выходного сигнала	Цифровой	Цифровой
Индукция отпирания, мТл	-10	-25
Индукция запираения, мТл	10	25
Ток в режиме ожидания, мА	2...3	7,5

\* При встраивании ПДХ КНИ в топологию ИС TL170C никаких специальных мер по согласованию выходного сопротивления ПДХ с каскадами обработки сигнала TL170C принято не было (выходные сопротивления ПДХ и стандартного ДХ, используемого в данной ИС, отличаются, по крайней мере, на порядок). Тем не менее, экспериментальные ИС с КНИ ПДХ в качестве первичного преобразователя продемонстрировали существенное повышение магниточувствительности и уменьшение тока потребления в режиме ожидания магнитного воздействия.

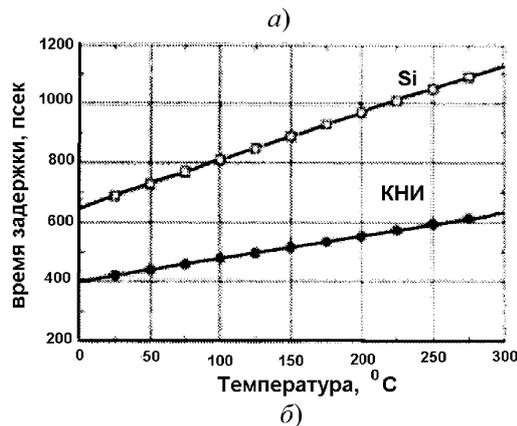
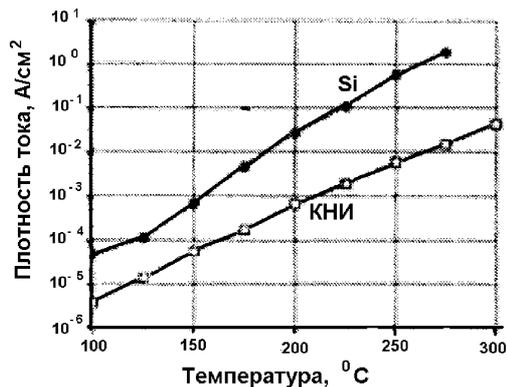


Рис. 3. Температурные зависимости тока утечки (а) и времени задержки (б) специализированной КНИ ИС фирмы Honeywell, США, и ее кремниевого аналога [10]

характеризоваться не только повышенной чувствительностью и малым энергопотреблением, но и расширенным динамическим диапазоном рабочих температур, повышенным быстродействием, высокой устойчивостью к облучению. В качестве примера на рис. 3 приведены данные о температурной зависимости некоторых характеристик специализированной для использования в датчиковой аппаратуре ИС фирмы Honeywell, США, по сравнению с ее кремниевым аналогом [10].

### КНИ микроэлектромеханические системы

Одно из наиболее распространенных направлений формирования микроэлектромеханических систем (МЭМС) связано с использованием многослойных гетероструктур на основе кремния и базовых технологических процессов микроэлектроники, в первую очередь, таких, как травление (химическое, плазмохимическое, реактивное ионное) и осаждение слоев диэлектриков, металлов и поликристаллического кремния [11]. КНИ-структура по своей природе является трехмерной трехслойной гетеросистемой типа кремний—диэлектрик—кремний. Уже только поэтому они представляют интерес для разработчиков МЭМС.

Исторически одной из первых МЭМС на основе КНИ-структур являются датчики давления мембранного типа. Последовательность их изготовле-

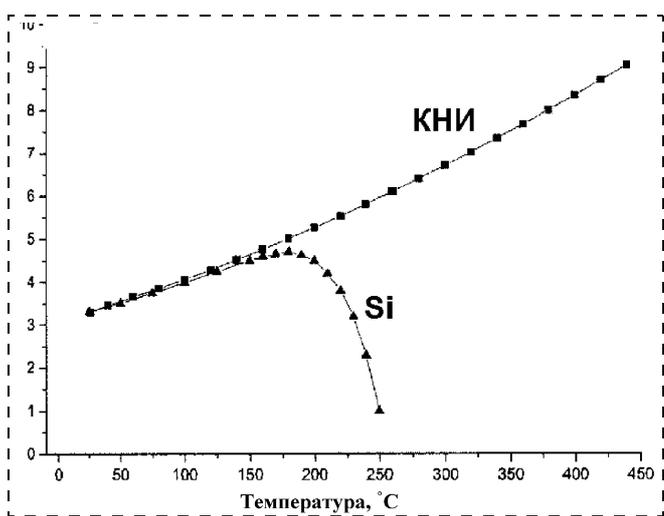


Рис. 4. Зависимость электросопротивления рабочего слоя от температуры в КНИ и традиционных кремниевых датчиках давления

ния включает формирование резисторов в тонком слое кремния КНИ-структуры и создание мембраны путем селективного травления участка кремниевой подложки, расположенного под резисторами. Изменения изгиба мембраны при вариациях давления вызывают изменения подвижности носителей тока в кремнии и, как следствие, изменение электросопротивления резистора. Несомненное достоинство КНИ-датчиков давления — существенное расширение диапазона рабочих температур по сравнению с кремниевыми аналогами (рис. 4). Очевидно, что в той части слоя кремния, которая удалена от мембраны и расположена над участком подложки первоначальной толщины, естественно расположить электронные элементы КНИ ИС обработки сигнала и сформировать МЭМС измерения давления, обладающую всеми упомянутыми выше достоинствами КНИ ИС.

Другое достоинство КНИ-технологии — простая возможность воспроизводимо в широких пределах варьировать толщину мембраны за счет изменения режимов селективного травления кремниевой подложки (от долей микрометра, когда в пределе толщина мембраны равна сумме толщин слоев кремния и скрытого диэлектрика КНИ-структуры, до долей миллиметра, т. е. полной толщины КНИ-структуры). Таким образом, достаточно просто решается задача изготовления МЭМС-датчиков давления различного динамического диапазона.

Приведенный пример иллюстрировал привлекательность КНИ-структур в так называемой технологии глубокого травления для формирования механических элементов МЭМС, реагирующих на внешнее воздействие. В то же время весьма распространена технология нанесения тонких слоев различных твердых тел на подложку (преимущественно кремниевую) и формирование необходимых

конструкционных элементов (балок, консолей, полостей и т. п.) стандартными методами технологии микроэлектроники [11]. Этот подход позволил разработать целую гамму МЭМС различного функционального назначения. В частности, в работе [13] приведена информация о таких отечественных МЭМС как гироскопы, акселерометры, датчики давления, микрзеркала и других устройствах, при изготовлении которых применялась технология поверхностной микромеханики.

Строго говоря, широко используемая в технологии поверхностной микромеханики гетеросистема кремниевая подложка — пленка диэлектрика — пленка поликристаллического кремния тоже является КНИ-структурой. Ее отличие от классической микроэлектронной КНИ-структуры в том, что в последней оба кремниевых компонента являются монокристаллическими. При этом "микромеханическая" КНИ-структура, на базе которой, как уже отмечалось, можно формировать различные конструкционные элементы, характеризуется существенно меньшей стоимостью, чем "микроэлектронная". Казалось бы, поэтому в устройствах микромеханики использование КНИ-структуры с пленочными компонентами может исключить необходимость применения "микроэлектронных" КНИ-структур. Однако существует ряд причин, по которым "микроэлектронные" КНИ-структуры нельзя сбрасывать со счета при разработке МЭМС. Отметим две из них.

1. Если конструкция МЭМС должна интегрировать в одном чипе механические и электронные элементы, высокое качество последних может быть достигнуто только на основе монокристаллического кремния.

2. Остаточные упругие напряжения и их градиенты в пленочных "микромеханических" КНИ-структурах гораздо больше, чем в "микроэлектронных" [14]. Такие эффекты в состоянии исказить форму механических элементов и отрицательно влиять на характеристики МЭМС, что особенно нежелательно в МЭМС, использующих обработку оптических сигналов (микрзеркала, линзы Френеля и т. п.).

Конечно, формирование сколь-нибудь сложных МЭМС на основе КНИ-систем с монокристаллическим кремнием с неизбежностью включа-

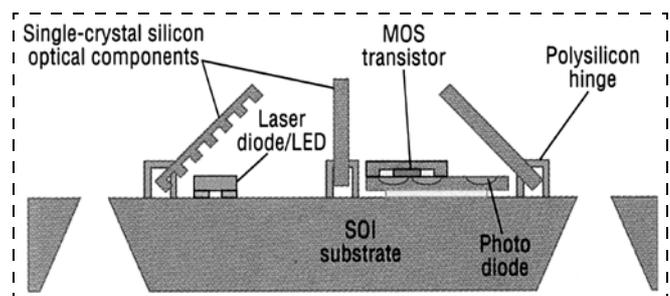


Рис. 5. Поперечное сечение оптико-механической системы на основе КНИ-структуры. Изготовлена фирмой "Хегох", 2003 г. [14]

ет процессы осаждения и структурирования различных пленочных слоев. Поэтому, чем дальше, тем в большей степени современная технология разработки МЭМС становится гибридной в том смысле, что сочетает подходы и методы объемной и поверхностной микромеханики. Убедительную иллюстрацию успешности такого подхода можно найти в работе [14], где описана последовательность изготовления КНИ МЭМС, включающей механические узлы управления световым сигналом, полупроводниковый источник света и фотоприемник. Схема устройства приведена на рис. 5.

### КНИ-технология в микрофотонике

В последние годы серьезное внимание специалистов обращено на микрофотонику, т. е. область техники, позволяющую с помощью микроминиатюрных оптических элементов осуществить функциональную обработку световых сигналов, подобную той, которую микроэлектронные элементы выполняют с электрическими сигналами. Одним из побудительных мотивов интереса к микрофотонике является мысль о том, что обработка световой информации позволит избежать физико-технологических ограничений на скорость обработки электрического сигнала и отводимую мощность ИС, с которыми в ближайшие годы столкнется микроэлектроника на своем традиционном пути. Действительно, существующая постоянная тенденция уменьшать размеры активных областей транзисторов и увеличивать число транзисторов, приходящихся на единицу площади ИС, и неуклонное возрастание общей длины расположенных в разных уровнях токоподводящих дорожек, в конце концов не позволит улучшить характеристики ИС. В то же время микрофотонные устройства будут обрабатывать информацию со скоростью света, затрачивая пренебрежимо малую мощность по сравнению с электронными элементами. Представляется, что КНИ-технология является весьма перспективной для разработки элементов микрофотонных устройств [15].

КНИ-структура представляет собой чередование слоев с различной диэлектрической проницаемостью, что предопределяет возможность ее использования в качестве световода. В стандартной КНИ-структуре в качестве световода можно использовать слой кремния, поскольку он ограничен воздухом и скрытым в подложке слоем  $\text{SiO}_2$ . Если же скрытый диэлектрик будет представлять собой технологически легко реализуемый слой типа  $\text{Si}_3\text{N}_4$ — $\text{SiO}_2$ — $\text{Si}_3\text{N}_4$ , тогда и скрытый диэлектрик можно использовать как световод. Таким образом, в КНИ-структуре, в принципе, возможна одновременная передача светового сигнала по нескольким световодам, что увеличивает информационные возможности микрофотонных устройств.

Известно [15], что при падении света на объект с периодической последовательностью областей с

различной диэлектрической проницаемостью возникает область практически полного поглощения, спектральное положение которой зависит, в частности, от геометрии указанных областей. Если же последовательность расположения областей нарушена (т. е. имеется дефект периодичности), внутри области поглощения возникает узкая линия пропускания (или линии — в зависимости от характеристик и числа дефектов). Объекты с такими уникальными оптическими свойствами получили название фотонных кристаллов.

Базовые технологические процессы современной технологии микрофотоники позволяют формировать в кремнии последовательность областей с различной диэлектрической проницаемостью. Например, используя плазмохимическое травление кремния, можно создать последовательность глубоких щелей (или цилиндрических отверстий), термически окислить их стенки, затем заполнить отверстия поликремнием и термически трансформировать его в  $\text{SiO}_2$  (см., например [4]). При этом глубина отверстий может составлять десятки и даже сотни микрометров при микрометровой ширине (диаметре) и практически вертикальных стенках. Используя возможности фотолитографии, несложно создать требуемые нарушения периодичности в таких объектах. Если обрабатываемый таким образом кремний представляет собой компонент КНИ-структуры, соответствующее устройство сочетает возможности передачи и обработки полезного сигнала.

В литературе уже есть работы, демонстрирующие возможности использования КНИ-структур для создания микрофотонных элементов. На рис. 6, 7

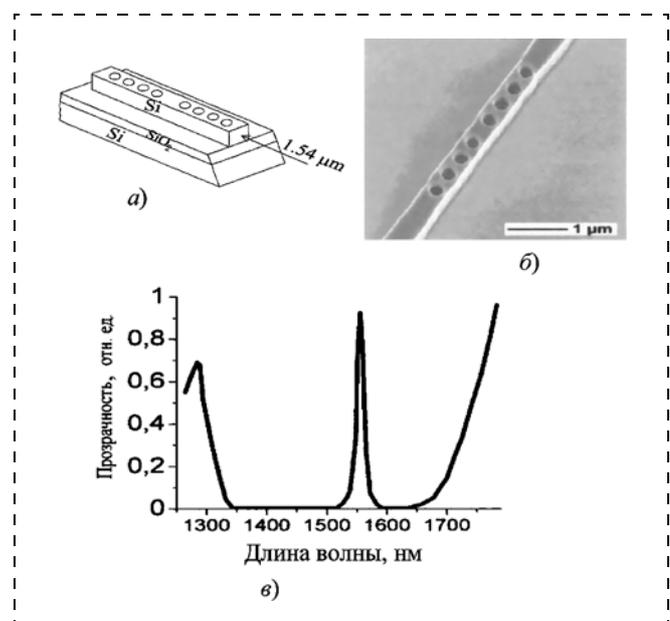
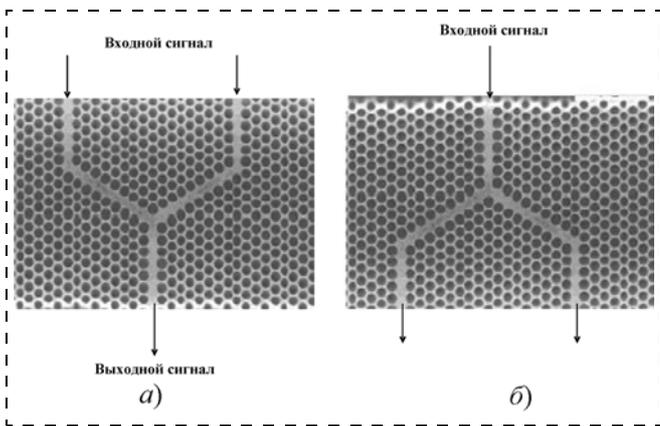


Рис. 6. Выделение разрешенной спектральной линии фотонным КНИ-элементом [16]:

*a* — конструкция элемента; *б* — вид сверху реального элемента; *в* — спектральная характеристика. Кружки на рис. *a* и *б* соответствуют сквозным отверстиям в слое кремния КНИ-структуры



**Рис. 7. Топология КНИ фотонных элементов:**  
*a* — сумматор, *б* — делитель [17]. Вид сверху. Кружки соответствуют сквозным отверстиям в слое кремния КНИ-структуры

приведены примеры выделения спектральной линии, а также сложения и разложения оптических сигналов с помощью КНИ микрофотонных элементов [16, 17].

Существуют и другие привлекательные возможности использования КНИ-структур в микрофотонике. Например, тонкий слой кремния, ограниченный поверхностью с одной стороны и интерфейсом Si—SiO<sub>2</sub> с другой, обнаруживает эффект оптического резонатора, который существенно (в десятки раз) усиливает фотолюминесценцию квантоворазмерных центров, локализованных в этом слое [18]. Вместе с тем, если поляризованный свет распространяется по слою скрытого диэлектрика, резонно использовать слои Si и кремниевую подложку как обкладки конденсатора и управлять поворотом плоскости поляризации с помощью эффекта Керра.

### Некоторые тенденции развития технологии формирования многослойных структур

Информация, содержащаяся в предыдущих разделах, была призвана показать, что использование структур "кремний-на-изоляторе" и базовых технологических процессов микроэлектроники позволяет разработать микросистемы различного функционального назначения. Однако слоистые структуры на основе кремния не могут обеспечить создание всех видов микросистем. Во многих случаях необходимо использовать не только структуру типа Si—SiO<sub>2</sub>—Si, но и другие полупроводники и диэлектрики, а также их сочетания с металлами, керамикой, полимерами [11]. Поэтому принципиально важно подчеркнуть, что существующие способы и оборудование для формирования КНИ-структур могут быть адаптированы к изготовлению многослойных структур с разнообразным набором компонентов.

Сошлемся на некоторые из весьма многочисленных публикаций, иллюстрирующих возможность создания различных многослойных структур

наиболее распространенными в КНИ-технологии методами бондинга (компрессионного соединения) и имплантационного синтеза скрытых диэлектрических слоев. Так, ионная имплантация и последующий отжиг позволили изготовить структуры типа Si—Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub>O<sub>z</sub>—Si, SiGe—SiO<sub>2</sub>—Si [19—21]. В свою очередь, технология бондинга обеспечила формирование структур типа "кремний на кварце", Ge—SiO<sub>2</sub>—Si, SiC—SiO<sub>2</sub>—Si, Si-алмаз—Si, Si—SiO<sub>2</sub>—Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>—Si, Si—SiGe—SiO<sub>2</sub>—Si, а также структур типа Si—SiO<sub>2</sub>—...—Si, содержащих до девяти кремниевых и диэлектрических слоев различной толщины [22, 23]. При этом бондинг может использоваться не только для прямого соединения пластин различных материалов, но и для размещения приборных чипов на основе различных полупроводников на чужеродных подложках. Последнее иллюстрируется рис. 5, где источник света на основе полупроводниковых соединений расположен на КНИ-подложке, содержащей микромеханические узлы управления световым лучом и фотоприемник.

Технологии, разработанные первоначально для формирования КНИ-структур, оказались столь универсальными, что помимо привычной для зарубежной периодики аббревиатуры SOI (Silicon On Insulator — КНИ) все чаще встречаются такие обозначения как SGOI (Silicon — Germanium On Insulator), SOIM (многослойный SOI) и даже, предельно универсальное SOS (Something On Something). Последнее с некоторой натяжкой можно выразить русским "все, что угодно, на чем угодно", и это, на наш взгляд, также свидетельствует о больших перспективах КНИ-технологии (в широком понимании этого термина) в микросистемотехнике.

### Список литературы

1. Мальцев П. П. Предисловие к сб. "Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам" / Под ред. П. П. Мальцева. М.: Техносерв, 2005. С. 16.
2. Мордкович В. Н. Структуры "кремний-на-изоляторе" — перспективный материал микроэлектроники // Материалы электронной техники. 1988. № 2.
3. Горнев Е. С., Мордкович В. Н., Мурашев В. Н., Сычевский В. А. Функционально-интегрированная элементная база микроэлектроники на основе структур "кремний-на-изоляторе" // Приборы. 2003. № 3. С. 30—36.
4. Енишерлова К. Л., Русак Т. Ф., Виноградов Р. Н., Темпер Э. М. Диэлектрическая изоляция для быстродействующих биполярных интегральных схем // Материалы электронной техники. 2003. № 3. С. 62—67.
5. Colinge J. P. Silicon-on-Insulator technology: Materials for VLSI. Kluwer Acad. Pub. 1997.
6. Патент РФ № 2130668.
7. Мордкович В. Н., Баранчиков М. Л., Леонов А. В. и др. Полевой датчик Холла — новый тип преобразователя магнитного поля // Датчики и системы. 2003. № 7. С. 33.
8. Mokrushin A. D., Omeljanovskaja N. M., Leonov A. V., Mor-dkovich V. N., Pazhin D. M. Radiation effects in SOI magnetic sensitive elements under different irradiation conditions. Progress in SOI structures and Devices Operating at Extreme Conditions / Ed. by F. Balestra, A. Nazarov, V. Lysenko // Kluwer Acad. Pub., Nato Sci. Ser. 2000. V. 58. P. 221—228.
9. Патент РФ № 2072590.
10. Coling C. A. SOI for harsh environment application in the USA. Progress in SOI structures and Devices Operating at Extreme

Conditions / Ed. by F. Balestra, A. Nazarov, V. Lysenko // Kluwer Acad. Pub., Nato Sci. Ser. 2000. V. 58. P. 93–104.

11. **Лучинин В. В., Таиров Ю. М., Васильев А. А.** Особенности материаловедческого и технологического базиса микросистем // Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам / Под ред. П. П. Мальцева. М.: Техносфера, 2005. С. 298–305.

12. **Von Berg J., Sonderegger C., Bollhalder S., Cavalloni C.** Piezoresistive SOI-Pressure Sensor for High Pressure and High Temperature Applications // Proc. of 12 Int. Conf. Sensor 2005, AMA Service GmbH. 2005. V. 1. P. 33–38.

