

**МСТ**

# МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

**№ 10 ◆ 2004****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.  
ISSN 1684-6419**Главный редактор**  
Мальцев П. П.**Зам. гл. редактора**  
Лучинин В. В.**Редакционный совет:**  
Аристов В. В.  
Васильев В. В.  
Гапонов С. В.  
Каляев И. А.  
Климов Д. М.  
Лифшиц В. Г.  
Мокеров В. Г.  
Никитов С. А.  
Чаплыгин Ю. А.**Редакционная коллегия:**  
Антонов Б. И.  
Астахов М. В.  
Белоус А. И.  
Быков В. А.  
Васильев А. А.  
Волчихин В. И.  
Горнев Е. С.  
Градецкий В. Г.  
Журавлев П. В.  
Захаревич В. Г.  
Кальнов В. А.  
Карякин А. А.  
Кузин А. Ю.  
Мокров Е. А.  
Норенков И. П.  
Панич А. Е.  
Панфилов Ю. В.  
Петросянц К. О.  
Петрунин В. Ф.  
Путилов А. В.  
Пятышев Е. Н.  
Сауров А. Н.  
Сигов А. С.  
Станкевич В. Г.  
Старостин А. К.  
Степанов Ю. И.  
Сухопаров А. И.  
Телец В. А.**Отв. секретарь**  
Лысенко А. В.**Редакция:**  
Безменова М. Ю.  
Григорин-Рябова Е. В.  
**Учредитель:**  
Издательство "Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭЛЕМЕНТЫ НАНО- И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

- Иванов А. А., Мальцев П. П. Микросистемная техника — основа научно-технической революции в военном деле . . . . . 2  
Васильев А. А. Микромощные полупроводниковые сенсоры на тонких диэлектрических мембранных . . . . . 7

### НАНОТЕХНОЛОГИЯ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

- Мокеров В. Г. Гетероструктурная СВЧ электроника — новые перспективы наноэлектроники . . . . . 13  
Карагусов В. И. Нанокриогенные технологии . . . . . 15

### КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

- Драгунов В. П. Нелинейная динамическая модель упругого элемента микромеханических систем . . . . . 23

### ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

- Кульчин Ю. Н., Каменев О. Т., Петров Ю. С. Восстановление распределения поля амплитуды поперечных колебаний поверхности с использованием распределенной волоконно-оптической измерительной сети . . . . . 30

### МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

- Вагин М. Ю., Карякин А. А. Электрохимические сенсоры для прямой регистрации аффинных взаимодействий на основе самоорганизующихся слоев молекул ПАВ . . . . . 35  
Козлов В. А., Терентьев Д. А. Коррекция частотной характеристики молекулярно-электронного акселерометра вращательных движений в области инфразвуковых частот . . . . . 41

### СТРАНИЧКА РФФИ

- Краткие сведения о редакционной коллегии журнала "Микросистемная техника" . . . . . 47  
Contents . . . . . 48

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

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

#### ПОДПИСКА:

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

# ЭЛЕМЕНТЫ НАНО- И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 621.38

**А. А. Иванов**, канд. техн. наук, с. н. с.,  
Управление начальника вооружения  
Вооруженных Сил Российской Федерации,  
**П. П. Малыцев**, д-р техн. наук, проф.,  
Секция прикладных проблем  
при Президиуме РАН

## МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА — ОСНОВА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ В ВОЕННОМ ДЕЛЕ

*Рассматриваются вопросы развития вооружения и военной техники, связанные с созданием нового класса вооружения — микросистем военного назначения.*

Анализ опыта локальных войн и вооруженных конфликтов показывает, что гарантией обеспечения решающего превосходства над вероятным противником в военной сфере является высокий уровень военно-технического развития страны. При этом революционные военно-технические прорывы коренным образом определяют направления развития различных областей военного дела.

Одним из перспективных направлений развития вооружения и военной техники является создание нового класса вооружения — микросистем военного назначения.

Характерной чертой мирового технологического развития последнего десятилетия является интеграция достижений в области электроники, механики, информатики и измерительной техники, объединенных тенденцией к миниатюризации. Достижения в области планарных субмикрометровых технологий микроэлектроники и материаловедения сделали возможным разработку и массовое производство микросистемной техники [1].

В настоящее время мировой рынок микросистемной техники (МСТ) является очень динамичным, обеспечивающим ежегодный прирост продукции порядка 20 % (рис. 1, см. третью сторону обложки). Огромное число университетов и коммерческих компаний США, Японии, стран Европейского Союза и Юго-Восточной Азии, сконцентрировав усилия на развитии технологий МСТ, открыли широчайший спектр их возможного применения. На эти цели в США уже израсходовано около 10 млрд долл. В странах ЕС промышленные фирмы ежегодно выделяют свыше 200 млн долл. Это позволило ряду зарубежных стран успешно завершить к настоящему моменту стадию поисковых

исследований и целенаправленно приступить к решению задач по адаптации, унификации и стандартизации элементной базы МСТ для эффективного использования в разрабатываемой аппаратуре нового поколения.

Принципиальным аспектом применения технологий микросистемной техники в вооружении и военной технике (ВВТ) является возможность реализации новых прогрессивных форм ведения боевых, разведывательных и обеспечивающих действий с использованием автономных и полуавтономных микроминиатюрных средств скрытого наблюдения и поражения живой силы и объектов противника, создания надежных и малоуязвимых средств разведки, освещения обстановки, связи, навигации, целеуказания и управления оружием, радиоподавления, охраны.

Управление перспективных исследований Министерства обороны США (DARPA) с 1998 г. развернуло программу "Microelectromechanical Systems" (MEMS) по созданию микросистем для оснащения войск [2]. В основе лежат междисциплинарные исследования и разработки как перспективных микроэлектромеханических систем приборов, так и технологий с целью демонстрации инновационных систем концепций. Исследования в рамках программы проводятся по следующим основным направлениям: оптика и отображение, инерционные приборы, высокочастотные компоненты и связь, матрицы датчиков и исполнительных механизмов. Выполнение проектов по программе осуществляют около 50 фирм и университетов США. При этом Министерство обороны США ежегодно выделяет на развитие MEMS около 35 млн долл.

Первыми результатами реализации данной программы явились создание и принятие на вооружение отдельных устройств на основе микросистемной техники для авиационно-космической техники и ракетно-артиллерийского вооружения. В ходе антитеррористической операции на территории Афганистана спецподразделения армии США активно использовали малогабаритные переносные мобильные роботы *Hermes* для проведения общей разведки, поиска и обезвреживания противопехотных мин.

Имеющиеся в России технологическая база, научно-технический и кадровый потенциалы также позволяют проводить скоординированные действия как в области научных исследований, так и в сфере промышленного производства и использования объектов МСТ.

В конце 2001 г. интерес к МСТ в России значительно возрос, и ряд федеральных органов исполн

нительной власти (Минпромнауки России, Минобразования России, РАСУ) открыли более 150 научно-исследовательских работ по данной тематике. В этих работах рассмотрен широкий спектр вопросов, связанных с обоснованием выбора элементной базы, материаловедческим и технологическим базисами создания микросистемной техники гражданского назначения.

Однако, как показали проведенные исследования, к МСТ военного назначения предъявляется ряд специфических тактико-технических и эксплуатационных требований. В первую очередь, это связано с назначением объектов микросистемной техники, а также особенностями их функционирования в экстремальных условиях эксплуатации (высокие температуры, агрессивные среды, радиация). При этом требует отдельного рассмотрения комплекс проблем, связанных с боевым применением микросистемной техники и защитой от использования МСТ вероятным противником.