13. **Нано- и микросистемная техника.** От исследований к разработкам / Под ред. П. П. Мальцева. М.: Техносфера, 2005.

14. **Kubby J.** Hybrid Silicon-on-insulator micromachining for critical MEMS components // Solid State Technology. Sept. 2004. P. 69–73.

15. **Varabanenkov M. Yu., Aristov V. V., Mordkovich V. N.** SOI technology as a basis for microphotonic-microelectronic integrated devices // Science and Technology of Semiconductor-On-Insulator Structures and Devices Operating in a Harsh-Environment / Ed. by D. Frandre, A. Nazarov, P. Hemment. Nato Sci. Ser. Kluwer Acad. Pub. 2005. V. 185. P. 27–37.

16. **Foresi J. S., Villeneuve P. R., Fenera J., Thoen E. R., Steinmeyer G., Fan S., Joannopoulos J. D., Kimerling L. C., Smith H. I., Ippen E. P.** // Nature. 1997. 390. P. 3.

17. **Birner A., Wehrspohn R., Gosele U., Busch K.** // Adv. Mater. 2000. 13. P. 37.

18. **Тыщенко И. Е., Журавлев К. С., Талочкин А. Б., Черков А. Г., Попов В. П.** Эффект оптического резонатора в структурах кремний-на-изоляторе, имплантированных ионами водорода // Полупроводники. М.: Изд. ФИАН, 2005. С. 324.

19. **Varabanenkov M. Yu., Agafonov Yu. A., Mordkovich V. N., Pustovit A. N., Vyatkin A. F., Zinenko V. I.** Polyenergy ion synthesis of buried oxinitride layer in silicon // Nucl. Instr. and Meth. 2000. B 171. P. 301–308.

20. **Ishikawa Y., Shibata N., Fukatsu S.** Achievement of SiGe-on-insulator technology // Science and Technology of Semiconductor-On-Insulator Structures and Devices Operating in a Harsh Environment / Ed. by D. Frandre, A. Nazarov, P. Hemment. Nato Sci. Ser. V. 185. Kluwer Acad. Pub. 2005. P. 65–75.

21. **Serre C.** et al.  $\beta$ -SiC on SiO<sub>2</sub> formed by ion implantation and bonding for micromechanics applications // Perspectives, Science and Technologies for Novel Silicon on Insulator devices / Ed. by P. Hemment, V. Lysenko, A. Nazarov. Nato Sci. Ser. V. 73, Kluwer Acad Pres., 2000. P. 212–216.

22. **Moriceau H.** et al. Smart cut technology: the part for advanced SOI substrates // Science and Technology of Semiconductor-On-Insulator Structures and Devices Operating in a Harsh Environment / Ed. by D. Frandre, A. Nazarov, P. Hemment. Nato Sci. Ser. V. 185. Kluwer Acad. Pub., 2005. P. 39–52.

23. **Bengtsson S., Bergh M.** Diamond based silicon-on-insulator materials and devices // Perspectives, Science and Technologies for Novel silicon on Insulator devices / Ed. by P. Hemment, V. Lysenko, A. Nazarov. Nato Sci. Ser. V. 73. Kluwer Acad Pres., 2000. P. 97–107.

УДК 776.47

**А. С. Агейченко, Я. И. Точицкий**, канд. техн. наук,  
**А. А. Васильев, В. М. Есьман**,  
Конструкторское бюро точного электронного  
машиностроения — оптико-механическое  
оборудование (КБТЭМ-ОМО) г. Минск

## ТОЧНОСТЬ ПРОЦЕССОВ ФОТОЛИТОГРАФИИ И ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Основные параметры микро- и нанoeлектроники зависят от геометрической точности процессов формирования структур, которые определяются точностью процессов и оборудования для фотолитографии. Из двух параметров — точности размера элемента (CD) и погрешности совмещения слоев (overlay), определяющим является погрешность совмещения. Способы уменьшения этой погрешности в фотолитографии и в фотолитографическом оборудовании рассмотрены в настоящей статье.*

Точность процесса фотолитографии характеризуется двумя основными параметрами: погрешностью совмещения слоев (*overlay*) и невоспроизводимостью размера элемента (CD). Эти погрешности определяют основные параметры фотолитографического оборудования, применяемого при формировании топологии интегральных схем (ИС) — генераторов изображений на этапе изготовления промежуточных фотошаблонов (ПШ), мультипликаторов (*stepper*), формирующих топологию ИС на полупроводниковой пластине, и измерительных

устройств, контролирующих размеры элементов, совмещаемость фотошаблонов и совмещаемость слоев. Погрешности технологических процессов фотолитографии и погрешности оборудования определяются многочисленными независимыми и зависимыми причинами, степень влияния которых должна быть учтена при составлении статистической модели бюджета погрешностей.

Число частных составляющих общей погрешности совмещения слоев (*overlay*), вносящих заметный вклад в бюджет этой погрешности, растет по мере уменьшения топологической нормы (CD), затраты на уменьшение этих составляющих возрастают по экспоненте, поэтому точность литографического оборудования определяет возможность дальнейшего уменьшения топологической нормы и увеличения степени интеграции ИС.

Интегральная схема геометрически представляет собой двухкоординатную сетку, в узлах которой находятся элементы транзисторов и других приборных структур. По мере возрастания степени интеграции размеры элементов и расстояния между ними постоянно уменьшаются, а размеры сетки сохраняются или увеличиваются. Движущая сила этой эволюции — повышение быстродействия, снижение потребляемой мощности, повышение надежности и уменьшение стоимости компьютеров, мобильных телефонов и др. Уменьшение размеров полевого транзистора в  $N$  раз приводит к уменьшению в  $N$  раз рассеиваемой мощности и времени задержки [1]. Основным ограничением в этом процессе выступают возможности технологии литографии формировать топологические структуры ИС с элементами меньших размеров.

Процесс формирования топологии с помощью промежуточного фотошаблона (*reticle*), изготовленного генератором изображений, и последующего его переноса с помощью мультипликатора (*stepper*) на кремниевую пластину был разработан в конце 60-х годов. В 1966 г. в КБТЭМ был разработан первый генератор изображений, в 1973 г. — первый мультипликатор. Уже несколько десятилетий именно эти виды фотолитографического оборудования определяют прогресс микроэлектроники. Современные методы фотолитографии позволяют формировать элементы размерами меньше 100 нм, однако необходимость обеспечить *точность совмещения* слоев — задача неизмеримо более сложная [2]. Именно этот фактор в обозримом будущем определит топологическую норму любых литографических процессов, а следовательно, и дальнейший рост степени интеграции ИС. Уменьшение длины волны экспонирующего излучения не только позволяет уменьшить размер элемента, но и повышает требования к точности совмещения слоев [3, 4]. Перспективы уменьшения размеров ИС и необходимая точность совмещения показаны на рис. 1.

### Погрешности размеров элементов и совмещаемости слоев ИС

Номинальный размер элемента изменяется в пределах допусков, которые определяются воспроизводимостью размера элемента. Погрешность положения края элемента равна половине допуска на невоспроизводимость размера элемента. Зазор между двумя элементами, сформированными в двух циклах литографий, зависит от размера элементов и от смещения координат сетки, проходящей через центры этих элементов.

На рис. 2 показано влияние случайных погрешностей на размеры элементов и зазоры между ними в сопряженных слоях после двух фотолитографий. Влияние систематических погрешностей может быть уменьшено введением поправок.

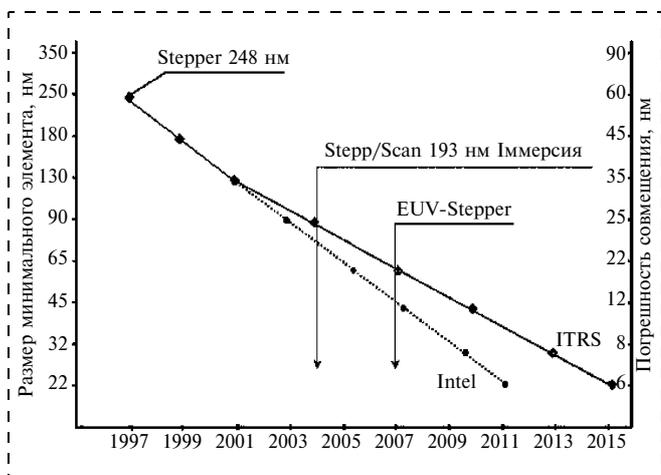


Рис. 1. Перспективы уменьшения размеров элементов (левая шкала) и погрешности совмещения (правая шкала) по материалам ITRS и фирмы Intel

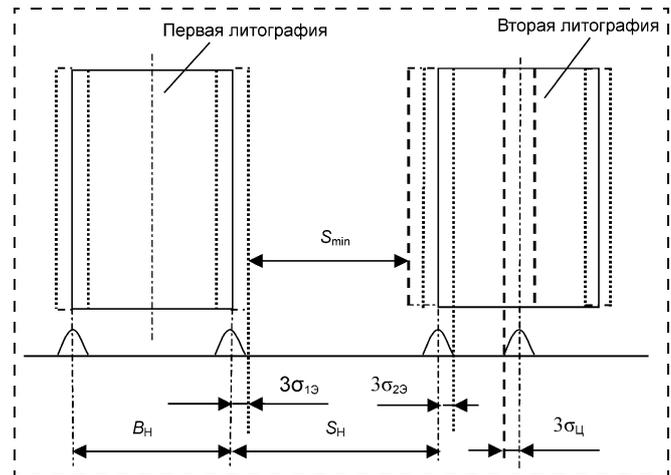


Рис. 2. Влияние погрешностей изготовления на размеры элементов и зазоры между ними в сопряженных слоях:

$B_H$  — номинальный размер элемента;  $S_H$  — номинальный зазор между элементами двух фотолитографий;  $S_{min}$  — минимальный зазор между элементами двух фотолитографий;  $3\sigma_{1э}$  — предельное отклонение размера элемента первой фотолитографии;  $3\sigma_{2э}$  — предельное отклонение размера элемента второй фотолитографии;  $3\sigma_{ц}$  — предельное отклонение центра элемента двух фотолитографий

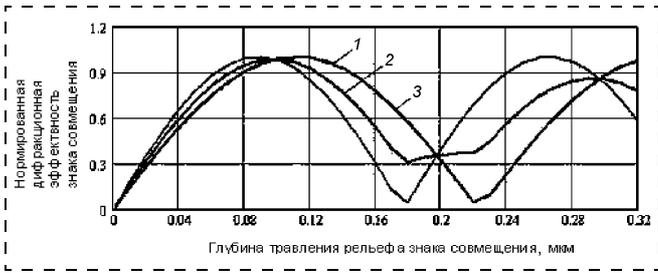
Известны две принципиально различающиеся фотолитографии: контактная, или зазорная, т. е. теневая, фотолитография и проекционная фотолитография с различными масштабами — 1:1, 1:4, 1:5, 1:10.

Размерные погрешности теневой фотолитографии из-за невозможности устранить температурные погрешности совмещения, возникающие в процессе экспонирования при работе с пластинами больших диаметров, и дифракционные эффекты при формировании элементов ограничивают области применения этого метода несмотря на его дешевизну. Второй, наиболее распространенный в настоящее время метод — проекционная фотолитография. При этом методе применяют два принципиально различающихся способа совмещения: непосредственное совмещение каждого изображения ПШ и подложки через проекционный объектив (TTL) и более сложный многоступенчатый способ улучшенного глобального совмещения (EGA), при котором знаки совмещения на подложке измеряются внеобъективным устройством совмещения (PGA). Определение координат устройства PGA и координат изображения ПШ выполняется датчиком системы анализа изображения (САИ).

Способ EGA применяется в современных системах литографии, поэтому рассмотрим его подробнее.

### Способ улучшенного глобального совмещения (EGA)

В системах ГУФ-фотолитографии с проекционным объективом, рассчитанным для работы с экспонирующим излучением с очень узким спектральным диапазоном, применение TTL совмеще-



**Рис. 3. Зависимость дифракционной эффективности знака совмещения от глубины травления:**

1 — дифракционная эффективность знака совмещения для  $\lambda_1 = 650$  нм; 2 — дифракционная эффективность знака совмещения для  $\lambda_2 = 532$  нм; 3 — дифракционная эффективность знака совмещения для  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$

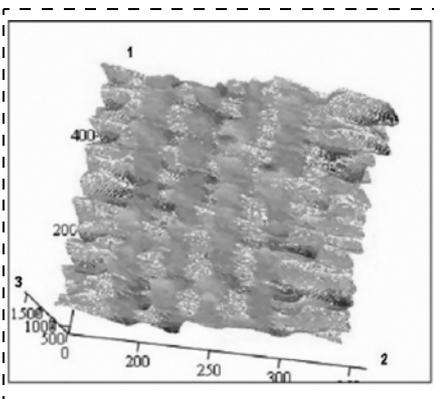
ния через проекционный объектив практически непригодно из-за невозможности ахроматизовать проекционный объектив на другую длину волны, необходимую для работы датчика совмещения. Для повышения точности в системах совмещения применяют специальные апохроматические объективы, расположенные рядом с проекционным объективом, которые позволяют использовать несколько длин волн при измерении координат знаков совмещения, это необходимо при работе со знаками, изменяющимися в процессе технологической обработки полупроводниковых пластин. Для исключения влияния на точность совмещения интерференционных эффектов, возникающих в тонких пленках технологических слоев, знаки выполняют в виде отражательных фазовых структур. Применение нескольких длин волн позволяет увеличить точность совмещения за счет выбора оптимальной длины волны для данной глубины рельефа знака.

На рис. 3 показана зависимость дифракционной эффективности от глубины рельефа знака совмещения, покрытого фоторезистом, для длин волн 532 и 650 нм. Оптимальной глубиной рельефа знака является 0,1 мкм для обеих длин волн, но эффективность знака сохраняется для глубин 0,02—

0,22 мкм. Например, при работе со знаком глубиной 0,18 мкм на длине волны 532 нм будет нулевая эффективность, переход к длине волны 650 нм позволяет достичь эффективности 60 %. Для увеличения точности измерений применяют оптическую пространственную фильтрацию изображения, позволяющую существенно повысить контраст изображения при работе со знаками с низкой эффективностью и подавить оптические шумы, вносимые технологическими процессами. На рис. 4 приведено изображение низкоконтрастного знака на фоне шумов. Рис. 5 иллюстрирует процесс пространственной фильтрации, заключающийся в экранировании всех порядков дифракции, кроме  $\pm 1$ . Восстановление изображения знака совмещения (рис. 6) выполняется с помощью  $\pm 1$  дифракционных порядков (состоящих из 0,  $\pm 1$ ,  $\pm 3$  и  $\pm 5$  порядков изображения), что позволяет повысить отношение сигнал/шум. Фазовая обработка сигналов с использованием быстрого Фурье-преобразования (FFT) позволяет отфильтровать электрические шумы и уменьшить ошибки определения координат знаков, вызванные искажением формы знака после проведения планаризации. На рис. 7 показан сигнал знака совмещения (кривая 1) с искаженной после планаризации вершиной. Для примера сравним два алгоритма определения координат знака совмещения. При использовании алгоритма наведения на центр знака погрешность измерения составит 0,1 мкм (для данного искажения формы знака после планаризации). На рис. 7 показан сигнал (кривая 5), восстановленный после фазовой обработки, использующей 1-, 3-, 5-ю гармоники. Погрешность измерения координат знака с использованием восстановленного сигнала меньше 0,02 мкм.

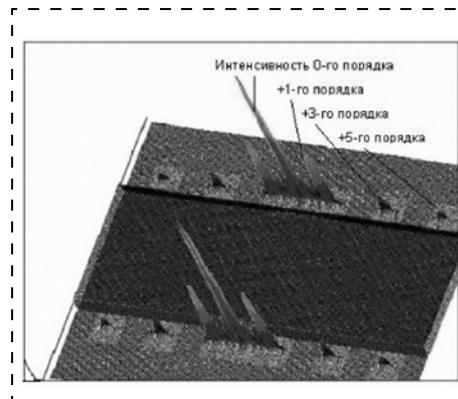
Алгоритм процесса совмещения по способу EGA состоит из следующих операций:

1. Загрузка ПШ, базирование и определение его положения в неподвижной координатной системе с помощью датчика САИ и интерферометров.

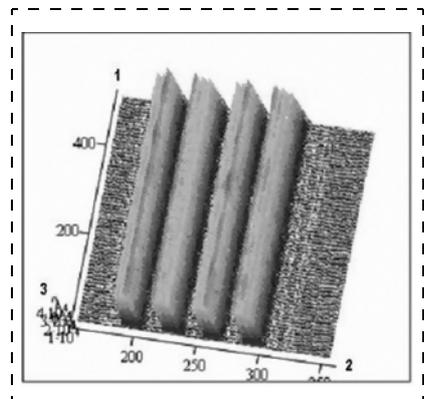


**Рис. 4. Изображение низкоконтрастного знака совмещения на фоне оптических и технологических шумов:**

1 — номер элемента ПЗС камеры по оси Y; 2 — номер элемента ПЗС камеры по оси X; 3 — размер сигнала

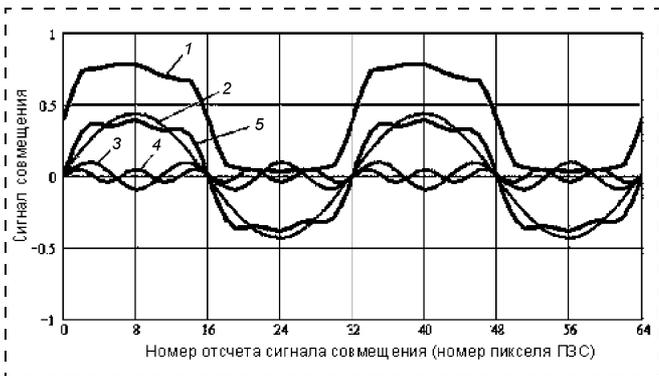


**Рис. 5. Пространственная фильтрация порядков в зрачке системы**



**Рис. 6. Восстановленное изображение знака совмещения после пространственной фильтрации:**

1 — номер элемента ПЗС камеры по оси Y; 2 — номер элемента ПЗС камеры по оси X; 3 — размер сигнала



**Рис. 7. Восстановление сигнала совмещения с помощью фазовой обработки:**

1 — исходный искаженный сигнал; 2 — сигнал 1-й гармоники; 3 — сигнал 3-й гармоники; 4 — сигнал 5-й гармоники; 5 — восстановленный сигнал

2. Определение положения устройства PGA в неподвижной координатной системе с помощью датчика LAS и интерферометров.

3. Загрузка пластины и измерение положения знаков совмещения на ней с помощью устройства PGA. Число измеряемых знаков совмещения может быть 2, 4, 5, 9 и более.

4. Определение коэффициентов искажения геометрии пластины (немасштаб по  $X$  и немасштаб по  $Y$ , развороты  $X$  и  $Y$ , трапецеидальность и т. д.)

Число коэффициентов искажения геометрии пластины, которые можно определить, зависит от числа знаков совмещения. Применяя вычисленные параметры искажения геометрии пластины, можно найти координаты угловых точек каждого модуля полупроводниковой пластины. Для того чтобы совместить изображение модуля ПШ с модулем полупроводниковой пластины, находим целевую функцию, минимизирующую сумму квадратов отклонений координат угловых точек модуля полупроводниковой пластины и координат изображения модуля ПШ, которая зависит от масштаба  $M$  изображения объектива, разворота  $A$  модуля и от смещения  $X, Y$  модуля:

$$F(M, A, X, Y) = \sum_i [(X_{пл_i} - X_{пш_i})^2 + (Y_{пл_i} - Y_{пш_i})^2],$$

где  $i$  — номер угловой точки модуля и соответствующий номер угловой точки изображения шаблона, т. е. определяем

$$F(M, A, X, Y) = \min;$$

$$\sum_i [(X_{пл_i} - X_{пш_i})^2 + (Y_{пл_i} - Y_{пш_i})^2] = \min,$$

$$\text{где } X_{пш_i} = (X_{пл_i} - XL)M + XL;$$

$$Y_{пш_i} = (Y_{пл_i} - YL)M + YL;$$

$$X_{пл_i} = X_{пл_i} - A_j Y_{пл_i} + X;$$

$$Y_{пл_i} = Y_{пл_i} + A_j X_{пл_i} + Y;$$

$XL, YL$  — координаты центра объектива;

$X_{пш_i}, Y_{пш_i}$  — текущие координаты изображения ПШ в неподвижной системе;

$X_{пл_i}, Y_{пл_i}$  — текущие координаты модуля полупроводниковой пластины в неподвижной системе;  $M, A, X, Y$  — неизвестные параметры, которые нужно определить.