В связи с этим в Минобороны России при формировании и реализации военно-технической политики предусматривается отдельное направление работ по созданию микросистем военного назначения, охватывающее все стадии жизненного цикла образцов ВВТ (от фундаментальных и поисковых исследований до сопровождения эксплуатации).

Важность и актуальность работ по данной тематике определили внесение проблем по созданию технологий микросистемной техники в Перечень критических технологий Российской Федерации и Перечень базовых и критических военных технологий на период до 2010 года, утвержденные Президентом Российской Федерации.

В настоящее время основными направлениями работ по данной тематике, проводимыми по заказу Минобороны России, являются:

- комплексная программа фундаментальных и поисковых исследований, в ходе выполнения которой создается научно-теоретический задел для развития микросистем и создания микроботов, микромашин и микросистем военного назначения;
- комплексная целевая программа, основной задачей которой является проведение прикладных исследований по развитию научно-технической и технологической баз микросистемной техники, созданию компонентной базы микросистемной техники, узлов и изделий военного назначения на ее основе, а также разработке нового класса вооружения — микросистем военного назначения;
- комплекс исследований, направленных на создание изделий МСТ в обеспечение разработки приоритетных образцов ВВТ нового поколения.

Говоря о понятии "микросистемная техника военного назначения", мы подразумеваем совокупность компонентной базы, узлов и изделий, а также микроразмерных робототехнических комплексов, способных выполнять широкий круг военно-технических задач (от поражения противника до боевого, тылового и технического обеспечения действий частей и подразделений Вооруженных Сил Российской Федерации). Классификация микросистем военного назначения приведена на рис. 2.

Образцы вооружения и военной техники, создававшиеся в 1980—1990-х гг. и принятые в настоящее время на вооружение, проектировались, как правило, без учета возможности применения в их конструкции узлов и изделий микросистемной техники. Этим и объясняется достаточно низкий модернизационный потенциал МСТ для данных образцов ВВТ. Реализация преимуществ применения узлов и изделий микросистемной техники (прежде всего малые массогабаритные характеристики) неизбежно потребует проведения значительных конструктивных доработок образцов ВВТ (в том числе и корпусов надводных кораблей и подводных лодок, планеров летательных аппаратов, отделений основных боевых танков). В связи с этим изделия микросистемной техники могут быть реализованы прежде всего при проведении глубокой модернизации образцов ВВТ в направлении использования в составе бортового оборудования микросистем связи, навигации, ориентации и управления движением.

Важным прикладным направлением изделий МСТ является использование узлов и изделий микросистемной техники в создаваемых в настоящее время образцах ВВТ нового поколения. Уже на этапе разработки этих перспективных образцов возможно внедрение отдельных базовых технологий создания компонентов, узлов и изделий МСТ. При этом открываются новые широкие области применения МСТ: элементы конструкции, силовая установка, бортовое оборудование, система вооружения.

Наиболее перспективным направлением использования МСТ является создание принципиального нового класса вооружения — микросистем военного назначения наземного, морского, воздушного и космического базирования. Это позволит перейти к новым прогрессивным формам ведения боевых, разведывательных и обеспечивающих действий с использованием автономных и полуавтоматических микроминиатюрных средств скрытого наблюдения и поражения живой силы и объектов противника, создания надежных и малоуязвимых средств разведки, освещения обстановки, связи, навигации, целеуказания и управления оружием, радиоподавления, контроля и диагностики состояния объектов ВВТ.

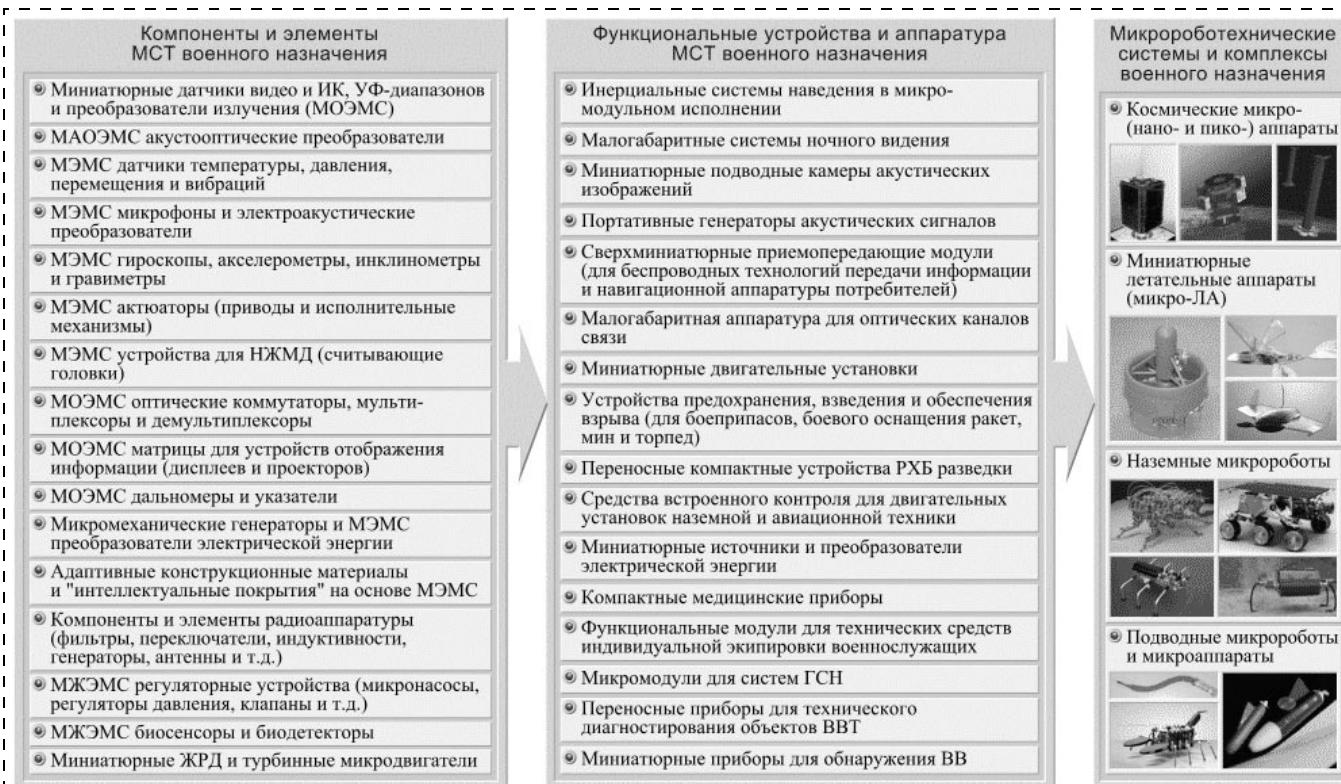


Рис. 2. Микросистемная техника военного назначения

В качестве основных прорывных направлений системы вооружения помимо создания микроразмерных робототехнических комплексов в Минобороны России рассматриваются следующие перспективные программы:

- ◆ создание распределенных систем сбора и обработки информации поля боя на основе микроминиатюрных автономных датчиков, имеющих малые массогабаритные характеристики (объем датчика — 1 мм<sup>3</sup>) и низкое энергопотребление (уровень потребляемой датчиком мощности — не более 10 мкВт), а также отличающихся высокой информативностью и низкими демаскирующими признаками;
  - ◆ разработка микроразмерных систем военного назначения (изделий МСТ экипировки военнослужащего, микробоеприпасов, микросистем связь и навигации и др.), направленная на существенное повышение эффективности боевых действий частей и подразделений в населенных пунктах, а также в условиях горно-лесистой местности;
  - ◆ создание с применением изделий микросистемотехники "интеллектуальных" конструкций образцов ВВТ (планеров летательных аппаратов, корпусов надводных кораблей и подводных лодок), позволяющих значительно повысить их технические (аэродинамические, гидродинамические) характеристики;
  - ◆ создание на базе микродатчиков различного физического принципа действия распределенных систем технической диагностики "критических" (с точки зрения надежностных характеристик) узлов и систем вооружения и военной техники, позволяющих перейти к новой стратегии эксплуатации ВВТ по состоянию, что обеспечит продление ресурса (сроков службы) образцов (комплексов, систем) и, как следствие, снижение эксплуатационных расходов.
- В настоящее время в Минобороны России развернут комплекс работ по созданию микросистем военного назначения. При этом в качестве объектов исследований рассматриваются как компонентная база, узлы и изделия МСТ для образцов вооружения и военной техники, так и микросистемы военного назначения. Результаты отдельных исследований приведены на рис. 3–6 (см. четвертую сторону обложки).
- Необходимо также отметить, что работы в области микросистемной техники имеют огромную социально-экономическую значимость. Это прежде всего обуславливается рядом преимуществ технических систем, построенных по мехатронному принципу: надежность, миниатюрность, адаптивность, интеллектуальность.
- Уже в настоящее время микросистемная техника нашла широкое применение в различных областях экономики: от автомобилестроения (функцио-

нальные системы безопасности автотранспортных средств) до отраслей строительства и жилищно-коммунального хозяйства (распределенные системы контроля потерь тепла, сейсмодатчики фундамента и др.) Возможные перспективные области применения микросистемной техники гражданского, военного и специального назначения представлены в табл. 1.

В настоящее время исследования в области создания МСТ проводятся по заказам Министерства промышленности и энергетики Российской Федерации, Министерства образования и науки Российской Федерации, Федерального агентства по промышленности. Кроме того, по данной тематике реализуются проекты в Российской академии наук и Российском фонде технологического развития. Основные даты развития микросистемной техники в Российской Федерации приведены в табл. 2.

Наиболее значимые работы в области создания МСТ осуществляются в рамках:

- Федеральной целевой программы "Национальная технологическая база" (2002—2006 годы);
- Федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники" (2002—2006 годы);
- научно-технической программы Минобразования России "Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям развития науки и техники";
- исследований, выполняемых по грантам международной организации NEXUS (орган Европейской Комиссии).

Учитывая высокую заинтересованность различных федеральных органов исполнительной власти в проведении работ в области микросистемной техники, а также большое число программ, выпол-

Таблица 1

**Области применения микросистемной техники гражданского, военного и специального назначения**

Направления разработок	Назначение	
	Гражданское	Военное, специальное
Компоненты и узлы микромеханики, микроопто-механических и микроэлектромеханических систем		Миниатюрная управляемая элементная база
		Миниатюрные управляемые конденсаторы, резисторы, зеркала, модуляторы, элементы микроприводов, микротурбины, микродвигатели, микрогенераторы, оптомеханические интегральные схемы, микромеханические устройства энергообеспечения
Микросистемы связи, слежения, навигации, ориентации и управления движением		Гражданское приборостроение Специальное приборостроение
		Миниатюрные системы связи, слежения, навигации, ориентации и управления движением
		Системы ориентации на базе микромеханических датчиков (акселерометры, микрогироскопы, датчики угловой скорости), системы управления движением с использованием микромеханических устройств, совмещенные со спутниковыми ГЛОНАСС (GPS) системами навигации, модули контроля положения антенных фазированных решеток, системы катапультирования, оптико-микромеханические системы слежения и др.
Распределенные микросистемы сбора данных, приема, обработки и передачи информации		Автомобильный, авиационный и железнодорожный транспорт Образцы (комплексы, системы) ВВТ, средства управления и связи, средства боевого, технического и тылового обеспечения
Микроробототехнические и микrorазмерные системы военного назначения		Системы охраны и наблюдения, системы экологического мониторинга, системы жилищно-коммунального хозяйства, устройства управления потоками жидкости и газа для авиа- и кораблестроения
Микроробототехнические и микrorазмерные системы военного назначения	Технологические микросистемы	Миниатюрные аналитико-диагностические чипы и микрохимические реакторы
		Биотехнология, медицина, нефтехимия, пищевая промышленность
	Микроинструмент	Микроманипуляторы, микротехнологические устройства Медицина, микробиология, микроэлектроника
	Миниатюрные робототехнические системы	Микророботы для диагностики: медицина, ядерная энергетика, химическая промышленность Микророботы для выполнения задач боевого, технического и тылового обеспечения

Таблица 2

## Основные даты развития микросистемной техники в Российской Федерации

Годы	Российская академия наук (РАН). Российский Фонд фундаментальных исследований (РФФИ)	Министерство промышленности и энергетики Российской Федерации. Министерство обороны Российской Федерации	Министерство науки и образования Российской Федерации	Общественная поддержка — журнал "Микросистемная техника" (МСТ)
1996	—	В Перечне критических технологий Федерального уровня появилось направление "Микросистемная техника"	—	—
1997	Проекты в рамках РФФИ	Разработан проект Комплексной программы МСТ	—	—
1998	Проекты в рамках РФФИ	—	—	—
1999	Международный симпозиум "Микророботы, микромашины и микросистемы", ИПМ РАН, г. Москва	Утверждена Комплексная программа МСТ	—	Вышел первый номер журнала "МСТ" (индекс 79493 по каталогу "Роспечати")
2000	—	Открыто финансирование работ в рамках ГОЗ-2000	Международная конференция "Сенсоры и микросистемы", СПбГЭТУ, г. Санкт-Петербург. Открыта специальность "Микросистемная техника" — 201900	Открыт сайт журнала "МСТ" в Интернет <a href="http://www.microsystems.ru">www.microsystems.ru</a>
2001	Международная конференция "Микро- и наноэлектроника", ФТИАН, г. Москва	Российским Фондом технологического развития проведен конкурс в августе—декабре (3 проекта)	—	Создан электронный архив журнала "МСТ" за 1999—2000 гг. на лазерном диске
2002	Международный семинар "Atomic force microscope", ИФМ РАН, г. Нижний Новгород	В Перечень критических технологий Российской Федерации до 2010 года включено направление "Микросистемная техника". РАСУ в феврале—марте проведен конкурс (около 30 проектов)	Минобразования России в марте—апреле провело конкурс (около 130 проектов). Международная конференция "Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники" ТРТУ, г. Таганрог. Международная конференция "Электроника и информатика" МГИЭТ (ТУ), Зеленоград	Открыта английская версия сайта журнала "МСТ" в Интернет <a href="http://www.microsystems.ru">www.microsystems.ru</a> . Размещен электронный архив журнала "МСТ" за 1999—2002 гг. на сайт в Интернет. Создан электронный архив журнала "МСТ" за 1999—2002 гг. на лазерном диске
2003	Международный семинар "Atomic force microscope", ИФМ РАН, г. Нижний Новгород. Международный симпозиум "Микророботы, микромашины и микросистемы", ИПМ РАН, г. Москва	—	Минобразования России провело конкурс на 2003—2004 гг. (около 100 проектов)	—
2004	Научная сессия "Микроэлектромеханические системы: технология, применение", ОИТВС РАН, г. Москва. Международный семинар "Atomic force microscope", ИФМ РАН, г. Нижний Новгород	Утверждена Комплексная целевая программа МСТ	Международная конференция "Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники", ТРТУ, г. Таганрог	Молодежная школа "Микросистемная техника—2004", ЦНИИРТК, НИИМВС ТРТУ и журнал "МСТ"

няемых государственными заказчиками по данной тематике, мы считаем, что важным аспектом успешной реализации задач проводимых работ является межведомственная координация проводимых исследований. При этом выбор и обоснование приоритетных направлений работ, а также формирование предложений в государственные оборонные заказы необходимо осуществлять с учетом результатов, полученных при выполнении отмеченных выше программ.

В заключение хотелось бы отметить, что успешное проведение работ в области развития микро-

системной техники во многом определит облик системы вооружения Вооруженных сил Российской Федерации в XXI веке.

## Список литературы

1. Вернер В. Д., Мальцев П. П., Сауров А. Н., Чаплыгин Ю. А. Синергетика миниатюризации: микроэлектроника, микросистемная техника, наноэлектроника // Микросистемная техника. 2004. № 7. С. 23—29.
2. Бочаров Л. Ю., Мальцев П. П. Состояние и перспективы развития микроэлектромеханических систем за рубежом // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 41—46.

УДК 53.087.92:621.3.049/77

**А. А. Васильев**, канд. физ.-мат. наук,  
РНЦ "Курчатовский Институт",  
Институт молекулярной физики

## МИКРОМОШНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СЕНСОРЫ НА ТОНКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕМБРАНАХ

*Рассмотрены варианты технологии, которые позволяют изготовить полупроводниковые и термокатализические сенсоры горючих и токсичных газов с минимальной потребляемой мощностью: чисто толстопленочная технология, изготовление тонких диэлектрических мембран на основе оксида алюминия (TAF) и комбинация технологии кремниевого микромашининга с толстопленочным нанесением газочувствительных слоев. Два последних метода позволяют получить сенсоры, применимые в карманных приборах и приборах, длительное время работающих автономно.*

### Введение

Быстрое развитие промышленности и транспорта привело в последние десятилетия к резкому увеличению содержания различных газов-загрязнителей в воздухе. К числу этих газов относятся прежде всего СО, углеводороды (метан, пропан, пары бензина), аммиак, оксиды азота, озон и др. Они представляют опасность как с экологической точки зрения, так и с точки зрения возможности вызова техногенных катастроф (взрывов, пожара, массовых отравлений и т. д.).

Однако развитие науки и промышленности наряду с потенциальными опасностями дает также и новые средства защиты и предупреждения аварий на предприятиях. Одним из таких средств являются сенсоры, чувствительные к метану, угарному газу и другим горючим и токсичным газам. В последнее время появилось большое число таких датчиков. Большинство из них имеет значительные размеры и потребляет достаточно высокую мощность для достижения температур, необходимых для оптимальной чувствительности сенсора. Поэтому важной задачей разработчиков стало конструирование и испытание сенсоров, пригодных для применения в переносных и карманных приборах, а также в приборах, длительное время работающих от автономных источников питания.

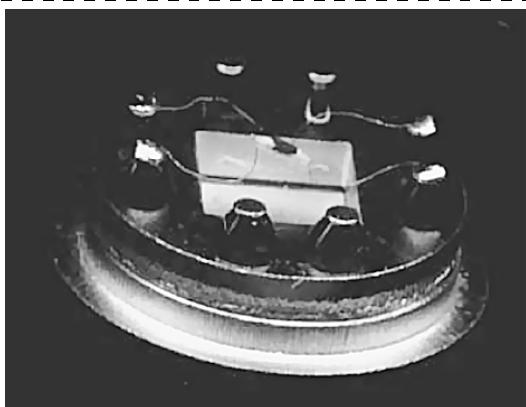
Изучение путей уменьшения мощности, потребляемой полупроводниковыми металлооксидными и термокатализическими сенсорами, ведется с 1998 г. совместно сотрудниками РНЦ "Курчатовский Институт" и Istituto Trentino di Cultura (Италия).

Полупроводниковые газочувствительные элементы (сенсоры) широко используются для определения концентраций горючих газов в воздухе. Принцип действия этих чувствительных элементов основан на изменении концентрации носителей тока (обычно электронов) и, следовательно, соответствующем изменении сопротивления металлооксидного полупроводника под действием хемосорбированного горючего газа.

Полупроводниковые чувствительные элементы для горючих газов обычно работают при сравнительно высоких температурах. Эта температура неодинакова для различных газов — от 250 °C (водород) до 500 °C (метан). Необходимость нагрева сенсора предполагает использование нагревательных элементов для поддержания рабочей температуры. Однако многие массовые применения газочувствительных элементов, например, в работающих от батарей газосигнализаторах или наиболее интересных с коммерческой точки зрения пожарных детекторах [1, 2], требуют минимизации нагревающей мощности. Желательно, чтобы продолжительность работы таких устройств с батарейным питанием составляла несколько лет. Такая продолжительность не может быть получена при использовании традиционных тонко- или толстопленочных сенсоров [3].

В предварительных экспериментах мы минимизировали потребляемую мощность металлооксидных газочувствительных элементов, изготовленных по толстопленочной технологии. Были получены минимальные геометрические габаритные размеры (а следовательно, и минимальная потребляемая мощность), достижимые с использованием обычной толстопленочной технологии. Размеры чипа чувствительного элемента составляют приблизительно 1,4 × 0,3 × 0,08 мм. Это соответствует оптимальной мощности при детектировании метана, равной приблизительно 130 мВт [4]. Внешние выводы чипа были сделаны из платиновой проволоки диаметром 20 мкм, сочетающей высокую стойкость при рабочей температуре сенсора со сравнительно низкой теплопроводностью. Внешний вид сенсора, изготовленного по толстопленочной технологии, представлен на рис. 1.

Дальнейшее уменьшение потребляемой мощности может быть получено при использовании комбинированной технологии, включающей микромашинные этапы и нанесение толстопленочных чувствительных слоев сенсора. Микромашинная технология в этом случае применяется для изготовления нагревательных элементов и других частей газового сенсора, требующих высокого геометрического разрешения, типичного для кремниевой микроэлектроники. Эта методика позволяет также серийно производить чувствительные элементы со



**Рис. 1.** Внешний вид полупроводникового газового сенсора, смонтированного в корпусе ТО-8. Диаметр корпуса равен 11 мм, длина чипа около 2 мм

встроеннымми электронными схемами. Толстопленочные материалы для газочувствительных слоев имеют очевидное преимущество по сравнению с тонкими пленками, так как они гораздо более чувствительны и стабильны.

### Результаты и обсуждение

Мы рассмотрели варианты технологии, позволяющие изготовить полупроводниковые и термокаталитические газовые сенсоры с минимально возможной потребляемой мощностью. Рассмотрены два возможных способа изготовления сенсоров: с помощью толстопленочной технологии и технологии микромашининга. Для обоих вариантов были промоделированы процессы теплообмена чипа микроэлектронного газового сенсора с окружающей средой.

**Толстопленочный полупроводниковый сенсор и сенсор на мемbrane из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .** При оптимизации топологии полупроводникового газового сенсора, изготовленного полностью по толстопленочной технологии, должна приниматься во внимание вся совокупность свойств материалов и возможности толстопленочной технологии изготовления чипа сенсора. Для изготовления чипа полупроводникового сенсора использовали толстопленочные материалы на основе диоксида рутения и платины (нагреватель), оксида олова (подложка) и диоксида олова (чувствительный слой). Для монтажа чипа использовали платиновые провода диаметром 20 мкм. Принимали во внимание минимальные размеры элементов конструкции, которые могут быть изготовлены с помощью толстопленочной технологии, — около 200 мкм.