Находим производные по неизвестным параметрам и приравняем их нулю.

$$dF(M, A, X, Y)/dM = 0;$$

$$dF(M, A, X, Y)/dA = 0;$$

$$dF(M, A, X, Y)/d\Delta X = 0;$$

$$dF(M, A, X, Y)/d\Delta Y = 0.$$

Из полученных четырех уравнений находим масштаб  $M$ , разворот  $A$  и смещения по  $X$  и  $Y$  для каждого модуля. При исправлении разворота  $A$  и смещения по  $X$  и  $Y$  с помощью координатного стола изображение ПШ наилучшим образом совместится с топологией модуля полупроводниковой пластины. Если же в процессе экспонирования необходимо изменить масштаб  $M$ , то выполняется перемещение компонент объектива и шаблона, координаты знаков шаблона повторно измеряются, и процесс расчета повторяется.

5. Экспонирование каждого модуля после помещения его в положение с координатами, определенными в результате вычислений.

Рассмотрим далее причины, влияющие на точность процессов фотолитографии.

#### **Основные причины, влияющие на погрешности размера элемента и точность совмещения**

Погрешность размера элемента и положение его краев обусловлены следующими причинами:

- погрешностью размеров элементов на промежуточном фотошаблоне (ПШ), деленной на масштаб уменьшения;
- погрешностью формирования элемента в слое фоторезиста из-за эффектов дифракции и близкого действия;
- дефокусировкой;
- неравномерностью дозы;
- разнотолщинностью фоторезиста;
- погрешностью проявления;
- погрешностью травления.

Погрешность зазоров между элементами из-за смещения центров элементов в сопряженных слоях зависят от следующих причин:

- погрешности совмещаемости ПШ;
- температурной погрешности из-за нагрева ПШ;
- погрешности, вызванной различием деформации ПШ из-за отличий крепления его на генераторе и мультипликаторе;

(Замечание. Влияние этих погрешностей уменьшается с увеличением масштаба проекционной системы.)

- абберрации оптики;
  - изменения температуры подложки;
  - погрешности совмещения и мультипликации.
- Погрешности совмещения и мультипликации, в свою очередь, зависят от ряда причин, их основные составляющие будут:
- погрешность системы считывания координаты знака совмещения:
    - случайная составляющая считывания знака датчиком PGA;
    - дрейф осей знаков совмещения в технологии;
  - погрешность измерения координаты положения стола пластин интерферометрами:
    - из-за турбулентности при движении стола;
    - из-за изменения оптических параметров воздушного столба;
    - из-за нарушения принципа Аббе;
    - из-за неплоскостности зеркал при движении по Z при фокусировке;
    - из-за неисправленной неортогональности зеркал интерферометра;
    - из-за погрешности обработки координаты приводами x, y, φ стола;
  - погрешность определения положения датчика PGA с помощью датчика САИ.

Ввиду случайного характера всех этих погрешностей общая погрешность определяется как среднеквадратичная сумма всех погрешностей. Перечисленные выше погрешности не исчерпывают

всех погрешностей, влияющих на точность совмещения.

Выход годных приборов зависит от погрешности совмещения слоев и воспроизводимости размеров элементов. Эта зависимость из-за случайного характера погрешностей может быть определена с заданной вероятностью; она различна для цифровых и линейных ИС. Опыт промышленного производства цифровых ИС с высоким выходом годных позволяет определить допустимую предельную погрешность размера минимального элемента ( $3\sigma$ ) — не более 0,1 его номинального размера, а предельную погрешность смещения центра элемента (узла геометрической сетки) *overlay* ( $3\sigma$ ) — не более 0,30 топологической нормы CD. Для линейных схем требования точности более жесткие. На основании указанных выше значений погрешностей CD и *overlay* можно составить бюджет погрешностей фотолитографического процесса и параметров точности фотолитографического оборудования, обеспечивающего процесс формирования топологии ИС. К такому оборудованию относятся: генераторы изображений, изготавливающие фотошаблоны; установки контактной и зазорной печати; мультипликаторы, переносящие изображения фотошаблона на полупроводниковую пластину, а также установки для измерения размеров элементов на фотошаблонах и полупроводниковых пластинах; координатно-измерительные машины для измерения совмещаемости комплекта ПШ и совмещаемости слоев на пластине. Для контрольно-

Погрешности фотолитографии, фотолитографического и измерительного оборудования при изготовлении цифровых ИС

Год освоения		1995	1998	1999	2001	2004	2007	2009	2013
Размер элемента ДЗУПВ (DRAM) (топологическая норма), нм		500	350	250	180	90	65	50	32
Размер элемента микропроцессора MPU, нм		600	400	300	200	107	76	60	38
Допустимая погрешность положения элементов ( <i>overlay</i> ), нм		170	110	80	60	32	23	19	13
Погрешность совмещения мультипликатора ( <i>stepper</i> ), нм		110	70	50	45	22	16	13	10
Погрешность координатной системы, нм		20	18	10	9	5	4	3	2
Погрешность совмещаемости комплекта ПШ, max, нм	M1:1	25	18	13	9	5	4	2,5	1,5
	M1:4	100	70	50	36	18	13	10	6
	M1:5	125	100	60	40	22	15	12	8
Температурная погрешность из-за нагрева ПШ, нм	M1:1	20	14	10	8	4	3	2	1
	M1:4	80	35	25	18	9	7	5	3
	M1:5	60	40	30	22	12	9	6	4
Погрешность из-за деформаций ПШ при различных креплениях на генераторе и мультипликаторе, нм	M1:1	30	18	15	10	7	5	3	2
	M1:4	40	22	18	12	10	7	5	3
	M1:5	50	35	25	18	10	7	5	3
Погрешность из-за абберраций оптики — дисторсия и др., нм		0,2	0,12	0,08	0,06	0,03	0,023	0,018	0,01
Допустимое изменение температуры подложки Si, °C		0,5	0,3	0,27	0,23	0,1	—	—	—
Неплоскостность подложки в пределах модуля 1/3 DOF, мкм		360	360	360	350	340	600	350	—
Площадь модуля ДЗУ ПВ, мм <sup>2</sup>		400	400	350	350	280	280	280	280
Площадь модуля микропроцессора MPU, мм <sup>2</sup>		20 × 20	20 × 20	18 × 18	18 × 18	17 × 17	17 × 17	17 × 17	17 × 17
Размеры модуля микропроцессора MPU, мм		700	700	700	700	700	700	700	700
Площадь модуля заказного процессора ASIC, мм <sup>2</sup>		26 × 26	26 × 26	26 × 26	26 × 26	26 × 26	26 × 26	26 × 26	26 × 26
Размеры заказного процессора ASIC, мм		50	35	25	18	9	6,5	5	3
Допустимая погрешность размера элемента CD, нм		15	12	8	6	3	2,5	1,8	1
Допустимая погрешность при измерении размера элемента, нм		8	6	4	3	2	1,5	0,8	0,5
Допустимая погрешность контроля совмещаемости комплекта ПШ, нм	M1:1	32	18	15	12	8	6	3	1,5
	M1:4	40	30	20	15	10	7,5	4	2,5
	M1:5	26	26	26	26	26	26	26	26
Максимально измеряемый размер на ПШ, мм	M1:1	100	100	100	100	100	100	100	100
	M1:4	130	130	130	130	130	130	130	130
	M1:5	56	36	26	20	11	8	6	4
Допустимая погрешность прибора для измерения, <i>overlay</i> , нм		56	36	26	20	11	8	6	4

измерительного оборудования согласно требованиям метрологии погрешность измерения должна быть не более 0,3 измеряемого размера.

Параметры точности оборудования для производства ДЗПВ и микропроцессоров с топологической нормой 0,5 мкм и менее представлены в таблице, составленной на основании публикаций ITRS.

### Заключение

Переход микросистемных технологий к элементам нанометровых размеров зависит не столько от разрешающей способности оптических или других систем, сколько от точности совмещения структур,

состоящих из миллионов и миллиардов элементов в одном приборе. Эта точность определяется точностью работы координатных систем с интерферометрами и точностью измерения положения знаков совмещения на пластине устройствами совмещения.

### Список литературы

1. **Валиев А.** Микроэлектроника: достижения и пути развития. М.: Наука, 1986.
2. **Wittekoek S.** Recent Developments in Deep Wafer Stepper Technology Semiconductor Fabtech. 1994. P. 151.
3. **ITRS 2004 Update Lithography.**
4. **Penn M.** Semiconductor Market Opportunities // Semi Market Conference Cis 2005, Moscow. 2005.

## СИСТЕМЫ-НА-КРИСТАЛЛЕ

УДК 537.226.4

**Е. А. Аржадеева, П. Д. Моисеев, В. Н. Малых,**  
ГУП Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт "Кварц"

### ПРОГРАММИРУЕМЫЙ ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ ФОРМИРОВАТЕЛЬ ИМПУЛЬСОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ ПО ТЕХНОЛОГИИ "СИСТЕМА-НА-КРИСТАЛЛЕ"

*Рассматриваются новые возможности для разработки аппаратуры, которые дает использование технологии "система-на-кристалле". Приведен маршрут технологии проектирования для программного СФ-блока (IP-core) формирователя импульсов, сравниваются возможности для подтверждения параметров ядра при реализации его в виде перепрограммируемой логической интегральной схемы (ППЛИС) и в виде заказной схемы. Представлены примеры его реализации на основе библиотечных макросов Field Programmable Gate Array (FPGA) Spartan-3 с использованием графического интерфейса ISE 7.1i и поведенческой модели на языке описания аппаратуры Verilog. Приведен пример реализации аппаратуры — генератора импульсов. Обоснованы достигнутые характеристики и погрешность. Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты: разработана поведенческая модель формирователя импульсов, реализован программный СФ-блок, подтверждены функциональные и временные параметры СФ-блока в кремнии и в составе аппаратуры.*

### Введение

Формирователь импульсов (далее формирователь) предназначен для использования в генераторах

импульсов, широтно-импульсных модуляторах, схемах формирования задержек, устройствах временной дискретизации, а также в устройствах проверки волоконно-оптических линий (в качестве задающего генератора).

Временные интервалы формируются методом последовательного счета. Согласно данному методу в устройстве генерируется последовательность импульсов определенного периода (опорный генератор). Стабильность частоты следования импульсов определяется параметрами внешнего источника сигнала, а максимальное быстродействие — уровнем технологии, используемой сверхбольшой интегральной схемы (СБИС).

Последовательность импульсов с опорного генератора поступает на схему временных селекторов, состоящих из счетчиков и регистров. В зависимости от предварительно установленных значений длительности и задержек, селекторы формируют импульсы, соответствующие заданным временным интервалам.

Формирователь может работать как в режиме непрерывной генерации, так и в режиме внешнего запуска.

Временная диаграмма формирования импульса при внешнем запуске изображена на рис. 1, где  $\tau_0$  — длительность импульсов опорного генератора;  $\tau_{\text{зап}}$  — длительность импульса запуска;  $\tau_{\text{имп}}$  — длительность сформированного импульса (длительность синхроимпульса или длительность задержки между синхроимпульсом и выходным импульсом).

Относительная погрешность установки длительности импульсов определяется следующей формулой:

$$\delta_{0 \text{ имп}} = \pm \delta_0 \pm 1/N,$$

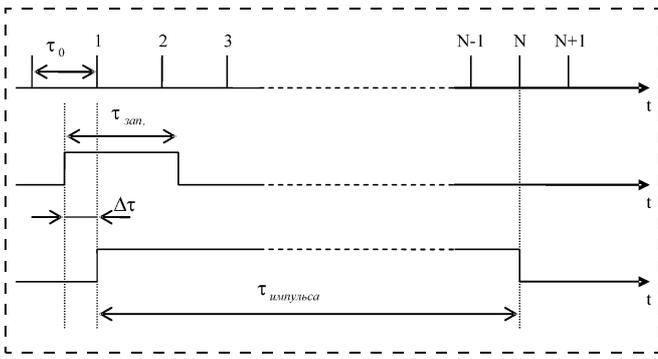


Рис. 1

где  $\delta_0$  — относительная погрешность периода квантовых импульсов;  $N$  — число импульсов квантования, определяющее длительность сформированного импульса.

Абсолютную погрешность можно выразить в следующем виде:

$$\Delta\delta_{0\text{имп}} = \pm\delta_0 N\tau_0 \pm \tau_0.$$

При достаточно малом значении  $\delta_0$  предельное значение абсолютной погрешности равно  $\pm\tau_0$ .

Для формируемого временного интервала (длительности импульса) можно записать

$$\tau_{\text{имп}} = N\tau_0 + \Delta\tau.$$

Приведенные выше формулы показывают, что для повышения точности формирования одного импульса необходимо уменьшать значения  $\delta_0$  и  $\tau_0$ . Уменьшения  $\delta_0$  можно добиться, используя высокостабильный опорный генератор. При современном уровне технологии можно получить значение  $\delta_0$ , равное  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  за месяц.

Значение  $\tau_0$  определяется технологическим уровнем изготовления СБИС формирователя, задающим быстродействие тактируемых схем. Достигнутое значение  $\tau_0$  равно 0,5...1 нс (2006 г.).

### Реализация формирователя импульсов на ППЛИС

На рис. 2 представлена функциональная схема формирователя импульсов, выполненная на основе библиотечных макросов *Field Programmable Gate Array* (FPGA) семейства Spartan-3 фирмы XILINX [1]. В схеме использованы специализированные устройства, входящие в библиотеку семейства,

в частности *Digital Clock Manager* (DCM) [2], позволяющий синтезировать частоты 100 и 200 МГц из входной частоты 50 МГц.

Схема работает следующим образом. С выхода кварцевого генератора сигнал с частотой 50 МГц (стабильность не менее  $10^{-8}$ ) поступает на вход DCM, на выходе которого синтезируются частоты  $F1 = 200$  МГц и  $F2 = 100$  МГц. Сигнал  $F2$  поступает на входы счетчиков формирования задержки, обеспечивая перестройку с шагом 10 нс. Сигнал  $F1$  поступает на вход делителя с коэффициентом деления  $2^{12}$ , который формирует частоту 1 Гц, необходимую для внутреннего запуска генератора импульсов.

Схема запуска обеспечивает начальную загрузку счетчиков формирования задержки, а также запуск их по фронту внешнего запускающего импульса или внутреннего сигнала, в зависимости от состояния входа управления  $U$ . Внутренний сигнал "Пуск" запускает счетчики, выходы которых поступают на один из входов компараторов, тогда как на втором задано число, определяющее время задержки в двоичном коде.

Формирователь выходных импульсов ( $m\_fim$ ) фиксирует суммарную задержку по всем каналам и передает сигналы на блок синхронизации ( $synx$ ), в котором устраняются набегающие задержки. Для синхронизации используется сигнал с частотой 200 МГц.

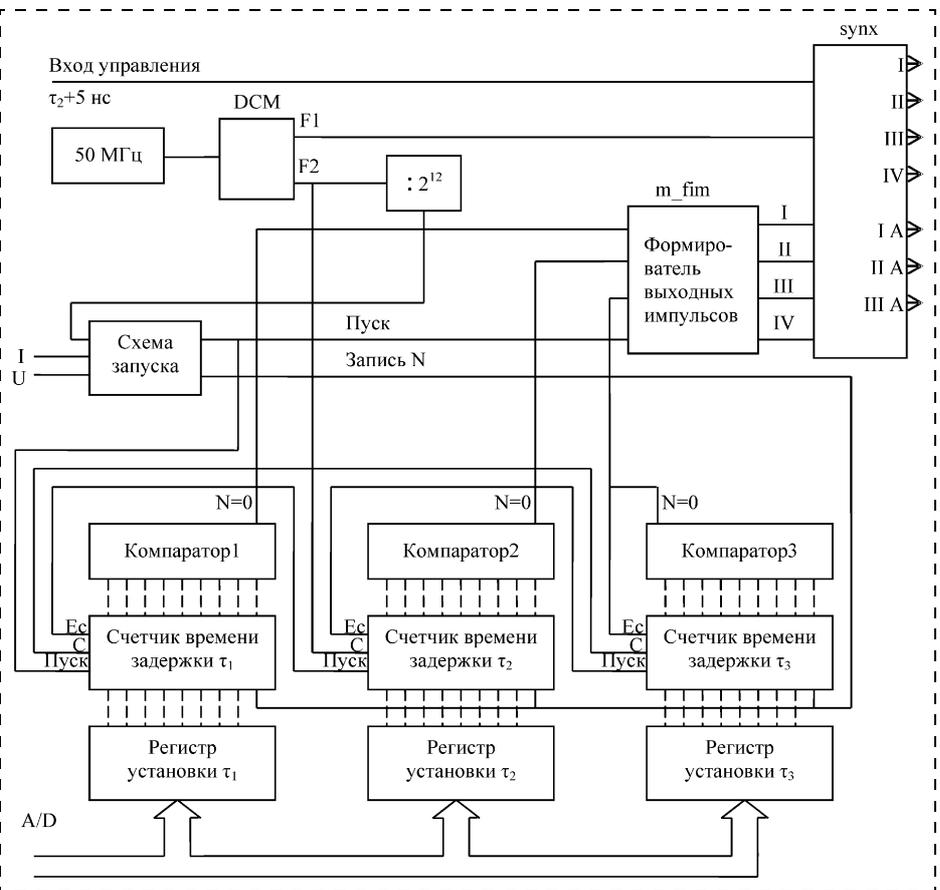


Рис. 2

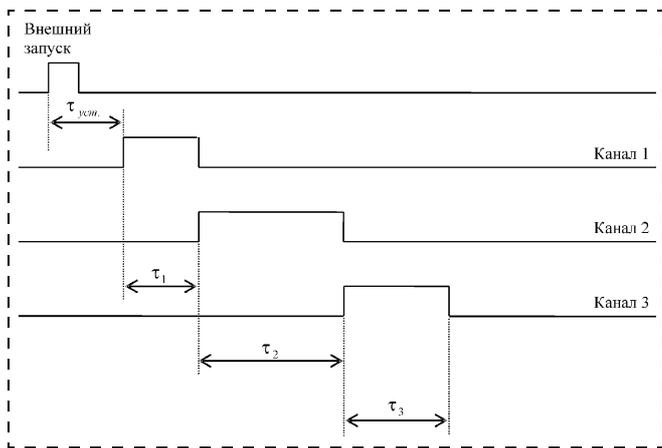


Рис. 3

Управление значением задержки по шине A/D может осуществляться как от кодового переключателя, так и с помощью микропроцессора. Диаграммы работы микросхемы представлены на рис. 3.

Микросхема размещена в 100-выводном пластмассовом корпусе типа VQ. Обозначение выводов и функциональное назначение приведено на рис. 4, где  $I$  — вход внешнего запуска;  $U$  — вход управления запуском (внешний/внутренний);  $av(7:0)$  — входы управления задержкой  $\tau_1$ ;  $vb(7:0)$ ,  $vc(7:0)$ ,  $vd(7:0)$  — входы управления задержкой  $\tau_2$ ;  $ev(7:0)$  — входы управления задержкой  $\tau_3$ ;  $m50$  — вход (тактовая частота 50 МГц);  $sbros$  — системный сброс;  $kg1$  — контрольный выход (частота 1 кГц);  $jop$  — контрольный выход (готовность DCM);  $t1\_v1$ ,  $t1\_v2$  — выходы первого канала;  $t3\_v1$ ,  $t3\_v2$  — выходы второго канала;  $t5\_v1$ ,  $t5\_v2$  — выходы третьего канала;  $t7\_v1$ ,  $t7\_v2$  — выходы четвертого канала.

Разработка микросхемы проводилась с использованием САПР ISE 7.1i и ModelSim XE III 6.0a. Отладка модели на функциональном уровне была проведена с использованием стандартных библиотечных макросов, имеющих в библиотеке САПР.

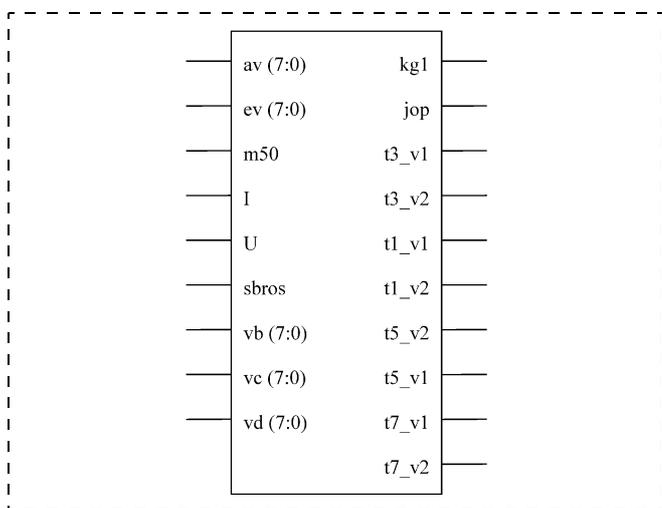


Рис. 4

Недостатком данного метода является неполное использование ресурсов кристалла и интеллектуальных возможностей, заложенных как в ППЛИС, так и в САПР. Например, использование метода оптимизации с целью достижения максимального быстродействия приводит к одной предельной частоте, тогда как минимизация площади — к другой. Использование различных настроек САПР дает аналогичные результаты. Интерактивный режим работы при размещении или трассировке приводит к неоправданно большим затратам рабочего времени, не соответствующим полученным результатам. Поэтому был опробован маршрут, при котором ППЛИС использовалась только для апробирования поведенческой модели устройства, разработанной с использованием языка описания аппаратуры Verilog. Для понимания формирования поведенческой модели приведены основополагающие моменты позиционной системы счисления.

### Поведенческая модель

Традиционная десятичная система счисления, которой мы пользуемся, является позиционной [3]. В такой системе число представляется строкой цифр — разрядов, в которой каждому разряду приписан определенный вес. Вес — это степень основания системы, соответствующая положению цифры в строке. В произвольной позиционной числовой системе основанием может быть любое целое число  $r \geq 2$ , и тогда  $i$ -й разряд имеет вес  $r^i$ . Общая форма числа в такой системе имеет вид  $d_{p-1} \dots d_0 d_{-1} \dots d_{-n}$ , где  $p$  цифр находятся слева, а  $n$  цифр — справа от точки, отделяющей целую часть числа от дробной.

Значение числа равно сумме значений отдельных разрядов, умноженных на соответствующие степени основания [4]:

$$D = \sum_{i=-n}^{p-1} d_i r^i,$$

где  $D$  — значение числа;  $n$  — количество дробных разрядов;  $p$  — количество целых разрядов;  $d_i$  — разряд;  $r^i$  — вес разряда.

Так как длительность импульсов на выходе складывается из целого числа тактов периодического входного сигнала, то данное выражение можно представить в виде

$$D = \sum_{i=0}^{p-1} d_i r^i.$$

Длительность каждого импульса, получаемого на выходе формирователя, задается 32-разрядным регистром, загрузка в который происходит побайтно. Таким образом, в общем случае длительность одного импульса

$$\tau_{\text{имп}} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=0}^{p-1} d_i r^i.$$

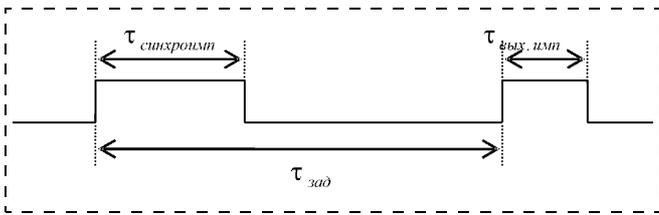


Рис. 5

С учетом того, что регистр 32-разрядный, и длительность импульса хранится в нем в двоичной системе счисления

$$\tau_{\text{имп}} = \sum_{j=1}^4 \sum_{i=0}^7 d_i 2^i.$$

Таким образом, длительность импульсов на выходе устройства описывается формулой

$$\begin{aligned} \tau_{\text{вых}} &= \tau_{\text{вых.имп}} + (\tau_{\text{зад}} - \tau_{\text{синхроимп}}) + \tau_{\text{синхроимп}} = \\ &= \tau_0 \left( \sum_{j=1}^4 \sum_{i=0}^7 (a_i 2^i) + \left( \sum_{j=1}^4 \sum_{i=0}^7 (b_j 2^j) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \sum_{j=1}^4 \sum_{i=0}^7 (c_j 2^j) \right) + \sum_{j=1}^4 \sum_{i=0}^7 (c_j 2^j) \right), \end{aligned}$$

где  $\tau_{\text{вых.имп}}$  — длительность выходного импульса;  $\tau_{\text{зад}}$  — задержка выходного импульса;  $\tau_{\text{синхроимп}}$  — длительность импульса синхронизации;  $\tau_0$  — длительность периода импульсов опорного генератора;  $N$  — номер байта [1:4];  $W$  — разрядность байта [0:7];  $a_j$  — разряд в байте, определяющем длительность выходного импульса;  $b_j$  — разряд в байте, определяющем длительность задержки выходного импульса;  $c_j$  — разряд в байте, определяющем длительность импульса синхронизации.

Форма сигналов, полученных на выходе формирователя, изображена на рис. 5.

### Реализация в виде заказной интегральной схемы (ASIC)

Описание поведения схемы было синтезировано с использованием САПР ISE 7.1i. В результате схема, восстановленная из RTL описания, имеет вид, представленный на рис. 6.

Схема работает следующим образом. На мультиплексированной восьмиразрядной шине адреса/данных выставляется адрес регистра, в который записывается двоичный код, определяющий длительность им-

пульса. Выборка адреса или данных проводится по значению сигнала "адрес/данные" (0 — передача адреса, 1 — передача данных).

Информация с шины адреса/данных переписывается в выбранный регистр и меняется уровень сигнала на входе, определяющем передачу адреса/данных. При следующем цикле в выбранный регистр переписываются данные. Эта операция продолжается до тех пор, пока во все восьмиразрядные регистры не будет записана необходимая для работы формирователя информация.

Всего используется шестнадцать 8-разрядных регистров, каждые четыре из которых образуют один 32-разрядный регистр, определяющий длительность импульса или длительность задержки между импульсами. Структура этих регистров показана на рис. 7.

Выбор одного из четырех регистров для записи параметров длительности импульсов и времени задержек между ними проводится по шине "адрес/данные" и записывается по сигналу записи.

По сигналу "смена программы" выполняется одновременная перепись конфигурационной информации в исполнительные регистры формирователя.

Переключение между режимами внешнего запуска и автоматической генерации происходит при изменении уровня на входе "Режим".

Для формирования сигналов на выходе микросхемы в режиме внешнего запуска на вход устройства подается запускающий импульс. По его фронту начинается генерация импульсов на выходе формирователя и происходит запуск счетчика 1.

В момент запуска значение на выходе счетчика 1 равно нулю. По каждому фронту эталонной частоты

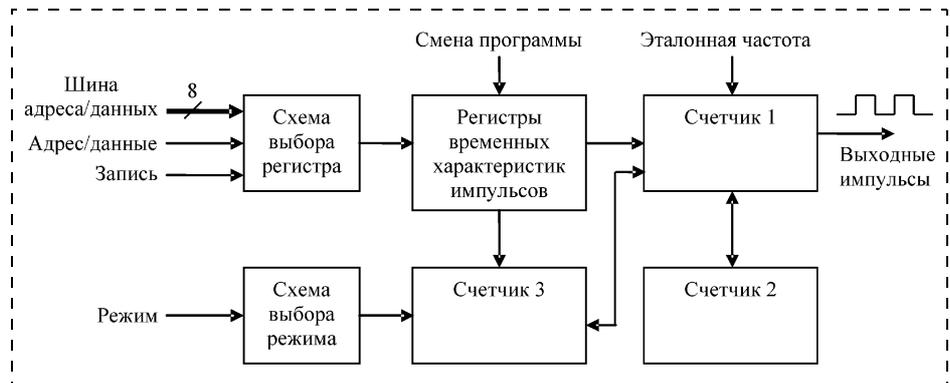


Рис. 6

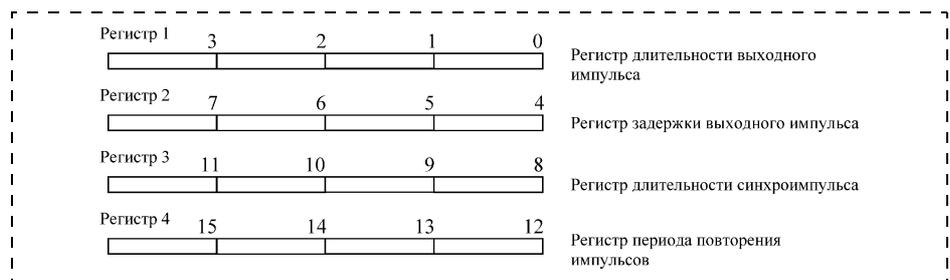


Рис. 7

ты его значение увеличивается на единицу до тех пор, пока не станет на единицу меньше, чем заданное во втором 32-разрядном регистре значение. По достижению этого значения происходит формирование импульса, длительность которого определена в третьем 32-разрядном регистре, и по его окончании — задержка выходного импульса, определяемая как разность значений, записанных во втором и третьем регистрах. Счетчик сбрасывается, и счет начинается заново для второго (выходного) импульса, длительность которого задана в первом 32-разрядном регистре.

Значение на выходе счетчика 2 определяет, какой из импульсов формируется в данный момент. После окончания формирования выходного импульса счетчик возвращается в исходное состояние. Счетчик 2 определяет число импульсов, выдаваемых формирователем, и может быть запрограммирован как в виде маски (при изготовлении СБИС), так и в виде дополнительного регистра — для динамической перестройки формирователя.

Работа в режиме автоматической генерации происходит аналогичным образом за исключением того, что последовательность импульсов на выходе формирователя возникает периодически, а запускающий импульс не используется.

Для обеспечения формирования очередной последовательности импульсов используется счетчик 3. Его запуск происходит при переключении формирователя в режим автоматической генерации. При достижении на выходе счетчика значения, равного заданной в четвертом 32-разрядном регистре длительности интервала между парами импульсов, вырабатывается сигнал разрешения генерации очередной пары импульсов, и счетчик возвращается в исходное состояние.

Маршрут разработки формирователя, вследствие многочисленных приложений изделия, был реализован по технологии "система-на-кристалле", в котором формирователь проектировался как СФ-блок (*IP-core*). На первом этапе была разработана поведенческая модель формирователя с использованием языков описания аппаратуры, в частности *Verilog*. По результатам синтеза, проведенного с использованием синтезатора *LeonardoSpectrum*, определены степень интеграции и структурный состав микросхемы.

Для проверки функционирования формирователя разработан тест и проведено моделирование схемы с использованием *Model Sim*. Отладка СФ-блока в виде твердой копии проводилась с использованием отладочного стенда фирмы *Xilinx* для семейства *Spartan 3*.

Разработка СБИС в виде ASIC проводилась в среде САПР фирмы *Cadence*. Синтез схемы выполнялся с использованием синтезатора *Build Gates*. Для моделирования применялась программа *NCLaunch*. При проектировании топологии микросхемы были

выбраны библиотеки завода XFAB. Моделирование после разработки топологии с проектными нормами 0,6 мкм показало максимальную частоту работы формирователя 100 МГц, с нормами 0,35 мкм — 200 МГц. Микросхема размещена в металлокерамическом корпусе 4226.108-2.

Преимуществом данного способа является полное использование ресурсов кремния и САПР, степень интеграции уменьшилась в 3 раза, но очевидно и то, что различные синтезаторы имеют неодинаковый уровень качества синтеза, это выражается в скоростных характеристиках микросхемы.

### Использование в приборах

Данная схема в виде ППЛИС и ASIC использовалась в одном из своих многочисленных приложений в качестве ядра перестраиваемого генератора оптических импульсов, предназначенного для поверки и аттестации оптических рефлектометров, в составе автоматизированных рабочих мест (АРМ). Характеристики и описание работы приведены ниже.

Ядро представляет собой первичный трехканальный импульсный генератор с регулируемыми длительностями импульсов и задержками между ними и имеет амплитуду выходных импульсов не менее 3,3 В на нагрузке 50 Ом для обеспечения необходимых характеристик сопряжения с драйверами полупроводниковых лазеров с двойной гетероструктурой на основе соединения *InGaAsP*.

Длительность выходных импульсов прибора меняется в пределах 0,1...50 нс. Максимальная задержка между импульсами составляет 5 нс. Дискретность установки выходных параметров периодических сигналов генератора — 10 нс.

Встроенный тактовый генератор обеспечивает частоту следования выходных импульсов, равную 1 Гц. Возможно использование внешнего тактового генератора, частота следования импульсов которого не должна превышать значение, определяемое формулой

$$F \leq 1/(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) + 10 \text{ нс.}$$

Амплитуда импульсов от внешнего генератора — не более 3,3 В. Длительность не нормируется. Запуск осуществляется положительным фронтом входного импульса.

Управление преобразователем осуществляется с помощью встроенного микроконтроллера *XS164*, который обеспечивает установку необходимых временных параметров генератора и режимов его работы, а также поддерживает непрерывный режим диагностики.

Значения устанавливаемых параметров задаются пользователем через последовательный интерфейс RS232 или КОП (ГОСТ 26.003—80).

## Выводы

Методы разработки аппаратуры с использованием технологии "система-на-кристалле" дают возможность разработчику проектировать прибор, не заботясь о выборе элементной базы. Поведенческая модель позволяет определить и скорректировать функционирование прибора, модель в твердой копии ППЛИС — провести анализ функционирования и исследование различных режимов, не заботясь о предельных параметрах, и только на этапе разработки ASIC закладывается необходимый уровень параметров элементной базы. Сформированная системная функциональность при

проектировании приборов позволяет вести разработку СФ-блоков (*IP-core*) и формировать параметризованную библиотеку с целью их дальнейшего использования.

## Список литературы

1. Xilinx Inc. Spartan 3 Platform FPGA Handbook. Advance Product Specification. July 11, 2003.
2. Кузелин М. О., Кнышев Д. А., Зотов В. Ю. Современные семейства ПЛИС фирмы Xilinx. М.: Горячая линия — Телеком, 2004. 440 с.
3. Уэйкерли Дж. Ф. Проектирование цифровых устройств. Т. 1, 2. М.: Постмаркет, 2002. 544 с.
4. Савельев А. Я. Прикладная теория цифровых автоматов. М.: Высшая школа, 1987. 272 с.

# ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

УДК 621.395.632.223

Э. Г. Косцов, д-р физ.-мат. наук,  
В. Ф. Камышлов,  
Институт автоматизации и электротехники СО РАН,  
г. Новосибирск  
e-mail: kostsov@iae.nsk.su

## МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ МИКРОКЛАПАНЫ

*Рассматривается принцип работы микроэлектромеханического микроклапана, основанного на использовании эффекта электростатического наката металлических пленок на поверхность сегнетоэлектрика. Такие микроклапаны, создаваемые с помощью микроэлектронной технологии, отличаются высоким быстродействием (микросекундный диапазон), способностью поддерживать высокий перепад давлений, технологичностью. Приводятся теоретические и экспериментальные данные, характеризующие процесс работы микроклапана.*

Диапазон возможных применений микроэлектромеханических устройств, создаваемых с помощью технологии микроэлектроники, достаточно широк: точная микромеханика, шаговые микро- и нанопозиционеры, микрооптика, микросканеры, акселерометры, системы отображения информации, контроля и диагностики, индикаторы, сенсоры, устройства памяти, автомобильная и химическая промышленность, космическая техника, и т. п. Базовым элементом большинства микроэлектромеханических устройств является микродвигатель (микроактюатор). В настоящее время наиболее распространенные микроактюаторы основаны на емкостных принципах преобразования энергии, они являются электростатическими, с воздушным рабочим зазором, имеющим протяженность в пределах 2 мкм, изготовленным методами технологии глубокого травления кремния. Удельная емкость  $C_{уд}$  в таких устройствах не может пре-

вышать значения  $5...10$  пФ/мм<sup>2</sup> и даже при создании многоэлементной системы из 5—30 втягиваемых в соответствующее число зазоров электродов получение сил тяги более 10 мкН проблематично. При таких значениях сил трудно рассчитывать на создание быстродействующих высокоэффективных микромеханических устройств.

Ранее нами был разработан новый принцип электромеханического преобразования энергии, основанный на эффекте обратимого электростатического наката тонких металлических пленок (металлических лепестков) на поверхность сегнетоэлектрических пленок (СП) [1—5]. Рис. 1 иллюстрирует этот принцип. Упругая металлическая пленка 4, закрепленная в точке А на поверхности подвижной пластины (ПП), при подаче импульса напряжения между ней и нижним электродом 5 под действием сил электростатики прижимается к поверхности сегнетоэлектрика 3 и натягивается с силой  $F_p$ , при этом возникают две силы  $F_1$  и  $F_2$  — тангенциальная и нормальная к поверхности. Первая из них и определяет движение ПП по направляющим 2 за счет последующего наката все большей части поверхности лепестка на поверхность сегнетоэлектрика, его изгиба и механического натяжения. Так происходит электромеханическое преобразование энергии. Длина наката  $L(t)$  во время действия импульса напряжения  $t_{имп}$  возрастает, соответственно увеличивается и шаг смещения ПП, при этом все большая часть площади лепестка прижимается к поверхности сегнетоэлектрика.

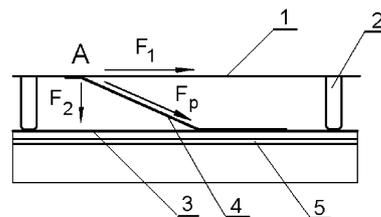


Рис. 1. Принцип электромеханического преобразования энергии при электростатическом накате металлической пленки на поверхность сегнетоэлектрика

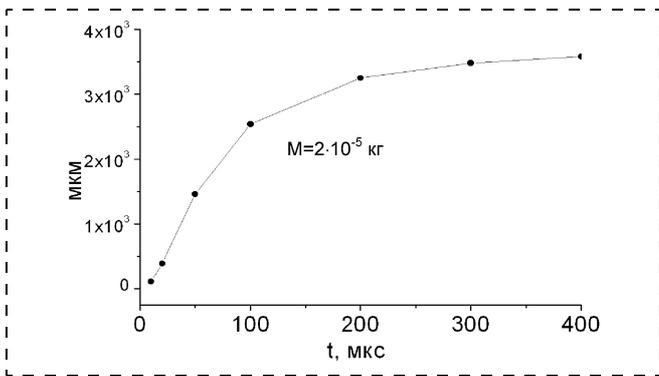


Рис. 2. Изменение длины электростатического наката металлической пленки во времени в момент действия импульса напряжения

С использованием указанного способа преобразования энергии возможно создание семейства микродвигателей, отличие которых от электростатических микродвигателей на основе линейных диэлектриков связано с большим значением диэлектрической постоянной  $\epsilon$  СП. Кроме того, в кристаллическом слое сегнетоэлектрика накапливается значительно меньший электростатический заряд, что также предопределяет достижение микродвигателем большой мощности, допускает его работу до тактовых частот 20 кГц и более. Высокое значение  $C_{уд}$  структур металл — СП — лепесток, до 300...1000 пФ/мм<sup>2</sup>, дает возможность "накачки" в образец исключительно большой удельной энергии  $A_R$  — до 0,3...3 Дж/м<sup>2</sup> и более.

Большие силы притяжения двух поверхностей определяют высокую скорость наката металлической пленки на поверхность сегнетоэлектрика. На рис. 2 представлено увеличение длины электростатического наката во времени при нагрузке массой  $M = 2 \cdot 10^{-6}$  кг. Как видно, за 50...100 мкс длина наката может достигать значений 1...2 мм.

Экспериментальные образцы микродвигателей, описанные в работах [1—5], состояли из двух подложек с регулируемым зазором между ними в 50...200 мкм. На поверхность неподвижной пластины, статора, методом ВЧ-напыления наносились электрод ИТО и далее сегнетоэлектрическая пленка  $Ba_{0.5}Sr_{0.5}Nb_2O_6$  (ниобат бария-стронция — НБС, с  $\epsilon = 3000...4000$ ). Толщина пленок НБС  $d_{СП} = 1...4$  мкм, они текстурированы, с ориентацией кристаллической оси  $C$  нормально к плоскости подложки.

На поверхности ПП методами вакуумного напыления, фотолитографии и травления буферного подслоя формировалась закрепленная на одном конце свободная металлическая пленка — лепесток с длиной  $l = 1...3$  мм, шириной  $b = 200...500$  мкм и толщиной  $d_p = 1...2$  мкм, изготовленная из бериллиевой бронзы (2% бериллия). Обратимый характер электростатического наката лепестка дает возможность многократного осуществления этого процесса и перемещения ПП на большие расстояния, — в реальном эксперименте до 8...10 см. Тактовая частота воздействия импульсов напряжения, обеспечивающих движение ПП, полученная в реальных экспериментах 1...20 кГц.

Сопоставление значений удельной емкости структур М—СП—М и структур М—СП—подвижный электрод (лепесток) дает возможность оценить, исходя из выражения  $C = C_{МСПМ} C_z / (C_{МСПМ} + C_z)$ , значение емкости воздушного зазора металл — сегнетоэлектрик  $C_z$ , толщину этого зазора  $d_z$ , и ее зависимость от напряжения  $V$ . Ти-

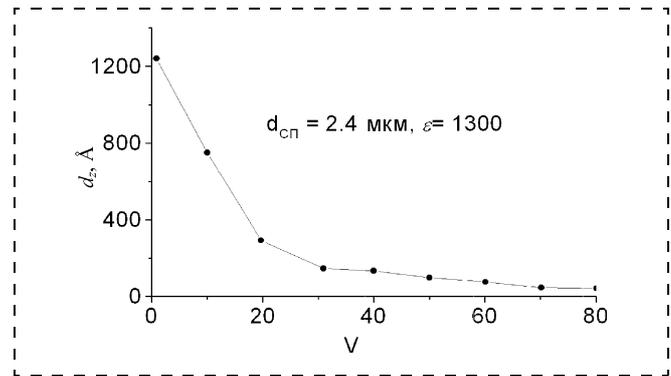


Рис. 3. Изменение толщины воздушного зазора между поверхностями сегнетоэлектрика и металлической пленки с увеличением амплитуды напряжения

пичный пример такой экспериментальной зависимости для одного из конкретных образцов М—СП—лепесток представлен на рис. 3. Как видно, при больших амплитудах  $V$  значение  $d_z$  может достигать 30...50 Å, в зависимости от качества поверхности СП и технологии ее изготовления. Такое значение  $d_z$  дает основание рассчитывать на получение высокой напряженности электрического поля в зазоре и соответственно больших сил притяжения двух поверхностей, не достижимых ни в каких других многослойных конструкциях.