Расчет трехмерных тепловых полей в полупроводниковом газовом сенсоре, изготовленном с использованием толстопленочной технологии, про-

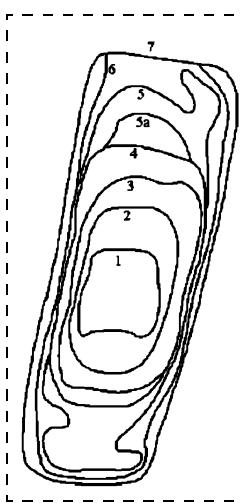
водили с помощью программы КОНЭЛ, разработанной в НПО "Платан".

Результаты этих расчетов показали, что минимальная мощность, потребляемая сенсором, достигается при использовании чипа с отношением длины к ширине не менее 6 и платиновых проводов (в качестве токоподводов) длиной не менее 4 мм. В этом случае потери теплоты за счет теплопроводности проводов и за счет теплообмена с окружающим воздухом оказываются примерно одинаковыми. При этом тепловое поле на поверхности чипа в области расположения чувствительного слоя оказывается достаточно однородным, различие в температуре в области расположения газочувствительного слоя не превышает 5 °С.

При выполнении всех этих условий возможно получить чипы сенсоров, потребляющие при 450 °С не более 130 мВт. На рис. 1 представлен внешний вид сенсора в корпусе ТО-8, а на рис. 2 — распределение температур на его поверхности.

Для дальнейшего уменьшения мощности, потребляемой полупроводниковым сенсором, было предложено использовать в качестве теплоизолирующего и несущего элемента конструкции тонкую диэлектрическую мембрану из оксида алюминия [5, 6]. Эта мембрана наклеивается с помощью стекла на керамическую пластину с отверстиями. На поверхности мембранны формируется тонкопленочный нагреватель и наносится толстопленочный чувствительный слой. Преимуществом такого способа изготовления сенсоров по сравнению с сенсорами, изготовленными по технологии кремниевого микромашининга, которые будут описаны ниже, является простота процесса и возможность производства средних по объему партий приборов (в пределах нескольких миллионов штук в год).

В результате оптимизации тепловых процессов были выбраны размеры сенсора на основе мембран из оксида алюминия. Диаметр мембраны составляет



**Рис. 2.** Распределение температур на поверхности чипа полупроводникового сенсора размером 1,8 × 0,5 мм, снабженного золотыми проволочными выводами диаметром 30 мкм. Цифрами обозначены изотермы:

1 — 108 °С; 2 — 104 °С; 3 — 101 °С;  
4 — 93 °С; 5 — 93 °С; 5a — 89 °С; 6 —  
84 °С; 7 — 76 °С

3 мм, размер тонкопленочного платинового нагревателя —  $300 \times 300$  мкм. При этом мощность, потребляемая прибором при рабочей температуре  $450^{\circ}\text{C}$ , равна примерно 60 мВт, а постоянная времени разогрева до рабочей температуры — около 50 мс.

Анализ полученных экспериментальных данных по теплообмену полупроводникового чипа на основе тонкой мембранны из оксида алюминия показал, что мощность, рассеиваемая за счет теплопроводности мембранны, составляет около 40 мВт.

Для тонкопленочного платинового нагревателя, полученного напылением платины через маску и имеющей ширину токопроводящих дорожек 40 мкм, получена удовлетворительная стабильность при  $450^{\circ}\text{C}$ . Дрейф сопротивления нагревателя не превышает 5 % в год. На рис. 3 представлен внешний вид чипа, а на рис. 4 — экспериментально полученная зависимость потребляемой мощности от размера нагревателя.

**Сенсоры на основе кремниевого микромашининга.** Дальнейшее уменьшение мощности, потребляемой сенсором, возможно при использовании технологии кремниевого микромашининга. Это связано с тем, что оба описанных выше способа изготовления сенсоров не могут обеспечить уменьшение мощности ниже некоторого предела. Для толстопленочного сенсора такой предел составляет примерно 100—120 мВт и связан с разрешением технологии трафаретной печати. Для мембранны на основе оксида алюминия минимальная мощность сенсора, получаемая при его непрерывном нагреве до  $450^{\circ}\text{C}$ , составляет около 60 мВт, и ее дальнейшее понижение ограничивается сравнительно высокой теплопроводностью оксида алюминия.

Вместе с тем, известно, что тонкопленочные полупроводниковые металлооксидные чувствительные слои обладают меньшей стабильностью и чувствительностью по сравнению с нанодисперсными слоями, нанесенными с помощью технологии толстых пленок.

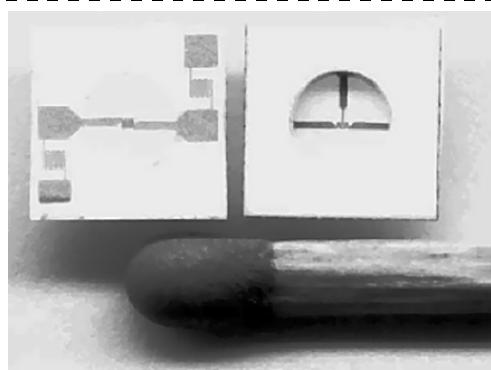


Рис. 3. Внешний вид полупроводникового чипа на основе диэлектрической мембранны из оксида алюминия

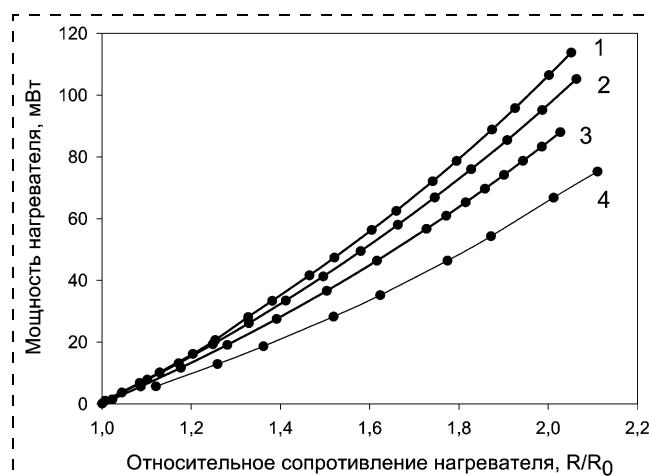


Рис. 4. Зависимость мощности, потребляемой сенсором, от размера нагревателя. Диаметр мембранны 3 мм, размер нагревателя: 1 —  $700 \times 850$  мкм ( $0,49 \text{ mm}^2$ ); 2 —  $390 \times 1000$  мкм ( $0,39 \text{ mm}^2$ ); 3 —  $270 \times 700$  мкм ( $0,19 \text{ mm}^2$ ); 4 —  $300 \times 300$  мкм ( $0,09 \text{ mm}^2$ ); значение  $R/R_0 = 2,2$  соответствует температуре  $450^{\circ}\text{C}$

Поэтому мы использовали комбинацию технологии кремниевого микромашининга, применимую для изготовления несущей диэлектрической мембранны и платинового нагревателя, с толстопленочной технологией нанесения газочувствительных слоев из нанодисперсного металлооксидного полупроводника [7, 8].