Анализ распределения электростатической силы притяжения лепестка  $F$  к поверхности СП с изменением значения  $d_z$  ( $F = 0,5V^2(dC_z/dz)$ ) для заданных значений  $V$  и соотношения  $\epsilon/d_{СП}$  (рис. 4) показывает, что только при  $\epsilon/d_{СП}$  больше, чем  $3 \cdot 10^8$  ( $\epsilon > 500$ ), можно получить высокие значения этих сил.

Отметим, что при использовании линейных диэлектриков, например  $SiO_2$ , для получения эффекта нелинейного роста поля в воздушном зазоре, обеспечивающем соизмеримо высокую энергоемкость, соответствующую, например,  $\epsilon/d_{СП} = 10^9$ , нужно, чтобы толщина этого слоя была 40 Å, что для практических применений не реально. Поскольку ни один из линейных диэлектриков не обладает такими большими значениями  $\epsilon$ , то можно утверждать, что только сегнетоэлектрические материалы способны обеспечить указанные высокие силы притяжения двух поверхностей под действием электрического поля.

На основе указанного способа электромеханического преобразования энергии возможно построение не только силовых устройств, микродвигателей или микроак-

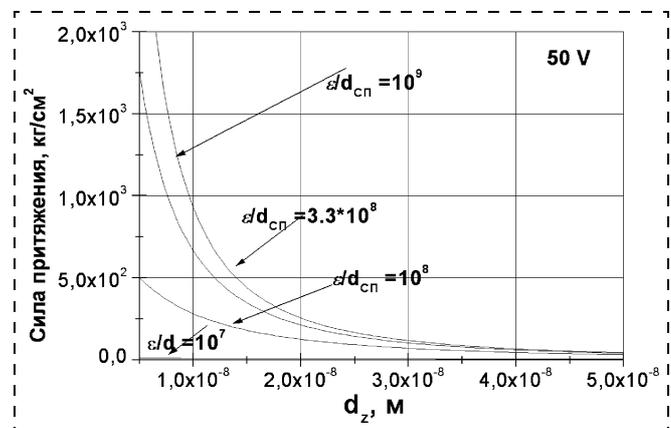


Рис. 4. Изменение давления в зазоре металл — сегнетоэлектрик по мере их сближения для разных значений  $\epsilon/d_{СП}$

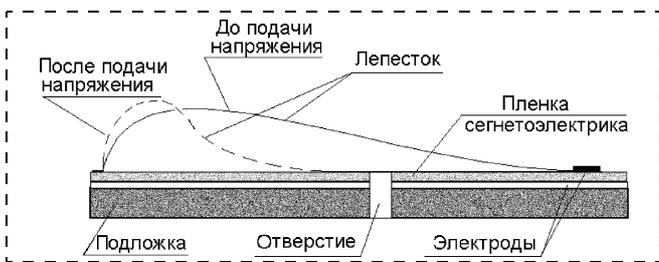


Рис. 5. Схема конструкции микроклапана

тюаторов, но и принципиально других микроэлектронных конструкций.

Одним из таких устройств является микроклапан, его принцип действия основан на перекрытии отверстия в пластине, на поверхности которой создана структура металл — сегнетоэлектрик, тонкой металлической пленкой, прижимающейся к поверхности сегнетоэлектрика силами электростатики при включении импульса напряжения. Схематично одна из возможных конструкций такого микроклапана представлена на рис. 5. Упругая металлическая пленка при воздействии импульса напряжения изменяет свою форму и прижимается к поверхности указанной пластины, перекрывая отверстие. Сила этого прижатия зависит от качества сегнетоэлектрической пленки, в первую очередь, от значения  $\epsilon$ , а также от площади металлической пленки и амплитуды импульса напряжения. Длительность процесса перекрытия отверстия может лежать в пределах 30...300 мкс в зависимости от значения  $V$ .

Фотография одного из микроклапанов представлена на рис. 6. Он имеет два состояния: "открыто" (рис. 6, а) и "закрыто" (рис. 6, б), и состоит из тонкой пленки бронзы, пластинки сапфира, на поверхность которой последовательно нанесены электрод из ИТО и пленка НБС, толщиной 3 мкм. Отверстие в сапфире и в структуре СП—М с диаметром 100 мкм создано с помощью импульсного твердотельного лазера. Толщина металлической пленки бронзы 1,5 мкм, площадь электростатического наката — 10...15 мм<sup>2</sup>. Как видно из рис. 6, б, в мо-

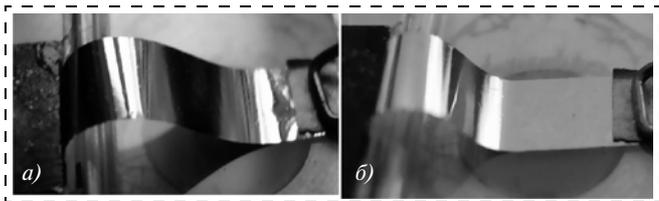


Рис. 6. Фотографии одного из микроклапанов

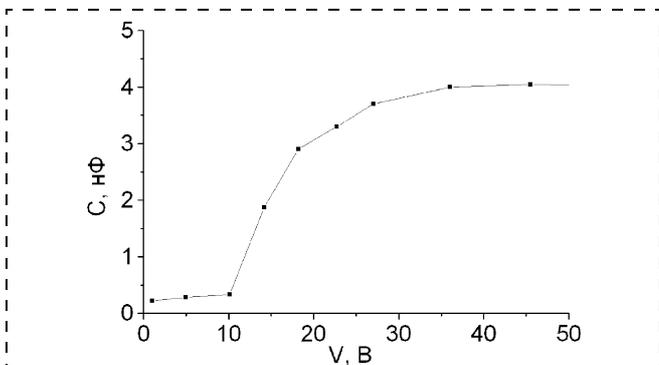


Рис. 7. Изменение емкости электростатического наката при закрытии отверстия микроклапана

мент наката сила прижатия металлической пленки к пластине настолько велика, что ее поверхность имеет однородный зеркальный блеск. Изменение значения емкости наката  $C$  данного образца микроклапана с увеличением прикладываемого к образцу напряжения представлено на рис. 7. Из этого графика, полагая, что отверстие находится на расстоянии 1 мм от точки начала наката, можно оценить силу, развиваемую при его закрытии. В частности, при  $V = 40$  В эта сила равна порядка  $10^{-2}$  Н. Тогда с учетом соотношения площадей электростатического наката и отверстия можно оценить давление, которое может "перекрыть" данный микроклапан, — оно должно лежать в пределах нескольких атмосфер.

Перевод клапана из состояния "закрыто" в состояние "открыто" осуществляется при выключении импульса напряжения, за время  $t_{\text{выкл}}$ . Значение  $t_{\text{выкл}}$  практически равно длительности спада этого импульса и может быть меньше, чем 1 мкс [6]. Столь короткое время определяется тем, что электростатический накат лепестка на микровыступы поверхности СП сопровождается обратимой локальной его деформацией. При снятии импульса напряжения накопленная упругая энергия высвобождается, что приводит к эффекту очень быстрого отрыва металлической пленки от поверхности СП. Этот эффект открывает возможность работы микроклапана на высоких тактовых частотах, свыше 1—10 кГц.

Высокие значения сил прижатия лепестка к поверхности сегнетоэлектрика, сил "электронного клея", и соответственно, высокие значения тангенциальных сил, способных сдвинуть лепесток относительно поверхности СП, дают основания рассчитывать на то, что микроклапан в состоянии "закрыто" способен выдержать больший, чем при процессе его закрытия, перепад давления. Как показали прямые экспериментальные исследования сдвига двух указанных поверхностей одной относительно другой, сила, способная осуществить этот сдвиг, зависит от энергоемкости наката, с коэффициентом пропорциональности —  $(3\div 5)10^5$  Н/Дж. При  $V = 40$  В эта сила достигает значений до 1—1,5 Н и тогда, с учетом соотношения площадей отверстия и электростатически прижатого лепестка, указанный перепад давления может составлять до 10 атм и выше.

Отметим, что описанный принцип создания микроклапана может быть использован и при создании аналогичных структур на подложке из кремния, а также на основе сегнетоэлектрической керамики, при этом большое соотношение площадей отверстия и электростатического наката не требует высокой точности в согласовании геометрических параметров компонентов микроклапана, даже при изготовлении матрицы микроклапанов.

#### Список литературы

1. Dyatlov V. L., Kostsov E. G. Electromechanical energy converters of micromechanic devices on the basis of ferroelectric films // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. A **405**. 1998. P. 511—513.
2. Kostsov E. G., Dyatlov V. L. Electrostatic Microactuators on the Basis of Ferroelectric Films // J. Korean Phys. Soc. **32**, (1998). S1755—S1756.
3. Dyatlov V. L., Kostsov E. G. Planar electrostatic micromotors on the basis of the ferroelectric films // Integrated Ferroelectrics. 1999. V. 23. P. 149—160.
4. Dyatlov V. L., Kostsov E. G., Baginsky I. L. High-effective electromechanical energy conversion on the basis of thin ferroelectric films // Ferroelectric. 2000. V. 241. P. 99—106.
5. Baginsky I. L., Kostsov E. G. High-energy capacitance electrostatic micromotors // J. Micromech. Microeng. 2003. V. 13. P. 190—200.
6. Косцов Э. Г., Багинский И. Л., Буханец Д. И., Кашеев Э. Л. Электростатический двигатель для быстродействующих микромеханических устройств // Микросистемная техника. 2004. № 4. С. 2—7.

**В. В. Лукьянов**, канд. техн. наук,  
НИИ информатики и систем управления МГТУ  
им. Н. Э. Баумана

## БЕСПЛАТФОРМЕННАЯ ИНТЕГРИРОВАННАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА НА БАЗЕ MEMS — ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Приводится обзор новых малогабаритных интегрированных навигационных систем на микроэлектромеханических чувствительных элементах, их характеристики и варианты применения. Системы разработаны сотрудниками МГТУ им. Н. Э. Баумана и по своим характеристикам не имеют аналогов на мировом рынке. В настоящее время налажено серийное производство таких систем.*

### Введение

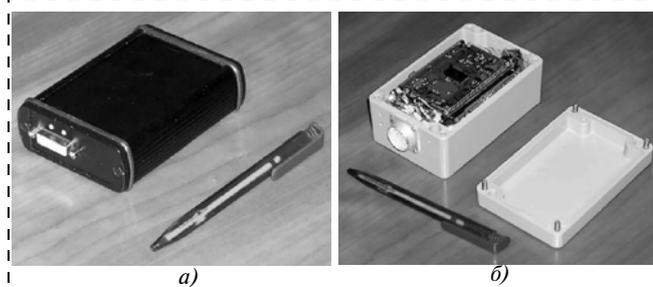
Сотрудниками НИИ ИСУ МГТУ им. Н. Э. Баумана разработана и производится линия малогабаритных интегрированных навигационных систем. Назначение систем: определение навигационных параметров подвижного объекта (координаты, скорость, углы ориентации, спутниковое время, ускорения, угловые скорости). Системы сочетают высокие точностные и функциональные характеристики с компактностью и невысокой стоимостью, что расширяет сферу их применения на области, ранее недоступные для инерциальных систем. На основе этих систем предлагаются законченные, готовые к внедрению решения задач навигации, определения ориентации и управления движением для подвижных объектов различных классов.

### 1. Технология

В качестве датчиков применяются миниатюрные инерциальные чувствительные элементы (гироскопы и акселерометры) низкой точности, выполненные по технологии микроэлектромеханических систем (MEMS), и высокочувствительный приемник спутниковой навигационной системы GPS/ГЛОНАСС. Системы полностью собираются из стандартных комплектующих: MEMS-датчиков, процессорного чипа и других электронных компонентов (в настоящее время — преимущественно производства *Analog Devices*). При изготовлении систем используются отлаженные технологии сборки электронных устройств с соответствующим мировым стандартам контролем качества.

Ключевым компонентом систем является оригинальное программное обеспечение (ПО) [1]. Адаптированное к задаче специальное ПО позволило получить характеристики системы не только лучшие в соотношениях цена/качество и габаритные размеры (масса)/качество в известных сферах применения, но и утверждать, что в настоящее время на мировом рынке интегрированных систем навигации не существует аналогов или близких по характеристикам продуктов (рис. 1).

**Ключевые свойства систем. Функциональные свойства.** Система определяет:



**Рис. 1. Интегрированная навигационная система:**  
а) легкий корпус; б) прочный корпус

- навигационные параметры — координаты местоположения и высоту объекта;
- параметры угловой ориентации — тангаж, крен, курс (рыскание);
- параметры пространственного движения — скорость, ускорения, угловые скорости, т. е. весь стандартный набор информации, необходимый для навигации, позиционирования и управления движением объекта.

#### *Потребительские свойства:*

- низкая стоимость;
- карманный размер;
- масса менее 0,3 кг (0,6 кг в прочном корпусе);
- сверхнизкое энергопотребление;
- стандартный выход цифровых данных.

*Технологические свойства.* Система построена на стандартных покупных электронных комплектующих, поставляемых ведущими зарубежными производителями. В производстве используются отлаженные технологии сборки и контроля качества электронных систем. Производство ведется на технологическом оборудовании фирмы "Филипс" в соответствии с требованиями международного стандарта ISO 9001.

Базовая конфигурация системы является полноценной и достаточной. Изменение функциональных свойств системы проводится производителем как путем изменения программного обеспечения, так и модульной заменой комплектующих (датчиков).

Система построена таким образом, что замена датчиков (даже частичная) на более точные без изменения базовой конфигурации позволяет получить улучшенные или новые функциональные характеристики. Таким образом, линия интегрированных систем может быть продолжена с минимальными затратами времени и ресурсов на разработку.

*Эксплуатационные свойства.* Системы полностью автономны и независимы от других систем объекта контроля. В том числе они могут использовать автономный источник питания. Поэтому интеграция систем в существующие комплексы бортового оборудования не требует изменения последних.

#### **Выходные данные**

Частота выдачи . . . . . 50 Гц  
Время выставки . . . . . < 30 с  
Протокол передачи . . . . . RS-232  
Формат . . . . . Бинарный

#### **Окружающая среда**

Рабочая температура . . . . . -40...+85 °С  
Температура хранения . . . . . -50...+85 °С  
Влажность . . . . . 5...98 %  
Атмосферное давление . . . . . 450...850 мм. рт. ст.

### Физические воздействия

Удар . . . . .	40 g (5 м/с)
Синусоидальная вибрация . . . . .	2 g (1...50 Гц)

### Электрические параметры

Напряжение питания . . . . .	10...30 В
Потребляемая мощность . . . . .	1,5 Вт

### Массогабаритные параметры

Размеры . . . . .	12,5 × 8,0 × 5,7 см
Масса . . . . .	< 0,6 кг

### Рабочие диапазоны

Крен . . . . .	± 180°
Тангаж . . . . .	± 90°
Курс . . . . .	± 180°
Ускорение . . . . .	± 10 g
Угловая скорость . . . . .	± 150 °С

Система имеет технические характеристики, приведенные в таблице.

### Технические характеристики

	ИНС/СНС интегрированный режим	Автономное инерциальное решение
<b>Координаты</b> (интегрированное решение)	6 м	500 м (5 мин после пропадания СНС)
Высота	2 м	6 м
Путевая скорость	0,2 м/с	5 м/с (5 мин после пропадания СНС)
Вертикальная скорость	0,25 м/с	0,3 м/с
<b>Углы ориентации</b>		
Прямолинейный полет	0,2...0,3	0,3...0,4 (неограниченное время)
Маневрирование	0,3...0,5	0,5...0,7 (неограниченное время)
Высокоманевренный полет	1,0°	1,5° (неограниченное время)
Разрешающая способность	0,05°	0,05°
Курс (путевой угол)		
Точность	0,4°	2,0°
Разрешающая способность	0,1°	0,1°

**Применение ИНС.** Сочетание функциональных и потребительских свойств интегрированных систем позволяет использовать их в следующих областях:

- в традиционных сферах применения, где в настоящее время используются дорогостоящие инерциальные системы (системы навигации, ориентации и управления летательными аппаратами);
- совместно с традиционными системами, дополняя их (GPS-навигация, навигация автомобиля);
- в новых областях (персональная навигация, промышленная автоматизация и инструменты).

Уникальность разработки состоит в том, что во всех применениях используется один и тот же блок чувствительных элементов, в вычислитель которого прошивается тот или иной алгоритм.

Есть только две задачи, которые принципиально не могут быть решены с помощью микромеханических БИНС: навигация тяжелых самолетов (с точностью счисления координат до 5 км в автономном режиме) и прицеливание (точность определения углов ориентации — несколько минут). Для решения этих задач предполагается создание системы средней точности.

## 2. Применение в области авиации

Ключевые свойства, обуславливающие спрос на системы в области авиации, следующие:

- интегрированная система является полным и самодостаточным устройством;
- системы просты в установке и не требуют обслуживания;
- малые габаритные размеры и энергопотребление делают системы пригодными практически для любых классов летательных аппаратов (ЛА);
- не существует отечественных и мировых аналогов в данном диапазоне цен.

**Малогоабаритная интегрированная навигационная система (МИНС) "КомпаНав-2"** является базовым продуктом в линии интегрированных систем для применения в области авиации [2].

Функциональные характеристики систем для воздушных судов (самолетов и вертолетов) включают в себя свойства 10 стандартных бортовых приборов: навигационной системы, курсового индикатора, индикаторов путевой и воздушной скорости, авиагоризонта, индикатора вертикальной скорости, индикаторов скорости разворота, высотомера, магнитного компаса, индикаторов перегрузки (рис. 2).

Фактически "КомпаНав-2" представляет собой полнофункциональную инерциальную навигационную систему (ИНС), интегрированную со спутниковой системой навигации — GPS. Установка таких систем в качестве бортового оборудования малоразмерных летательных аппаратов ранее была невозможна ввиду высокой цены и массогабаритных параметров. Появление "КомпаНав-2" обозначило прорыв в области пилотажно-навигационных средств, как для малой авиации, так и при переоснащении существующего парка самолетов и вертолетов современными электронно-компьютерными системами.

**Пилотажно-навигационное средство (ПНС)** разработано на базе малогабаритной инерциально-спутниковой навигационной системы "КомпаНав-2" и программного обеспечения с "образной индикацией". ПНС представляет собой комплекс аппаратных и программных средств, позволяющих пилоту в полете решать задачи навигации и управления летательным аппаратом с высокой точностью независимо от штатных приборов. Функциональные возможности и технические характеристики позволяют использовать ПНС в качестве автономного

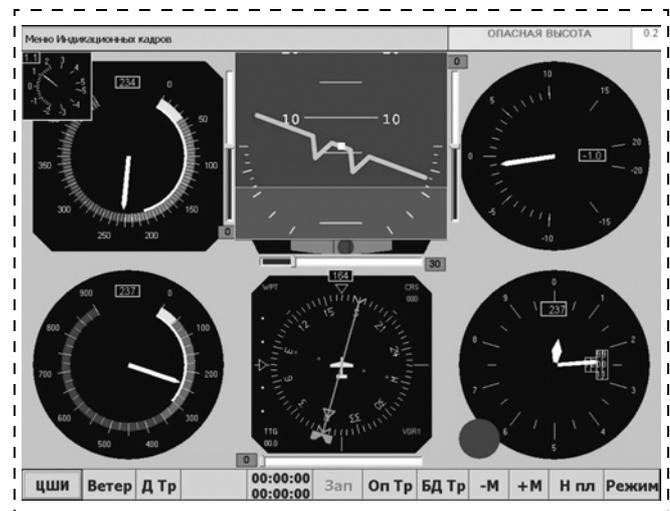


Рис. 2. Вариант пилотажного экрана

дублирующего средства на любых типах летательных аппаратов.

#### **Состав ПНС:**

- МИНС "КомпаНав-2";
- приемник СНС Garmin-35;
- переносной персональный компьютер Panasonic CF-18;
- накопитель летной информации;
- датчик воздушной скорости (дополнительно);
- программное обеспечение с "образной индикацией".

#### **Задачи, решаемые ПНС:**

- выполнение полетов в сложных метеоусловиях днем и ночью на предельно малых высотах при различных типах подстилающей поверхности;
- выполнение специальных заданий в сложных условиях базирования;
- анализ результатов выполнения полетных заданий;
- обучение и тренировки летного состава по видам летной подготовки, научно-исследовательские (испытательные) работы с летным экспериментом.

#### **Функциональность ПНС**

**Безопасность полета.** Представление пилотажно-навигационной информации в виде хорошо понятных летчику трехмерных и двумерных графических образов обеспечивает безопасность полета за счет:

- улучшения пространственной и навигационной ориентировки экипажа (особенно ночью и в сложных метеоусловиях);
- своевременного предупреждения экипажа о возможности столкновения с земной поверхностью и превышении эксплуатационных ограничений ЛА;
- подсказки летчику о значении требуемого отклонения органов управления для поддержания заданного режима полета.

**Планирование полета.** ПНС обеспечивает подготовку экипажа к выполнению полетного задания как заблаговременно (с использованием сертифицированных аэронавигационных баз данных и цифровых карт известных форматов), так и непосредственно перед полетом, позволяет создать электронные карты района на базе обычных навигационных карт для решения типовой задачи и запрограммировать траекторию полета (рис. 3, см. четвертую сторону обложки). Проверка правильности составления полетного задания обеспечивается путем имитации полета в ускоренном режиме времени (виртуальный полет).

**Анализ полета.** Информация, записанная на накопителе, позволяет неформально провести углубленный разбор полета и выявить тенденции совершения ошибочных действий.

**Подвижная карта и цифровой рельеф.** Навигационная информация, поступающая от ИНС и приемника СНС, отображается на подвижной карте, обеспечивая:

- точное пилотирование по заданной траектории, выполнение маршрутного полета с навигационной ориентировкой по электронной карте;
- заход на посадку по установленной схеме на аэродром и заданную площадку;
- полет на предельно малой высоте в равнинной и горной местности с огибанием рельефа и обходом препятствий по цифровой карте рельефа.

**Размещение ПНС на борту.** Установка ПНС (рис. 4) позволяет оснастить любой тип вертолета или самолета современной системой навигации и отображения полетной информации при минимальных затратах на модернизацию. Повышается безопасность полета, улуч-



Рис. 4. Размещение ПНС на борту вертолета Ми-8

шается точность пилотирования при снижении нагрузки на пилота.

**Комплекс управления беспилотным летательным аппаратом (БПЛА).** Это единый комплекс аппаратных и программных средств, предназначенный для управления БПЛА любого типа в автоматическом и ручном режимах. Система состоит из бортового сегмента и наземной станции управления, связанных посредством радиопередающего устройства.

**Бортовой сегмент.** Центральным элементом бортового оборудования является МИНС "КомпаНав-2". Использование МИНС обеспечивает исключительную точность и высокую динамичность управления в сочетании с высокой степенью устойчивости к пропаданию сигналов GPS и прерываниям канала связи.

В бортовой сегмент включаются:

- автопилот на базе системы "КомпаНав-2";
- GPS приемник;
- устройство записи полетных данных;
- радиомодем.

**Наземная станция.** В состав наземной станции входят:

- персональный компьютер с программным обеспечением "образной индикации";
- комплект джойстиков-манипуляторов;
- радиомодем.

Комплекс управления БПЛА обеспечивает выполнение следующих задач:

- трехмерная автоматическая навигация;
- полет по траектории в автоматическом режиме;
- автоматическое управление маневром;
- ручное управление с разделяемыми каналами;
- контроль вектора скорости;
- эффективное парирование внешних воздействий;
- взлет/посадка в ручном и автоматическом режимах;
- автоматическое предупреждение выхода за эксплуатационные ограничения ЛА;
- автоматическое поддержание абсолютной скорости;
- энергетический контроль тяги.

**Задачи, решаемые системой управления:**

- стабилизированная аэрофотосъемка: точная информация об углах ориентации БПЛА позволяет провести автоматическую "сшивку" снимков (рис. 5);
- управляемый сброс груза: система управления полетом обеспечивает точную доставку и сброс груза, синхронизированные по времени;

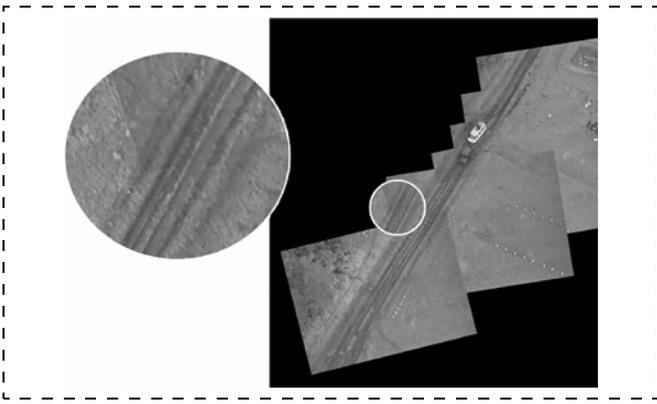


Рис. 5. Автоматическая "сшивка" аэрофотоснимков

- точная автоматическая посадка: автопилот точно выводит в заданный район и обеспечивает безопасную посадку БПЛА в автоматическом режиме. Возможен переход на ручное управление с наземной станции. Комплекс управления полетом БПЛА — это законченное ориентированное на пользователя решение для задач дистанционного и автоматического пилотирования БПЛА.

### 3. Наземные применения

**Навигационная система автомобиля.** В качестве навигационной системы автомобиля малогабаритная интегрированная навигационная система решает следующие задачи:

- непрерывное определение координат в районах высотной городской застройки, в тоннелях, под мостами и путепроводами;
- более точное счисление координат по сравнению с GPS;
- счисление координат и курса транспортного средства без запаздывания;
- надежное решение навигационной задачи в лесной и горной местности.

По результатам испытаний системы "КомпаНав-2" точность автономного инерциального счисления координат составила 100 м при пропадании сигналов спутников до 1 мин, что соответствует точности авиационной ИНС. Точность определения курса при десятиминутном пропадании GPS составила 2—3°. Применение интегрированной навигационной системы для наземного транспортного средства целесообразно в автомобилях экстренных служб, где непрерывно необходима информация о местоположении. Важным преимуществом также является точное и лишенное запаздывания определение курса. Эта информация необходима для навигационных систем, использующих "подвижную карту" с техникой "map matching" — привязка местоположения объекта к цифровой карте (рис. 6, см. четвертую сторону обложки).

**Датчик движения наземного транспортного средства.** Обладая в полной мере свойствами инерциальной навигационной системы с полным набором датчиков ориентации и перемещения (см. разд. 1), интегрированная система способна определять все параметры движения транспортного средства: угловые скорости, ускорения, ударные и вибрационные воздействия, перегрузки. При этом в отличие от традиционных блоков датчиков движения в интегрированной системе реализован сложный математический аппарат пересчета воздействий в различные системы координат. Поэтому потребитель может

использовать выходную информацию системы непосредственно для своих приложений без предварительной обработки.

**Системы обеспечения безопасности.** Потребителями информации о параметрах движения являются все системы обеспечения пассивной безопасности современного автомобиля:

- антиблокировочная система (АБС);
- антипробуксовочная система;
- система предупреждения заноса;
- система управления подушками безопасности.

В качестве блока чувствительных элементов систем пассивной безопасности интегрированная система выполняет следующие задачи:

- определение критических углов крена и тангажа;
- детектирование опрокидывания;
- предупреждение скольжения и заноса;
- 3-мерное детектирование силы и направления удара.

**Испытания автомобилей.** При динамических испытаниях автомобилей проводится запись параметров движения: скоростей, ускорений, угловых скоростей. Интегрированная система способна определять все указанные параметры с высокой точностью и выдавать потребителям данные с частотой обновления до 50 раз в секунду. Оснащенная блоком записи данных интегрированная система является автономным независимым устройством регистрации параметров движения.

**Блок датчиков для системы контроля действий водителя.** В странах Европы и в Японии в последние годы широко развивается направление интеллектуальных транспортных систем (ITS — *Intelligent Transportation Systems*). Общая концепция ITS состоит в рациональной организации транспортных потоков, пассажирооборота, оборота грузов, контроля за взиманием платы за пользование дорогами в целях повышения эффективности, безопасности и снижения издержек по перевозкам.

Важным элементом ITS является ADAS (*Advanced Driver Assistance System*) — система контроля и коррекции действий водителя. Основной функцией данной системы является повышение безопасности за счет анализа параметров движения и контроля за действиями водителя. Сердцем такой системы является блок чувствительных элементов, устанавливаемый в автомобиле.

В качестве блока чувствительных элементов интегрированная навигационная система выполняет следующие функции:

- детектирование скольжения;
- динамичное определение углов крена и тангажа;
- адаптивный контроль скорости;
- мгновенное определение курса;
- обеспечение высокой разрешающей способности по координатам.

Важным преимуществом интегрированных систем является тот факт, что они способны определять параметры движения без подключения к штатному оборудованию автомобиля. Интегрированная система является полностью автономным единым датчиком параметров движения и навигационной системой одновременно. Это обстоятельство позволяет устанавливать систему на любых видах транспортных средств без модификации последних.

**Персональная навигационная система.** В настоящее время на рынке средств навигации не предлагается портативная система определения местоположения пешехода без привлечения внешней информации. Анализ запросов потребителей показывает, что спрос на такую систему существует со стороны оперативных служб, чья

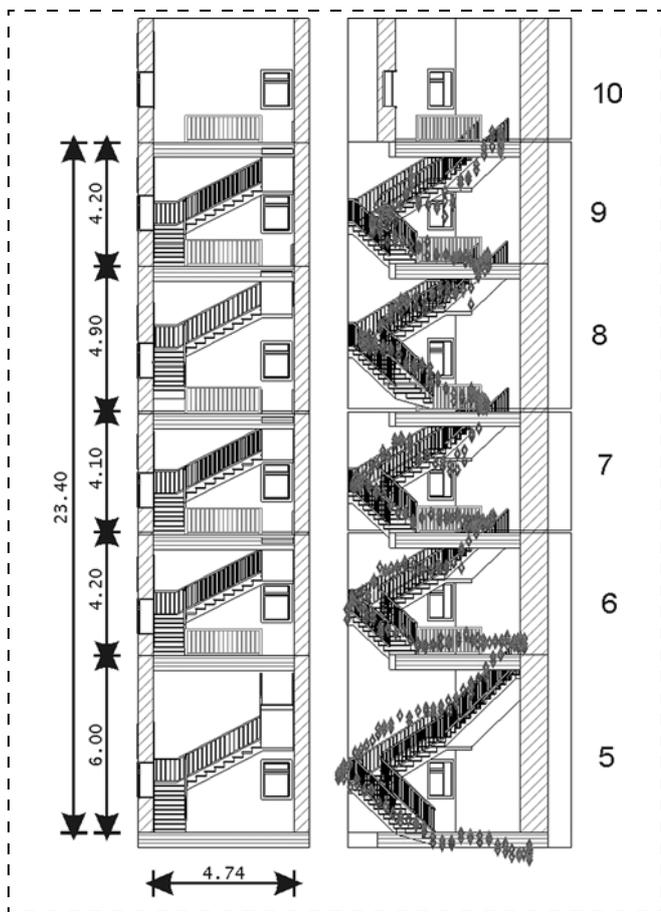


Рис. 8. Автономное определение местоположения в здании

деятельность требует постоянного контроля за действиями как мобильных подразделений, так и личного состава: спасательных служб, службы охраны, пожарных частей, горноспасательных отрядов. Данная задача не может быть решена средствами одной только спутниковой навигации, так как работы ведутся в закрытых помещениях, шахтах, лесной местности, где прием сигналов спутников затруднен или невозможен.

Персональная навигационная система разработана на базе модифицированной интегрированной навигационной системы. Система является автономным устройством определения пространственных координат (в горизонтальной плоскости и по высоте). Устройство обеспечивает непрерывное счисление координат местоположения пешехода с точностью не хуже 5 % от пройденного пути (рис. 7, см. четвертую сторону обложки, рис. 8). Передача информации может осуществляться по штатным каналам связи.

#### 4. "Умные" датчики

Разбиение общей схемы интегрированной системы на подсистемы, включающие отдельные группы элементов, позволяет получить линию датчиков для определения ориентации подвижных объектов. Благодаря использованию MEMS-элементов, эти датчики получают компактными и недорогими. Применение оригинального математического аппарата и достижений современной цифровой техники позволяет задействовать эти приборы в различных областях техники и производства.

**Двухосный датчик ориентации.** Изделие предназначено для определения углов относительной ориентации статических объектов в следующих областях:

- робототехника: определение параметров движения роботов и их исполнительных органов (манипуляторов);
- строительная техника: определение ориентации стрелы крана, точное управление работой ковша экскаватора;
- техника кино съемок: стабилизация и управление головкой кино съемочного крана;
- SteadyCam — система (стабилизатор кинокамеры для съемки с рук); *motion capturing* (техника "захвата движения").

**Трехосный датчик ориентации.** Датчик предназначен для определения пространственной ориентации вращающихся объектов, движущихся с малыми ускорениями. Применения:

- роботы и манипуляторы;
- управляемые самодвижущиеся игрушки;
- модели транспортных средств;
- точное складирование контейнеров;
- запись перемещений при погрузке и перевозке деликатных грузов.

**Датчик курса.** Датчик предназначен для автономного определения курса наземного подвижного объекта. Датчик обеспечивает высокую динамику и точность определения курса (азимута), в том числе и без привлечения внешней информации. Предлагаются две схемы датчика — с приемником GPS и с трехосным магнитометром для работы в "закрытых помещениях".

**Указатель горизонта.** Система предназначена для автономного определения углов крена и тангажа летательного аппарата в качестве резервной или единственной системы. В отличие от стандартного авиагоризонта (АГД) система на MEMS-датчиках имеет лучшую динамику индикации и не подвержена ряду инструментальных ошибок.

#### Заключение

Интегрированная навигационная система "Компанав-2" прошла многочисленные летные испытания в ЛИИ им. Громова (г. Жуковский), Центре боевой подготовки и переучивания летного состава армейской авиации МО РФ (г. Торжок), Испытательном центре авиации ВМФ. В результате было получено разрешение на ее использование в качестве резервной, дублирующей системы навигации вертолетов и легких самолетов.

Стоимость системы — около 150 тыс. р. В настоящее время на мировом рынке интегрированных систем навигации по соотношению цена/качество и размеры (масса)/качество не существует аналогов или близких по характеристикам продуктов.

В 2003 г. для производства МИНС организовано ООО "ТеКнол" (<http://www.teknol.ru>; e-mail: [contact@teknol.ru](mailto:contact@teknol.ru)). Продукция ООО "ТеКнол" ежегодно представляется на Московском международном авиакосмическом салоне МАКС, Международном аэрокосмическом салоне АВИАСВИТ, Международной выставке полицейской и военной техники ИНТЕРПОЛИТЕХ и др. За 3 года заказчиком поставлено около 200 систем, в том числе ЛИИ им. М. М. Громова (г. Жуковский), ОАО "Топаз", ОАО "Спецавтоматика", ОАО "Реаконт", ОАО "ВНИРА" (г. С-Петербург), НИИ Радиофизики (г. Ростов), СибНИИА (г. Новосибирск), ПКБ (г. Ульяновск).

#### Список литературы

1. Salychev O. S. Applied Inertial Navigation. Problems and Solutions. M.: Bauman MSTU Press, 1998. 302 с.
2. Воронов В. В. "Компанав-2" — интегрированная навигационная система // Геопрофи. 2004. № 2.

УДК 802.0(075.8)

**К. Д. Яшин**, канд. техн. наук, доц.,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники (г. Минск),  
**Е. В. Лацапнёв**,  
Белорусский национальный технический  
университет (г. Минск)

## АНГЛО-РУССКИЙ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК ПО МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ

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

### N

**Nanometer** — нанометр. Единица толщины/длины, равная  $10^{-9}$  м.  $1 \text{ нм} = 10 \text{ \AA}$ .

**Nanotechnology** — нанотехнология. Технология, позволяющая создавать устройства (элементы устройств), размеры которых составляют от 0,5 нм до 0,1 мкм.

**Native oxide** — естественный оксид (окисел). Слой  $\text{SiO}_2$  в виде очень тонкой пленки, образующейся на кремниевой подложке под воздействием комнатной температуры, воздуха, влаги или воды. Обычно составляет от нескольких до десятков ангстрем. Технология требует удаления естественного оксида, например, перед формированием металлизированных слоев для получения омических контактов к кремнию.

**Negative lithography** — негативная (обратная) литография. Перенос на поверхность подложки изображения, противоположного (обратного) изображению на маске (на фоторезисте).

**Negative resist** — негативный резист. При использовании негативного фоторезиста участки, которые были освещены (подвержены экспонированию), закрепляются и остаются после проявления.

**N-epi** — эпитаксиальный слой, легированный примесью *n*-типа проводимости. Для Si — это легирование P, As или Sb.

**Netlist** — список (таблица) элементов. Компьютерный файл, перечисляющий все элементы схемы (микросхемы) вместе с узлами, с помощью которых они связаны между собой. Это своего рода спецификация (список) элементов схемы (микросхемы). Например, такой список элементов формируется в программной среде SPICE (Simulation Program with Integrated-Circuit Emphasis).

**Nitinol (nickel titanium alloy)** — нитинол. Сплав никеля с титаном. Обладает суперупругостью, памятью формы, высокой устойчивостью к коррозии, биосовместимостью. Используется при создании минимально инвазивного хирургического оборудования, например в эндоскопах. Инвазивность — способность возбудителей инфекционных

заболеваний (вирусов, бактерий и др.) проникать в организм человека и распространяться в нем.

**Nitric acid ( $\text{HNO}_3$ )** — азотная кислота. Сильный окислитель. Используется в виде растворов для жидкостного травления металлов и для очистки кремниевых подложек.

**Nitride** — нитрид. Соединения азота с более электроположительными элементами, главным образом с металлами. По строению и свойствам нитриды подразделяются на три группы: солеобразные, ковалентные, металлоподобные. Например, соединение аммиака и моносилана используется в процессе химического осаждения из газовой фазы для формирования электроизоляционных (непроводящих) тонких пленок нитрида кремния:  $\text{NH}_3 + \text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + \text{H}_2$ . Пленки нитрида кремния отличаются химической инертностью и применяются, например, для создания изопланарной изоляции элементов СБИС и в LOCOS-процессе.

**Nitrogen** — азот, атомный символ N. Химический элемент V группы периодической системы Д. И. Менделеева. Атомный номер 7, атомная масса 14,0067 а. е. м. Удельный вес  $0,972 \text{ кг/м}^3$ .  $\text{N}_2$  — бесцветный газ, не имеет запаха, вкуса, очень мало растворим в воде. Азот широко используется в технологии ИС как инертный продувочный газ (для продувки) вследствие своей низкой стоимости. Однако его следует использовать осторожно, потому что при некоторых условиях он начинает вступать в реакцию с другими веществами. Например, при температуре  $>950 \text{ }^\circ\text{C}$  азот будет реагировать с кремнием, формируя нитрид кремния в среде, обедненной кислородом. Поэтому, когда в диффузионной печи температура  $>950 \text{ }^\circ\text{C}$ , обычно добавляют небольшое количество кислорода для подавления формирования нитрида кремния.

**Nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ )** — закись азота. Нетоксичный, невоспламеняющийся газ, используемый в комбинации с моносиланом в процессе химического осаждения из газовой фазы для получения слоев оксинитрида кремния и  $\text{SiO}_2$ . Закись азота используется для выращивания подзатворных оксидов высокого качества.

**Nodal analysis** — узловой анализ. Относится к методологии структурного проектирования. Используется для разработки точных, заранее predeterminedных блоков. Состоит из следующих этапов: декомпозиция (разбивка) схемы на *N* устройств; моделирование каждого устройства посредством простых дифференциальных уравнений с коэффициентами, параметризованными исходя из геометрии устройства и свойств материала, полученных в ходе практических измерений или из спецификации (возможностей) используемого технологического процесса; соединение устройств в узлы и решение результирующих связанных (сложных) дифференциальных уравнений в стандартных микроэлектронных симуляторах. Иногда в некоторой научной-технической литературе понятие "узловой анализ" относится к физико-химическому анализу кристаллической структуры веществ, а также элементов, находящихся в узлах кристаллической решетки. Пример: узловой анализ вещества GaAlAs или определение межзельного расстояния в кристаллической решетке кремния.

**Node** — узел. Элемент кристаллической решетки вещества.

**Noise density** — интенсивность звука (шума). Интенсивность звука — средняя по времени энергия, которую звуковая волна переносит в единицу времени через единицу поверхности, расположенную перпендикулярно к направлению распространения волны. Однако в англоязычной литературе по МЭМС-тематике под этим выражением чаще понимают "величину шумовых сигналов". Величина шумового сигнала — это минимальный разрешенный сигнал сенсора при комнатной температуре и номинальном напряжении. Шумовой сигнал — это флуктуации тока и напряжения относительно их среднего значения. Флуктуации возникают в результате дробового эффекта (неравномерность диффузии электронов в полупроводниках), а также в результате теплового движения носителей заряда в полупроводниках.