На основании результатов, полученных для толстопленочных сенсоров, был сделан вывод о том, что чувствительный элемент на тонкой диэлектрической мембранны должен быть возможно меньшего размера, в то время как сама мембранны для наилучшей теплоизоляции нагретого чувствительного слоя должна иметь большую площадь. Эта топология была заложена в расчет, который проводился с использованием пакета программ ISE SOLIDIS.

Результат расчета, представленный на рис. 5, показывает, что при фиксированном размере нагревателя для получения наименьшей мощности,

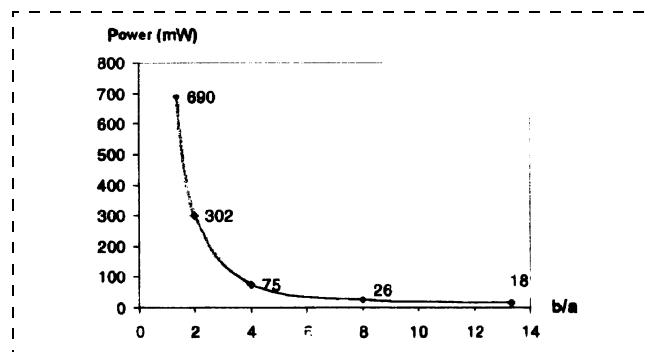


Рис. 5. Мощность, потребляемая сенсором, как функция отношения размера мембранны к размеру нагревателя. Размер нагревателя  $200 \times 200$  мкм, температура  $780$  К. Окружающая среда — воздух

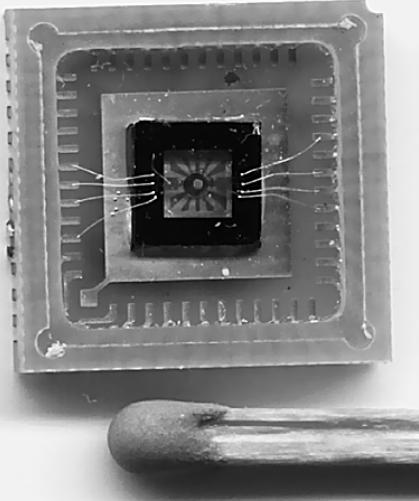


Рис. 6. Внешний вид полупроводникового сенсора на мемbrane из оксида/нитрида кремния. Сенсор смонтирован в пластиковом корпусе

потребляемой сенсором, отношение размера мембраны к размеру чувствительного слоя должно составлять не менее 10. Мембра на представляет собой многослойную конструкцию, состоящую из слоев в определенной последовательности: слой оксида кремния толщиной 500 нм (LPCVD, ТЭОС), слой стехиометрического нитрида кремния (CVD), нелегированный оксид кремния толщиной 50 нм, легированное фосфором боросиликатное стекло толщиной 400 нм и еще один слой нелегированного оксида кремния толщиной 50 нм.

Образцы чипов полупроводниковых сенсоров были изготовлены в соответствии с результатами расчета. Внешний вид прибора представлен на рис. 6. На

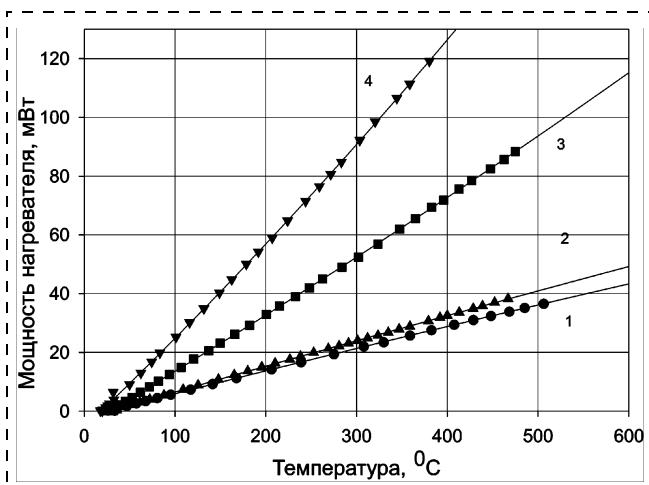


Рис. 7. Мощность нагревателя сенсора как функция температуры сенсора для нагревателей различного размера. Размер мембранны  $2 \times 2 \text{ мкм}$ . Размер нагревателя, мкм:

1 —  $250 \times 250$ ; 2 —  $350 \times 350$ ; 3 —  $750 \times 750$ ; 4 —  $1000 \times 1000$

поверхности мембранны были сформированы платиновые нагреватели. Была разработана методика нанесения платины, позволившая получить стабильные характеристики при температуре до  $850^{\circ}\text{C}$ . Эта методика состоит в том, что в качестве адгезионного подслоя первоначально наносится ацетил-акетонат платины, который при разложении образует слой платины, химически связанный с материалом подложки.

Результаты эксперимента представлены на рис. 7 и 8. При размере нагревателя, равном  $250 \times 250$  мкм, размер мембранны, обеспечивающий оптимальную мощность сенсора, равен  $2 \times 2$  мм. Дальнейшее увеличение размера мембранны нецелесообразно, так как ее прочность уменьшается, а тепловые характеристики не улучшаются.

Результаты, полученные при оптимизации тепловых характеристик тонких диэлектрических мембранны на основе оксида/нитрида кремния, были использованы для изготовления прототипов полупроводниковых сенсоров метана. Эксперимент подтвердил результаты расчета. Сенсор с нагревателем размером  $250 \times 250$  мкм в максимуме чувствительности к метану потребляет при непрерывном нагреве около 25 мВт. При этом постоянная времени нагрева чувствительного элемента до рабочей температуры составляет около 30 мс. Это означает, что при использовании импульсного нагрева сенсора со скважностью 50 может быть получена средняя мощность около 0,5 мВт. Это делает такие сенсоры конкурентоспособными по сравнению с фотоэлектронными датчиками дыма, применяемыми в противопожарных системах.

Чувствительность сенсора к метану при использовании нанодисперсного толстопленочного чув-

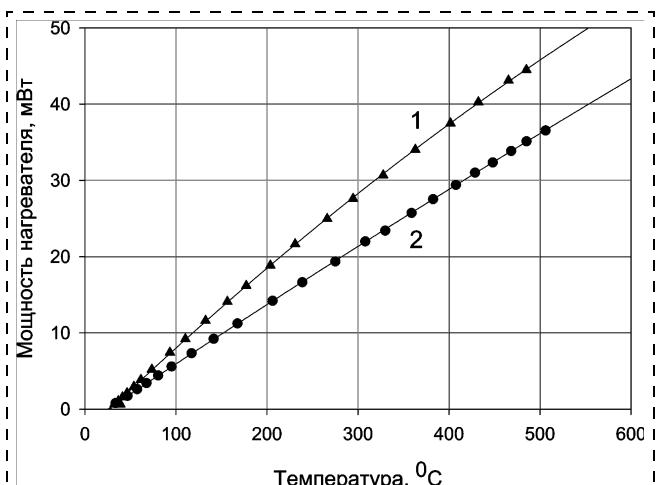


Рис. 8. Мощность нагревателя сенсора как функция температуры сенсора для мембранны различного размера. Размер нагревателя  $250 \times 250$  мкм, размер мембранны:

1 —  $1 \times 1$  мм; 2 —  $2 \times 2$  мм

ствительного материала оказалась такой же, как и у сенсоров, изготовленных методом трафаретной печати. Прочность мембран оказалась достаточной для нанесения толстопленочных чувствительных материалов.

Диоксид олова, предназначенный для получения толстопленочных чувствительных слоев, был синтезирован с использованием методики, описанной в работе [4]. Исходным веществом служил раствор сульфата олова. Выбором pH раствора в процессе осаждения можно добиться того, что диоксид олова образуется непосредственно в виде мелкодисперсного порошка. Удельная поверхность этого порошка составляет около  $55 \text{ м}^2/\text{г}$ , что соответствует размеру частиц около 20 нм. Полученный таким образом порошок диоксида олова прокаливался при  $600^\circ\text{C}$ . Чувствительный материал, предназначенный для приготовления неселективных сенсоров углеводородов, который использовался в экспериментах, описанных в настоящей статье, готовился на основе этого порошка диоксида олова. Для этого к водной суспензии порошка  $\text{SnO}_2$  добавляли хлорид палладия. Он восстанавливался муравьинокислым натрием, причем частицы диоксида олова служили центрами зародышеобразования частиц металлического палладия. После этого образовавшийся порошок, легированный палладием, тщательно промывали дистиллированной водой до исчезновения реакции на ионы хлора. Полученный материал просушивали и использовали для приготовления газочувствительных паст.

Газочувствительный порошок, рассмотренный в настоящей работе, содержит 3 % вес. палладия. Этот порошок смешивали с органическим носителем для того, чтобы придать пасте удобную для трафаретной печати вязкость. В качестве органического носителя использовали обычный для толстопленочной технологии раствор этилцеллюлозы в терpineоле.

Газочувствительную пасту наносили на поверхность мембранны трафаретной печатью и отжигали при температуре  $720^\circ\text{C}$  в течение 15 мин.

На рис. 9 представлена кривая зависимости отклика полупроводникового сенсора на 1 % метана от мощности нагревателя. Максимум отклика в этом случае наблюдается при мощности нагревателя, равной примерно 38 мВт. Применение нагревателей размером  $200 \times 300 \text{ мкм}$  позволяет снизить потребляемую мощность примерно на 20 мВт.

Концентрационная зависимость отклика сенсора представлена на рис. 10. Согласно теории, эта зависимость должна описываться корневой функцией

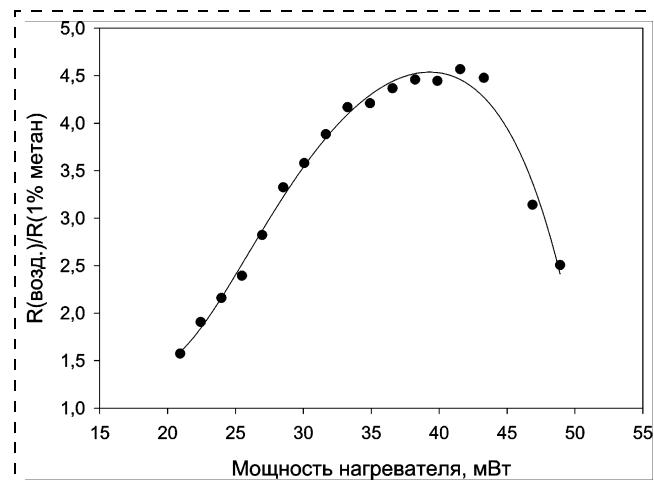


Рис. 9. Отклик мембранны газового сенсора ( $R_{\text{возд}}/R_{1\% \text{CH}_4}$ ) на 1 % метана в сухом воздухе как функция мощности нагревателя. Площадь нагретой поверхности  $200 \times 300 \text{ мкм}$

$$\sigma = \sigma_0 [\text{CH}_4]^{0,5},$$

где  $\sigma$  и  $\sigma_0$  — проводимость чувствительного слоя в газовой смеси и чистом воздухе, соответственно;  $[\text{CH}_4]$  — концентрация метана.

На самом деле, эта зависимость несколько отличается от теоретической и имеет вид

$$\sigma = \sigma_0 [\text{CH}_4]^{0,57}.$$

Это отличие связано, по-видимому, со сложным характером процесса взаимодействия метана с полупроводником и с тем, что кислород на поверхности диоксида олова сорбируется в форме как однозарядных, так и двухзарядных ионов.

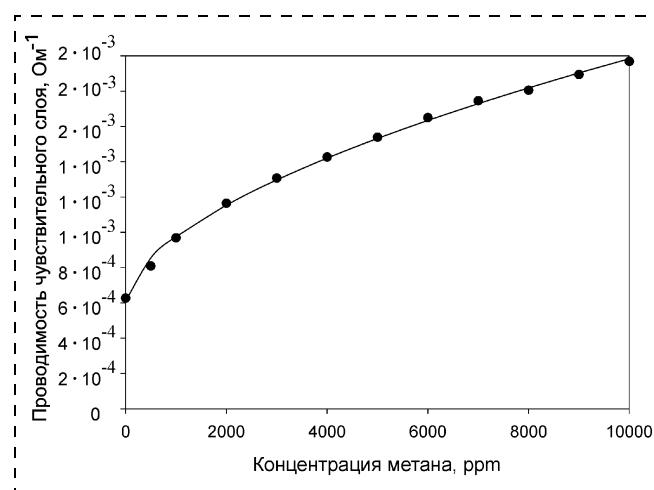


Рис. 10. Зависимость проводимости мембранны сенсора от концентрации метана в сухом воздухе. Размер нагретой области  $200 \times 300 \text{ мкм}$ , мощность 34,2 мВт. Экспериментальные точки аппроксимированы функцией  $\sigma = \sigma_0 [\text{CH}_4]^{0,57}$

**Сравнение свойств сенсоров на основе мембран SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и технологии TAF**

Сравниваемый параметр	Мембрана на основе SiO <sub>2</sub> /Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Мембрана на основе технологии TAF
Технология	CVD + анизотропное травление Si	Электролитно-искровое окисление + селективное травление Al
Толщина мембранны	~1,5 мкм	~20–30 мкм
Материал нагревателя	Pt ("химический" адгезионный слой Pt)	Pt
Адгезия Pt	Хорошая	Превосходная
Максимальная рабочая (технологическая) температура	~600 °C (~800 °C)	~600 °C (~800 °C)
Размер нагревателя (мембранны)	300 × 300 мкм (2 мм)	300 × 300 мкм (3 мм)
Мощность при 450 °C	~25 мВт	~60 мВт
Термоцикли	> 10 <sup>7</sup>	> 10 <sup>7</sup>
Тепловой отклик	~30 мс	~70 мс
Дрейф сопротивления нагревателя при 450 °C	< 5 % в год	< 5 % в год
Нанесение чувствительного слоя	Напыление, трафаретная печать	Напыление, трафаретная печать
Основные преимущества	Низкая потребляемая мощность; короткое время теплового отклика	Для рамки и мембранны используется один материал; низкая цена при среднем объеме производства (10 <sup>3</sup> –10 <sup>7</sup> /год)
Основные недостатки	Требует очень большого объема производства (> 10 <sup>7</sup> /год)	Относительно высокая потребляемая мощность
Применение	Металлооксидные, термокатализитические сенсоры, датчики потока газа	Металлооксидные, термокатализитические сенсоры, датчики потока газа, лямбда-зонды

**Заключение**

Результаты сравнения двух технологий изготовления газовых сенсоров — на основе мембран из оксида алюминия (TAF) и на основе мембран из оксида/нитрида кремния — приведены в таблице. Каждая из этих технологий имеет свои области применения. Главное преимущество мембран из оксида алюминия состоит в том, что для их изготовления не требуется использование дорогостоящего микроэлектронного оборудования, и поэтому даже среднее по объему производство становится выгодным. Дело в том, что мировая потребность в газовых сенсорах в настоящее время не превышает несколько десятков миллионов приборов в год. Поэтому привлечение кремниевой технологии для этого производства часто оказывается нерентабельным.