**Non-contact handling** — бесконтактное, дистанционное управление. Бесконтактный захват и перемещение объектов, например, в магнитном или электростатическом поле.

**Nonlinearity** — нелинейность. Отклонение от линейной зависимости (в виде прямой линии) выходного сигнала устройства от входного параметра. Пример из нелинейной оптики: в условиях сильных световых полей поляризация среды начинает нелинейно зависеть от напряженности электрического поля световой волны. Нелинейная акустика изучает свойства звуковых волн большой амплитуды (интенсивности). В условиях нелинейности прямая линия может быть определена лишь при использовании конечных точек зависимости (другое название — терминальных, концевых точек зависимости),

а также методом аппроксимации. Аппроксимация — замена одних математических объектов другими, более простыми и близкими к исходным (замена кривых линий близкими к ним ломаными).

**Notch** — выемка, метка, насечка. Специально созданная технологическая насечка на торце подложки. Насечка ориентирована так, чтобы диаметр, проходящий через центр насечки, был параллелен определенному кристаллографическому направлению. Применяется в технологии для одинакового ориентирования пластин в реакторе при выполнении какого-либо критического технологического процесса.

**Novolak** — новолак. Новолачная смола. Аморфный полимерный лак. Термопластичная фенол-формальдегидная смола. Отверждается только в присутствии специальных реагентов — отвердителей. Используется в формовке, при соединении (склеивании) материалов, а также при выполнении электрической изоляции, например, между слоями многослойной металлизации или для бескорпусной сборки изделий.

**Numerical Aperture (NA)** — числовая апертура. Параметр, определяющий геометрию линзы объектива, используемую в проекционной фотолитографии. Определяет способность линзы собирать свет, дифрагированный от маски/промежуточного фотошаблона.

**N-well** — *n*-карман. Локальная, диффузионно созданная область чипа, легированная примесью *n*-типа, в теле которой, как "в кармане", формируются *p*-канальные МОП-транзисторы и устройства.

## Новости нанотехнологий

### Биотранзистор из шпината

Ученые из Университета Огайо смогли создать первый в мире биотранзистор на основе молекулы хлорофиллового комплекса клеток шпината (рис. 1).

Это не только транзистор, но и многофункциональное сложное устройство.

Благодаря сканирующему электронному микроскопу ученым удалось изменять форму молекулы хлорофилла-*a*, конструируя из первичной молекулы четыре новых формы.

Как говорит одна из исследователей, Виолетта Янку, с помощью того же сканирующего туннельного микроскопа им удалось одну из измененных форм превратить в биологический переключатель.

Также ученые уверены, что измененные формы хлорофилла-*a* помогут больше узнать о развитии жизни и процессе фотосинтеза вообще.

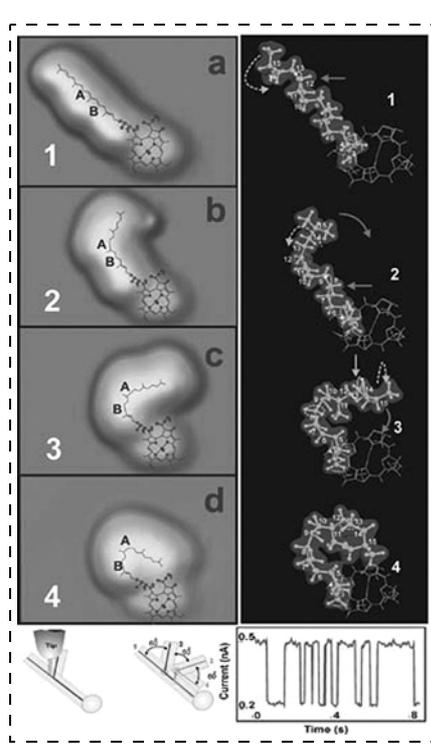


Рис. 1. Нанотранзистор из хлорофилла-*a*

Использование измененных молекул в качестве ключей сможет значительно повлиять на будущие логические цепи и механические наноконьютеры. А это, в свою очередь, принесет ряд новых продуктов в медицинскую отрасль и нанoeлектронику.

**Источник:** EurekAlert: Nanoscientists Create Biological Switch from Spinach Molecule (<http://news.research.ohiou.edu/news/index.php?item=311>)

### Запряженные бактерии

Ученые из Японии заставили бактерии вращать микроскопический ротор, изготовленный из двуоксида кремния — материала, используемого при изготовлении микрочипов в полупроводниковой промышленности.

"Теоретически мы знали, что "сил" у бактерий хватит для того, чтобы привести в движение простой механизм, но ведь нужно еще заставить ее это сделать, — говорит Ючи Хиратсука, профессор из Национально-

го института промышленности и технологий Японии. — И поэтому мы были очень обрадованы, когда это удалось сделать в реальности, потому что трудно представить живой организм и механизм, работающие совместно».

В качестве мотора Хиратсука и его коллеги использовали бактерию *Mycoplasma mobile*, обычного паразита пресноводных рыб. Бактерия известна тем, что может передвигаться в жидкости.

На основе живого мотора ученые сконструировали микроструктуру, состоящую из шестеренки-ротора диаметром 20 мкм, находящейся в специфической полости, в которой, собственно, и находились бактерии. Теоретически, зацепившись за вращающийся ротор и подложку, бактерии должны были двигать его против часовой стрелки (рис. 2).

Однако для того, чтобы биологическая машина пришла в действие, необходимо было создать сцепление между бактерией и ротором. Этого достигли нанесением на ротор и систему каналов, в которых находились бактерии, специфических белков, присоединяющихся к белкам бактерии. На ротор нанесли молекулы стрептавидина — антитела, которое хорошо соединяется с мембранными белками бактерии, а на систему каналов — молекулы фетуина, которые обеспечили "прилипание" бактерий к каналам.

Но даже для того, чтобы бактерии прилипали к маркерам, необходимо было генетически модифицировать бактерии-тягачи для того, чтобы на их мембранах появились необходимые маркеры.

Через несколько минут после "запуска" бактерий в канал скорость вращения шестеренки составила 1,5...2,6 об/мин. Энергию бактерии получают благодаря универсальным

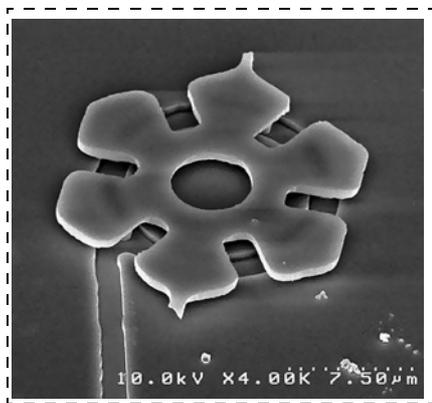


Рис. 2. Структура биологического механизма

"батарейкам" всех живых организмов — молекулам АТФ. Ученые просто добавили в раствор определенное число этих молекул, что обеспечило бактерии энергией для выполнения работы.

"Мы планируем сделать на основе бактериального мотора микронасос microTAS, составную часть лаборатории-на-чипе, — поясняет Ючи. — А в перспективе мы хотим превратить бактериальный ротор в микроэлектростанцию, для того чтобы подавать электроэнергию к медицинским имплантам и другим устройствам".

Также не исключено, что бактерия-двигатель станет основой медицинской наноробототехники будущего.

**Источник:** Nanotechweb: Bacteria make the rotor go round (<http://www.nanotechweb.org/articles/news/5/9/1/71>)

## Лаборатории-на-чипе из полимеров

Совместными усилиями исследователей из Университета Альберты и лаборатории Philips в Нидерландах была продемонстрирована новая технология организации полимерных пленок в микроструктуры со сложной конфигурацией поверхности. Ученые надеются, что эти жидкокристаллические полимеры могут использоваться в системах быстрого анализа лаборатории-на-чипе.

Жидкие кристаллы широко известны производителям LCD-мониторов благодаря их уникальным оптическим свойствам. Дополнительно было установлено, что полимерные жидкие кристаллы могут работать как искусственные мускулы. Но недавно было установлено, что жидкие кристаллы могут использоваться как основа для систем lab-on-chip, которые традиционно изготавливают из кремния.

Как утверждают исследователи, жидкие кристаллы были бы более удобны для микромеханических систем не только благодаря своим оптическим и физическим свойствам, но и из-за их биосовместимости с живыми клетками.

**Источник:** EurekAlert: Polymers show promise for lab-on-a-chip technology ([http://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2006-08/uoa-psp083006.php](http://www.eurekalert.org/pub_releases/2006-08/uoa-psp083006.php))

## Нанодинамит делает взрывчатку безопаснее

Взрыв динамита — процесс всегда неконтролируемый. И хотя существует такая наука, как пиротехника,

все равно многие типы взрывчатки трудно поддаются расчету при их проектировании. Связано это с тем, что о взрывчатых свойствах веществ известно мало. Но недавно ученые из Университета Джорджии создали установку, позволяющую точно исследовать взрывчатые вещества на основе миниатюрных порций взрывчатки.

Оказывается, для исследования свойств взрывчатых материалов необходимо точно знать, как они ведут себя при наименьших тепловых воздействиях. При этом выбирают настолько малые массы взрывчатых веществ, что они не могут взорваться.

Для того, чтобы нагревать нанопорции взрывчатки ученые сделали точный наноагрегатор на основе зонда атомно-силового микроскопа (АСМ). С его помощью легко проследить и изучить процессы испарения, таяния и возгорания ультрамалых порций взрывчатых веществ (рис. 3).

Зонд состоит из PETN-пленки (*pentaerythritol tetranitrate*), поликристаллического энергетического материала, из которого с помощью нанолитографии "вырезали" нагреватель. Как показали эксперименты, он может нагревать кусочки материала от 100 нм длиной и до нескольких микрометров. Нагреватель может производить теплоту с точностью до одного градуса, чего в наноразмерном диапазоне достичь с помощью обычных резисторных зондов трудно.

"Мы показали, что можно контролировать морфологию взрывчатых веществ в наноразмерном диапазоне. Кроме этого, мы узнали, как ведут себя нановзрывчатки, что очень важно для дальнейших исследований в области пиротехники и создания "умных" взрывчаток, — говорит Брэндон Уикс, профессор отделения химии при университете. — Мы уверены, что наши исследования позволяют

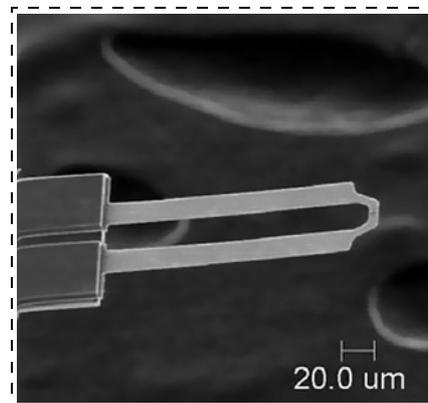


Рис. 3. Наноагрегатор

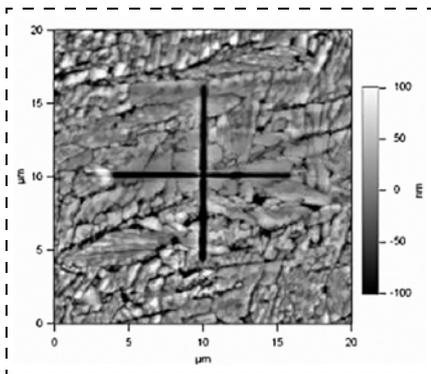


Рис. 4. Тепловая карта исследуемого материала

сделать взрывчатку безопаснее в использовании. Это крайне необходимо, например в военных продуктах".

Грубо говоря, на основе исследований, проводимых учеными, можно сделать взрывчатку безопасным куском материала до того, как будет приведен в действие детонатор.

Благодаря нагревательному зонду ученые получили карты таяния и плавления взрывчатых материалов (рис. 4). Для этого зонд "сканировал" различными температурами микроскопические участки нановзрывчатки.

Также ученым удалось конденсировать расплавленный материал в форму с новой кристаллической структурой. Измененная взрывчатка, как показали эксперименты, взрывается узконаправленно и с выделением меньшего количества энергии. Поэтому ученые надеются, что им удастся создать "управляемую взрывчатку", которая будет востребована не только военными, но и шахтерами и спасателями.

**Источник:** PhysOrg: "World's smallest controlled heat source" studies explosives at the nanoscale (<http://www.physorg.com/news/76939293.html>)

## Нанотехнологии и регенеративная медицина

Возможности нанотехнологий в регенеративной медицине были представлены на 232-м заседании Американского химического общества в Сан-Франциско 11 сентября. Называлась показанная участниками презентация: "Преимущества наномедицины". Одним из наиболее интересных представленных достижений ученых оказалась технология восстановления поврежденной нерв-

ной ткани с помощью углеродных нанотрубок (рис. 5).

Как показали эксперименты, проведенные на крысах, после имплантирования в поврежденные участки мозга специальных матриц из нанотрубок в растворе стволовых клеток уже через восемь недель ученые обнаружили восстановление нервной ткани. Однако при использовании нанотрубок либо стволовых клеток отдельно аналогичного результата не было.

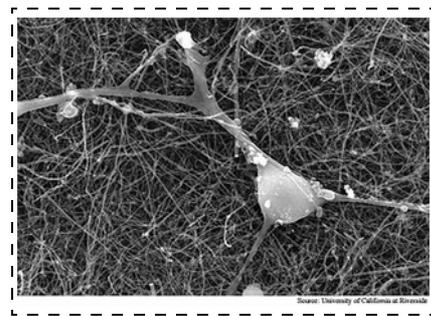


Рис. 5. Рост нейронов на нанотрубках

Как говорят ученые, это открытие позволит помочь людям, страдающим болезнью Альцгеймера и Паркинсона. Наноструктуры также могут помочь в восстановительной терапии после острых сердечных заболеваний. Так, наночастицы, введенные в кровеносные сосуды мышей, помогли восстановить сердечно-сосудистую деятельность после инфаркта миокарда. Принцип метода состоит в том, что самособирающиеся полимерные наночастицы помогают "запустить" естественные механизмы восстановления сосудов.

Эти и другие представленные на заседании достижения помогут поднять современную регенеративную медицину на совершенно новый уровень.

**Источник:** EurekAlert: Nanotechnology propels advances in regenerative medicine research ([http://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2006-09/acs-npa082906.php](http://www.eurekalert.org/pub_releases/2006-09/acs-npa082906.php))

## Нанорезонатор перешагнул за барьер 1,3 ГГц

Физики из Университета Калифорнии (США) сконструировали наноэлектромеханический резонатор (НЭМС-резонатор), работающий на частотах выше 1,3 ГГц. Основа резонатора — углеродная нанотрубка.

Отличительная особенность новой наноструктуры в том, что резонатор может работать при комнатной

температуре и атмосферном давлении. Резонаторы, сконструированные ранее, могли "разогнаться" всего до 200 МГц.

Создано наноустройство профессором Алексом Зеттлом, ученым, известным по созданию наименьшего рабочего электромотора на основе нанотрубки. Также, как говорит Алекс, новое устройство может служить масс-детектором с разрешением 10...18 аттограмм. При этом устройство не использует лазера в своей конструкции для определения сдвига частот. Ученые уверены, что разрешение устройства может быть увеличено до зептограмма.

Резонатор представляет собой нанотранзистор с разнесенными в стороны стоком и истоком, между которыми колеблется нанотрубка. Приводится в действие резонатор с помощью запускающего радиочастотного сигнала.

**Источник:** Nanotechweb: Nanotube resonators break gigahertz barrier (<http://www.nanotechweb.org/articles/news/5/9/3/1>)

## Ученые из Motorola создали сверхточный сенсор на основе нанотрубок

Команда исследователей из Университета Аризоны совместно с учеными из исследовательского отдела компании Motorola разработали сенсор на основе нанотрубок с удивительными электронными свойствами. Он позволяет находить ионы тяжелых металлов в воде.

Устройство состоит из нанотрубчатого транзистора, покрытого слоем пептидов. Причем пептиды, состоящие из 20 аминокислот, могут быть перестроены учеными для того, чтобы устройство могло детектировать химикаты различного типа.

Как говорят ученые, создание сенсора — первый шаг на пути к появлению сверхточных детекторов токсичных химикатов в водной и воздушной средах, что будет крайне полезно в медицинских и военных продуктах. Теперь же ученых интересует, как будут реагировать сенсоры на химические вещества, если их покрыть слоем молекул РНК или ДНК.

**Источник:** EurekAlert: Motorola researchers develop selective sensors based on carbon nanotubes ([http://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2006-09/asu-amr091-306.php](http://www.eurekalert.org/pub_releases/2006-09/asu-amr091-306.php))

Составил Ю. Г. Свидиненко

### IBM, Chartered, Infineon и Samsung объявляют о готовности производственного процесса и проектных норм для 45-нанометровых кремниевых чипов с низким энергопотреблением

*Лидеры отрасли предлагают первопроходцам передового процесса надежную и высокопроизводительную платформу с малыми токами утечки, а также проектировочные наборы, ускоряющие процесс перехода на новые технологии.*

**ИСТ-ФИШКИЛ (шт. Нью-Йорк), СИНГАПУР, МЮНХЕН (Германия), СЕУЛ (Южная Корея), 29 августа 2006 г.** — Корпорация IBM и компании Chartered Semiconductor Manufacturing (Nasdaq:CHRT — News; SGX-ST:CHARTERED), Infineon Technologies и Samsung Electronics Co., Ltd. объявили о результатах совместной деятельности по созданию технологий для производства 45-нанометровых кремниевых чипов с низким энергопотреблением. В частности, были представлены первые реализованные в кремнии микросхемы и объявлено о готовности наборов средств проектирования. Заблаговременное представление характеристик ключевых проектных элементов, уже воплощенных "в кремнии", а также проектировочных наборов является серьезным подспорьем для разработчиков при переходе к новому технологическому процессу, созданному совместными усилиями лидеров полупроводниковой отрасли. Наборы

для разработчиков, в создании которых принимали участие специалисты всех четырех компаний, уже доступны некоторым заказчикам. Первые работающие чипы, изготовленные по 45-нанометровым нормам, предназначены для систем связи следующего поколения. Их выпуск на 300-миллиметровой производственной линии IBM в г. Ист-Фишвилл, штат Нью-Йорк, где базируется объединенная группа разработки, подтвердил правильность технологических решений, принятых партнерами по альянсу. Среди блоков, которые успешно прошли тестирование, были узлы для библиотеки стандартных компонентов и элементы ввода-вывода разработки Infineon, а также встроенная память, разработанная специалистами альянса. Компания Infineon включила в первые 300-миллиметровые полупроводниковые пластины специальные схемы для отладки комплексных процессов и получения информации о взаимодействии компонентов архитектуры.

В наборах для разработчиков воплощен обобщенный опыт проектирования, накопленный специалистами всех четырех компаний. Эти наборы предназначены для упрощения перехода проектировщиков специализированных чипов к новому технологическому процессу, а также для стимулирования производства единой конструкции на нескольких производственных предприятиях в целях эффективного использования проектных наработок и обеспечения максимальной полезности для потребителей. Как ожидается, к концу 2007 г. производство микросхем по 45-нанометровой технологии с низким энергопотреблением на основе 300-миллиметровых подложек будет в полном масштабе развернуто на фабриках Chartered, ЮМ и Samsung.

### УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ "НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА" В 2006 г.

#### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

- Балахонова М. Л.** Проблемы реализуемости инновационных проектов в сфере научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок. № 7.
- Бочаров Л. Ю., Иванов А. А., Мальцев П. П.** О зарубежных программах по военной нанотехнологии. Часть 1. № 12.
- Вернер В. Д., Мальцев П. П.** Возможности и ограничения перехода от микросистемной техники к наносистемной технике. № 10.
- Иванов А. А., Мальцев П. П., Телец В. А.** О направлениях развития микросистемной техники. № 1.

**Новиков Ю. А., Раков А. В., Тодуа П. А.** Нанометрология в нанотехнологиях. № 12.

#### НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

- Бахтизин Р. З., Ву К.-Х., Шце Ч.-Ж., Шце Ч.-К., Сакурай Т.** Атомно-масштабные исследования адсорбции и роста пленок благородных металлов на поверхности GaN (0001). № 1.
- Бутыльская М. В.** Создание структур "кремний-на-изоляторе" с использованием имплантации водорода. № 6.
- Волков Г. М.** Технологические проблемы перехода от микро- к наносистемам консолидации дисперсных частиц вещества. № 5.
- Горшенина Т. А., Шмелев Г. М.** Неравновесный квазидвумерный электронный газ как сегнетоэлектрик. № 7.
- Груздев А. О.** Создание учебной нанолaborатории на основе СЗМ "Nanoeducator" для платформы Apple. № 11.
- Дедков Г. В.** Физические аспекты взаимодействий зонд — поверхность в сканирующей зондовой микроскопии. № 8, 9.

- Запороцкова И. В.** Структура и электронно-энергетические характеристики модифицированных алициклических нанотубуленов. № 1.
- Ковалевский А. А., Долбик А. В.** Особенности взаимодействия германия с пленками поликристаллического кремния. № 4.
- Рембеза Е. С., Свистова Т. В., Рембеза С. И., Комарова А. С., Дырда Н. Н.** Структура и электрофизические свойства нанокompозита  $\text{SnO}_x\text{:MnO}_y$ . № 4.
- Сейсян Р. П.** ЭУФ-наноитография как средство производства СБИС и инструмент нанотехнологий. № 6.
- Спицын Б. В.** Наноалмаз — науке и практике. № 3.
- Шевченко В. Я., Самойлович М. И.** Геометрия, информация и строение наномира. № 11.
- Юрков А. С.** Об оптических переходах в квантовых точках. № 3.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

- Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники. Часть I. Основные положения. № 8.
- Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники. Часть II. Модели полуклассического подхода. № 9.
- Абрамов И. И., Дворников О. В.** Маршрут моделирования биполярно-полевых аналоговых интегральных схем в программах типа "Spice". № 11.
- Акулова Г. В., Атепалихин В. В., Горячев А. В., Кузнецов С. Н., Попков А. Ф., Шокин А. Н.** Управление изгибом консоли многозондового кантилевера методом токового разогрева. № 10.
- Афонин С. М., Афонин П. С.** Моделирование характеристик пьезоэлектрических блочных актюаторов для нано- и микроманипуляторов. № 11.
- Брюхова Ю. В., Зайцев Н. А.** Разработка моделей полупроводниковых приборов с использованием программ физико-технологического моделирования. № 8.
- Галушков А. И., Панкратов О. В., Погалов А. И., Сауров А. Н., Суханов В. С., Угольников С. В.** Методы проектирования и калибровки микроэлектронных пьезорезистивных преобразователей ускорения. № 7.
- Жуков А. А., Четверов Ю. С., Кудрявцев П. Н., Бирюлин П. В., Здобников А. Е., Бабаевский П. Г., Обижаев Д. Ю.** Метод определения теплофизических характеристик неохлаждаемых полупроводниковых микроболометров. № 1.
- Коноплев Б. Г., Лысенко И. Е.** Моделирование интегрального микромеханического гироскопа с тремя осями чувствительности. № 7.
- Мамедов А. К.** Оценка переходной характеристики электронных схем с операционными усилителями в режиме большого сигнала. № 9.
- Мухуров Н. И., Ефремов Г. И.** Моделирование и разработка перспективных микроэлектромеханических структур на основе анодного оксида алюминия. № 1.
- Сафронов А. Я., Горнев Е. С., Зайцев Н. А., Матюшкин И. В.** Разработка конструкции и технологии изготовления микросистем на основе кремния и тонких пленок пьезокерамики. № 8.
- Шауцук А. Г., Кузнецов Г. Д.** Моделирование процесса одновременного легирования атомами отдачи и бомбардирующими ионами при бомбардировке структур пленка — подложка. № 9.

## МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

- Алтухов В. И., Ростова А. Т., Казаров Б. А.** Рассеяние фононов на точечных дефектах структуры, комплексах — наночастицах и типичные особенности теплового сопротивления реальных кристаллов и сегнетоэлектриков. Часть I. Квазиупругое рассеяние фононов и критические показатели для сегнетоэлектриков. № 3.
- Алтухов В. И., Ростова А. Т., Казаров Б. А.** Рассеяние фононов на точечных дефектах структуры, комплексах — наночастицах и типичные особенности теплового сопротивления реальных кристаллов и сегнетоэлектриков.

Часть II. Роль точечных дефектов, наночастиц и флуктуационный эффект биений. № 4.

- Амеличев В. А., Вернер В. Д., Ильков А. В., Сауров А. Н.** Совместимость технологии микросистемной техники с технологией микроэлектроники. № 11.
- Атучин В. В., Кидяров Б. И., Первухина Н. В.** Систематизация и взаимосвязь микро- и макроструктуры с физическими свойствами оксидных кристаллов без центра инверсии. Часть I. Симметричные ограничения и статистика. № 4.
- Атучин В. В., Кидяров Б. И., Первухина Н. В.** Систематизация и взаимосвязь микро- и макроструктуры с физическими свойствами оксидных кристаллов без центра инверсии. Часть II. Нелинейно-оптические свойства бинарных оксидных кристаллов. № 5.
- Бабаевский П. Г., Жуков А. А., Шаповал С. Ю., Гринькин Е. А.** Адгезионное взаимодействие твердых поверхностей и создание полимерных "сухих" адгезивов. Теоретические аспекты. № 2.
- Бутыгская М. В.** Химико-механическая полировка как метод активации и восстановления поверхности кремниевых пластин в технологии создания структур "кремний-на-изоляторе". № 7.
- Бутыгская М. В., Петролюк Ю. С.** Ультразвуковая микроскопия как возможный инструмент контроля качества соединения пластин в процессе изготовления структур "кремний-на-изоляторе". № 8.
- Бутыгская М. В.** Радиационно-индуцированное газовое скалывание кремния в технологии изготовления структур типа "кремний-на-изоляторе". № 10.
- Гринькин Е. А., Жуков А. А., Шаповал С. Ю., Бабаевский П. Г.** Адгезионное взаимодействие твердых поверхностей и создание полимерных "сухих" адгезивов. Практические аспекты. № 9.
- Гуртовой В. Г., Шелег А. У.** Низкотемпературные исследования диэлектрических свойств кристалла  $\text{K}_3\text{Li}_{1,88}\text{Nb}_{5,12}\text{O}_{15,24}$ . № 2.
- Даринцев О. В., Мигранов А. Б.** Сборка гибридных МЭМС на основе трехмерной реконструкции состояния технологической среды. № 12.
- Ковалевский А. А., Долбик А. В., Цыбульский В. В.** Исследование процесса анизотропного плазмо-химического травления пленок диоксида кремния. № 6.
- Козаков А. Т., Никольский А. В., Еремкин В. В., Смотряков В. Г.** Поляризационные явления в материалах с метастабильной электрической поляризацией в свете эффекта аномальной электронной эмиссии. № 12.
- Криворучко А. В., Тополов В. Ю.** Прогнозирование гидростатического пьезоэлектрического отклика анизотропных 1—3-композигов "сегнетопезоокерамика — полимер". № 7.
- Лалетин Р. А., Бурханов А. И., Сигов А. С., Воротилов К. А.** Воздействие низко- и инфранизкочастотных электрических полей на поведение доменной структуры пленок PZT при различных механических напряжениях в материале. № 5.
- Лалетин Р. А., Бурханов А. И., Сигов А. С., Воротилов К. А.** Особенности низко- и инфранизкочастотного диэлектрического отклика тонких пленок BST, изготовленных при различных температурах отжига. № 7.
- Ландышев А. В., Лаврентьев А. А., Ландышев В. А.** Исследование влияния концентрационных неоднородностей в сплавах  $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$  и  $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$  на их термоэлектрические свойства. № 2.
- Лотонов А. М., Новик В. К., Гаврилова Н. Д.** О дисперсии диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика триглицинсульфата (ТГС) в широкой области температур. № 2.
- Непечатенко В. А., Кудзин А. Ю.** Уравнения 90-градусных доменных стенок в системе координат тетрагональной фазы  $\text{BaTiO}_3$ . № 6.
- Обухов И. А.** О температурной зависимости сопротивления металлических квантовых проводов. № 6.
- Павлов С. В.** Диэлектрическая проницаемость композита с наполнителем из сегнетоэлектрика. № 3.

- Павлов С. В.** Влияние электрического поля, примесей и граничных электромеханических напряжений на поляризационный профиль тонкой сегнетоэлектрической пленки. № 11.
- Рабаданов М. Х., Шалдин Ю. В., Буш А. А., Петрашко А.** Сегнетоэлектрики  $Pb_5(Ge_{1-x}Si_x)_3O_{11}$  ( $x = 0.0, 0.30, 0.42$ ): особенности атомной структуры. № 10.
- Рембеза Е. С., Свистова Т. В., Рембеза С. И., Комарова А. С., Дырда Н. Н.** Наноконкомпозиты  $SnO_x:MnO_y$  для микроэлектронных датчиков газов. № 11.
- Самойлович М. И., Белянин А. Ф.** Формирование наноструктурированных пленок алмазоподобных материалов. № 7, 8.
- Самойлович М. И., Цветков М. Ю.** Редкоземельные опаловые наноконкомпозиты для нанофотоники. № 10.
- Сидоров Н. В., Чуфырев П. Г., Палатников М. Н., Калинин В. Т.** Дефекты, фоторефрактивные свойства и колебательный спектр кристаллов ниобата лития разного состава. № 3.
- Тополов В. Ю., Панин А. Е., Курбанов М. А.** Особенности пьезоэлектрических свойств 0-3-композитов на основе керамики типа ПКР. № 1.
- Шалдин Ю. В., Рабаданов М. Х.** Мезоструктура пирозлектриков. № 9.
- Шауцуков А. Г., Кизилов И. М., Кузнецов Г. Д.** Моделирование процесса формирования легированных атомами отдачи слоев. № 11.
- Школьников В. М., Фомичев А. Е., Жукова С. А., Жуков А. А., Четвергов Ю. С.** Тестовая плата многокристалльных микромодулей СБИС в системах авионики. № 3.
- Щеглов П. А., Никишина Е. Е., Дробот Д. В., Лебедева Е. Н.** Перспективная технология металлических и оксидных наноматериалов на основе редких элементов. № 11.

#### СИСТЕМЫ-НА-КРИСТАЛЛЕ

- Аржадеева Е. А., Моисеев П. Д., Малых В. Н.** Программируемый широкодиапазонный формирователь импульсов в измерительной технике по технологии "система-на-кристалле". № 12.
- Кукушкин С. А., Осипов А. В., Захаров М. А.** Кинетическая теория поляризационного переключения многоосных сегнетоэлектрических кристаллов. № 4.
- Степченко Ю. А., Петрухин В. С., Дьяченко Ю. Г.** Опыт разработки самосинхронного ядра микроконтроллера на базовом матричном кристалле. № 5.

#### ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

- Акопьян В. А., Панич А. Е., Соловьев А. Н., Лесных Е. С., Шевцов С. Н.** Некоторые физико-механические проблемы пьезоэлектрических актюаторов и области их применения. № 10.
- Белоненко М. Б., Сасов А. С.** Динамика поляризации в сегнетоэлектриках типа "порядок-беспорядок" с релаксационным типом поглощения. № 7.
- Бобровник В. Н., Шелепин Н. А.** Анализ собственной частоты и механических напряжений тензопреобразователя кремниевого балочного типа (ТКБ). № 2.
- Волков Е. В., Старков В. В., Добровольский Ю. А., Гаврилин Е. Ю.** Водородно-воздушный топливный элемент на основе макропористого кремния. № 10.
- Годовицын И. В.** Расчет деформации электростатических ВЧ переключателей аналитическим и конечно-элементным методами. № 11.
- Деспотули А. Л., Андреева А. В., Веденеев В. В., Аристов В. В., Мальцев П. П.** Высокоемкие конденсаторы для ультраплотного поверхностного монтажа. № 3.
- Каштанкин И. А., Гурин Н. Т.** Температурные характеристики биполярных  $N$ -приборов с управляемой вольтамперной характеристикой. № 6.
- Каштанкин И. А., Гурин Н. Т.**  $N$ -транзисторные оптроны. № 8.

- Козлов А. Г.** Тепловые микросенсоры: классификация, основные типы. № 4.
- Комов А. Н., Курганская Л. В., Щербак А. В.** Безынерционные и высокочувствительные измерители СВЧ мощности больших уровней на базе гетероструктур SiC/Si. № 2.
- Косцов Э. Г., Камышлов В. Ф.** Микроэлектромеханические быстродействующие микроклапаны. № 12.
- Левинский Ю. В., Зайцев А. Б.** Получение нанопористых ниобиевых анодов электролитических конденсаторов. № 10.
- Лукиянов В. В.** Бесплатформенная ИНС на базе MEMS-чувствительных элементов. № 12.
- Морозов С. В., Воронин О. Г., Карякина Е. Е., Карякин А. А.** Водородные топливные электроды на основе ферментов. № 5.
- Потягало А. С., Солтан И. Е., Ткачев Д. Ф., Хапаев М. М.** Опыт применения редукиции паразитных элементов с использованием методов подпространств Крылова. № 6.
- Рогаткин Ю. Б.** Вопросы разработки и методология проектирования смешанных СФ-блоков. № 6.
- Сафронов А. Я., Горнев Е. С., Зайцев Н. А., Матюшкин И. В.** Концептуализация маршрута проектирования микроэлектромеханических систем с пьезоэлементами. № 5.
- Старков В. В.** Монолитные топливные элементы на основе кремния. № 3.
- Тимошенков С. П., Зотов С. А., Калугин В. В., Бритков О. М., Рубчин В. Г., Воронников А. А., Светлов-Прокопьев Е. П.** Влияние пор и нанослоев на изгибную жесткость подвеса кремниевого чувствительного элемента МЭМС. № 7.
- Тихонов Р. Д.** Двухколлекторный магнитотранзистор: отрицательная чувствительность, абсолютная чувствительность и шумы. № 11.
- Фёдоров Р. А., Шелепин Н. А.** Разработка схемы, поддерживающей резонансные колебания чувствительного элемента микроэлектромеханической системы. № 2.
- Яшин К. Д., Осипович В. С., Золотой С. А., Лацапнев Е. В.** Микрокосмические аппараты и квантовые ключи. № 7.

#### ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

- Агейченко А. С., Точицкий Я. И., Васильев А. А., Есьман В. М.** Точность процессов фотолитографии и фотолитографического оборудования. № 12.
- Аристов В. В., Мордкович В. Н., Мальцев П. П.** Технология "кремний-на-изоляторе" в микросистемной технике. № 12.
- Беляев В.** МЭМС/МСТ в современной технике на примере автомобилестроения и авиации. № 5.
- Градецкий В. Г., Князьков М. М., Семенов Е. А.** Динамические процессы в миниатюрных многозвенных роботах. № 9.
- Сажнев С. В., Фомичёв М. А., Тимофеев В. Н.** Применение нитевидных первичных преобразователей в термоконвективных газовых расходомерах. № 1.
- Штырлин А. Ф.** Коллоидные электроракетные двигатели для космических микроаппаратов. № 9.

#### МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

- Желонкин А. И.** Молекулярно-электронные преобразователи неэлектрических сигналов нанометрового уровня. № 12.
- Хворостов С. А.** Влияние автономного микроробота "Электронный нормализатор" на состояние углеводного и липидного обмена у больных сахарным диабетом. № 12.

#### СПРАВОЧНЫЕ СТРАНИЦЫ

- Лучинин В. В., Мальцев П. П.** О термине "микросистемная техника" в русском и английском языках. № 2.
- Яшин К. Д., Лацапнёв Е. В.** Англо-русский терминологический справочник по микро- и наносистемной технике. № 1—12.

#### СТРАНИЧКА РФФИ. № 1—10.

#### НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ. № 1—12.

# CONTENTS

**Bocharov L. Yu., Ivanov A. A., Maltsev P. P.** *About Foreign Military Programs Exploiting Nanotechnologies* . . . . . 2

World volumes of the state investments into researches and development are considered in the field of technologies. The structure of plans and dynamics of financing of research and development is represented in the field of the technologies which are carried out in interests of the Department of Defense (USA). The examples of achievements received during realization of military programs in the field of nanotechnologies are resulted.

**Novikov Yu. A., Rakov A. V., Todua P. A.** *Nanometrology in Nanotechnologies* . . . . . 11

The peculiarities of nanotechnology caused the birth and development of new serious direction in metrology — nanometrology. In the nanometrology, the leading role belongs to the metrology of linear measurements in the range from one nanometer to one hundred and more micrometers with the direct traceability to the primary standard of length — the meter.

**Zhelonkin A. I.** *Molecular-Electronic Converters of Nonelectrical Signals of Nanometre Level* . . . . . 20

Physical processes molecular-electronic (ME) converters, using regularities of formation, distribution and carrying the charges on the boundary of solid and fluid phases at convective moving a liquid have define a different touch system building. Consider main information directions of molecular electronics, are bring main methods a syntheses and analysis and features (ME) converters of nonelectrical signals of small energy level.

**Khvorostov S. A.** *The Impact of Autonomous Microrobot "Electronic Normalizer" upon the Condition of Carbohydrate and Fatty Metabolism at the Patients from Diabetes* . . . . . 26

The results of use of microrobot "Electronic normalizer" which produced electrochemical process in liquid medium of organism for treatment of patients from diabetes are described.

**Kozakov A. T., Nikolskii' A. V., Eremkin V. V., Smotrakov V. G.** *The Polarization Phenomena in Materials with Metastable Electrical Polarization in a View of Effect at Anomalous Electron Emission* . . . . . 29

The phenomenon of an anomalous electron emission (AEE) originally detected on single-crystal surfaces of ferroelectrics with electret properties, is explored on ceramics of  $PbTiO_3-CaTiO_3$  and  $PbTiO_3-PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$  solid solution systems. It is shown, that in ceramics of the specified compositions AEE is radiated by the grain boundaries determining many important electrophysical parameters of ceramics.

**Darintsev O. V., Migranov A. B.** *The Assembly Process of Hybrid MEMS on the Basis of Three-Dimensional Reconstruction of the Technological Environment Condition* . . . . . 36

Problems of the organization of a visual feedback at realization technological processes of assembly hybrid MEMS are considered. The opportunity of use of three-dimensional reconstruction of the technological environment condition for expansion information support traditional feedback channels is shown.

**Aristov V. V., Mordkovich V. N., Maltsev P. P.** *"Silicon-on-Insulator" Technology in Microsystems* . . . . . 41

This paper discussed the prospects of "Silicon — On-Insulator" (SOI) technology in creation of microsystems with different function (such as sensors sensitive elements and ASIC, microelectromechanical systems, microfotonics elements) and describes the successful examples of practical SOI technology realization in microsystems.

**Ageichenko A. S., Tochitsky Ja. I., Vasiliev A. A., Yesman V. M.** *Accuracy of the Photolithography Processes and Photolithography Equipment* . . . . . 47

Basic parameters of micro- and nanotechnology depends on geometric accuracy of the structure formation processes, which are determined by the accuracy of the photolithography processes and equipment. Between the two parameters: accuracy of feature size (CD) and overlay error, overlay error is the decisive one. In this article methods to reduce this error in photolithography and photolithography equipment are discussed.

**Arzhadeeva E. A., Moiseev P. D., Malykh V. N.** *The Programmable Widerange Pulse Shaper With the Use of "System-on-Chip" Technology in Electronic Measuring Devices* . . . . . 52

New opportunities of electronic design automation development with use of "system on chip" technology are viewed in this article. The design technology route of the soft IP-core of a pulse shaper is given, opportunities in support of core's implementation parameters as reprogrammable logic integrated circuit and as the Application Specific Integrated Circuit (ASIC) are compared. Examples of its implementation are given on the base of macros library of Field Programmable Gate Array (FPGA) Spartan-3 with use of graphic interface ISE 7.1i and with use of Verilog behavioral model. The example of electronic design implementation — the pulse generator is given. Achievable characteristics and an errors are proved. Authors consider, that in this article the following positions and results are new: the behavioral model of the pulse shaper is developed, the soft IP-core implemented, functional and timing parameters of IP-core are verified in silicon and in electronic design automation structure.

**Kostov E. G., Kamyshlov V. F.** *Fast Microelectromechanical Micro-Valve* . . . . . 57

It is considered the operational principle of a microelectromechanical micro-valve, based on the use of the effect of an electrostatic rolling of metallic films on the surface of a ferroelectric. These micro-valves, created by means of microelectronic technology, differ in high operating speed (microsecond range), capability to maintain a high pressure drop, manufacturability. Theoretical and experimental data, that characterize the operating process of the micro-valve, are given.

**Lukianov V. V.** *Strapdown INS on the Basis of MEMS Sensors* . . . . . 60

In article the review of the new small-sized integrated inertial systems on micro-electromechanical sensors, their characteristics and variants or application in resulted. Systems are developed by employees of MSTU n.a. Bauman, under the characteristics have no analogues in the world market. Now the batch production of such systems is adjusted.

**For foreign subscribers:**

*Journal of "NANO and MICROSYSTEMS TECHNIQUES" (Nano- i mikrosistemnaa tehnika, ISSN 1813-8586)*

*The journal bought since november 1999.*

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

**ISSN 1813-8586.**

**Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(495) 269-5510.**

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

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

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

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

Сдано в набор 02.10.2006. Подписано в печать 09.11.2006. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 8,82. Уч.-изд. л. 11,19. Заказ 1811. Цена договорная

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