Вместе с тем, мембранны из оксида/нитрида кремния позволяют получить сенсоры с предельно низкой потребляемой мощностью, составляющей при импульсном нагреве сенсора менее 1 мВт.

Таким образом, использование различных вариантов микромашинной технологии изготовления сенсоров позволяет значительно расширить области их применения, в первую очередь — в автономных системах безопасности. Большой интерес представляет также создание индивидуальных устройств безопасности, одной из функций которых являлась бы связь по каналам сотовой телефонии с

медицинскими организациями или пожарной охраной, которая устанавливалась бы автоматически при возникновении угрозы здоровью человека.

**Список литературы**

1. Vasiliev A. A., Filippov V. I., Olikhov I. M., Stoppa G., Zen M. Gas Sensors for the Detection of Products of Pyrolysis of Combustible Gase // International Meetings on Chemical Sensors. Basel. 2000
2. Requirements and Testing Procedures for the LPCB Approval and Listing of Carbon Monoxide Fire Detectors Using Electrochemical Cells. LPS 1265: ISSUE 1.0, 2004.
3. Technical information for TGS 2442. Website of Figaro Eng. ([www.figarosensor.com](http://www.figarosensor.com)), File 2442Dtl.pdf.
4. Kim J. H., Sung J. S., Son Yu. M., Vasiliev A. A., Koltynip E. A., Eryshkin A. V., Godovski D. Yu., Pisliakov A. V. Sensors and Actuators. 1997. В 44. Р. 452–457.
5. Васильев А. А., Гогиш-Клушин С. Ю., Певгов В. Г., Писляков А. В., Харитонов Д. Ю. Микроэлектронное измерительное устройство (датчик) и способ его изготовления. Заявка на патент РФ № 2002128660. Приоритет от 28.10.2002.
6. Vasiliev A. A., Gogish-Klushin S. Yu., Kharitonov D. Yu., Pisliakov A. V., Pevgov V. G., Paranjape M. A novel approach to the micromachining sensors: the manufacturing of thin alumina membrane chips // Eurosensors XVI. Prague. October. 2002. MP49.
7. Васильев А. А., Писляков А. В., Zen M., Margazin B., Guarneri V., Soncini G., Pignatel G., Verzellesi G. Газочувствительные приборы на микромашинной мемbrane: комбинация кремниевой технологии и технологии толстых пленок // Сенсор. 2001. № 1. С. 16.
8. Vincenzi D., Butturi M. A., Guidi V., Carotta M. C., Martinelli G., Guarneri V., Brida S., Margesin B., Giacomozi F., Zen M., Pignatel G. U., Vasiliev A. A. and Pisliakov A. V. Development of a low-power thick-film gas sensor deposited by screen-printing technique onto a micromachined hotplate // Sensors and Actuators B: Chemical. 2001. V. 77 (1–2). P. 95–99.

# Нанотехнологии и зондовая микроскопия

УДК.621.38

В. Г. Мокеров, член-корр. РАН,  
ИСВЧПЭ РАН, г. Москва

## ГЕТЕРОСТРУКТУРНАЯ СВЧ ЭЛЕКТРОНИКА — НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

*Рассматриваются вопросы научного и технологического задела в области физики и технологии наногетероструктур и перспектив развития технологии изготовления приборов на их основе — гетероструктурных транзисторов.*

В отличие от технологии кремниевых БИС и СБИС, основной в системах обработки информации, наногетероструктурная электроника становится доминирующей в системах передачи информации, передачи данных. Эта новейшая научноемкая электронная технология определяет стремительный прогресс современных средств связи, включая сотовую цифровую телефонию третьего поколения, высокоскоростной Интернет, спутниковую связь, цифровое ТВ, сверхскоростную оптоволоконную связь, беспроводные системы связи широкополосного доступа с предоставлением услуг мультимедиа (передача сложных изображений, видеоконференции, дистанционное обучение, дистанционное управление и т. д.), автомобильные радиолокаторы, а также развитие современных электронных средств вооружений (бортовых и наземных радиолокаторов, средств радиоэлектронной борьбы и т. д.).

Основные преимущества такой технологии обусловлены свойствами высокопрецизионных наногетероструктур, обеспечивающих наивысшие скорости пролета электронов в приборах и наименьшие диссипативные потери, что позволяет управлять шириной запрещенных зон в наногетероструктурах, и делает возможным создание самых высокоскоростных и высокочастотных из всех известных твердотельных приборов с рекордным усилением, минимальными шумами (для приемных устройств) и максимальной выходной мощностью и КПД (для передающих устройств).

Физика наногетероструктур — основа уникальных характеристик приборов на их основе. Квантово-размерные эффекты, обусловленные нанометровыми толщинами слоев в транзисторных гетероструктурах [1], определяют характеристики приборов на их основе. Это открыло уникальную

возможность посредством варьирования толщины и составом приборного канала управлять его основными характеристиками:

- эффективной шириной запрещенной зоны и соответственно пороговым напряжением для ударной ионизации электронов и пробивным напряжением транзистора;
- электронной плотностью, подвижностью и дрейфовой скоростью насыщения, а также температурой электронного газа  $T_{\text{эл}}$ .

В свою очередь, это позволило управлять задавать значения рабочих токов, частотные характеристики, усиление, шумовые характеристики, выходную мощность, КПД и т. д.

В отличие от глубокого фундаментального поиска, сосредоточенного на электронных системах малой плотности при низких температурах в слабых электрических полях, когда разыгрываются такие уникальные явления, как вигнеровская кристаллизация электронного газа и др., физика транзисторных наногетероструктур базируется на электронных системах с высокой плотностью носителей, т. е. когда заполнено несколько электронных подзон или уровней, при комнатных и более высоких температурах, и их поведении в сильных электрических полях (вплоть до ударной ионизации). Поскольку характерная энергия размерного квантования здесь порядка 100 мэВ, т. е. существенно больше, чем энергия, соответствующая комнатной температуре  $KT_{\text{комн}} = 26$  мэВ, эффекты размерного квантования проявляются при реальных рабочих условиях функционирования приборов.

Наногетероструктурная электроника — первая приборная электронная нанотехнология. Объединение физики и технологии наногетероструктур с технологией изготовления приборов на их основе и привело к созданию наногетероструктурной электроники. Успешное применение здесь последних достижений электронной литографии для формирования транзисторов с длиной затвора до  $L_3 = 20...30$  нм, т. е. меньшей, чем дебройлевская длина волны электрона, позволяет отнести эту технологию, первой среди других транзисторных технологий, к нанотехнологии.

Элементная база наногетероструктурных монолитных интегральных схем (МИС):

- унипольярные полевые транзисторы с электронным газом высокой подвижности, т. е. НЕМТ (*High Electron Mobility Transistor*);
- гетеробиполярные транзисторы;
- туннельно-резонансные приборы на квантовых ямах, обладающие наряду с рекордным быстро-

- действием, уникальными функциональными возможностями;
- гетероструктурные транзисторы на квантовых точках.

Созданный в последние десятилетия научный и технологический задел по физике и технологии наногетероструктур и по технологии изготовления приборов на их основе дал мощный импульс стремительному промышленному освоению этой новейшей технологии, пока, к сожалению, за рубежом. Объем мировых ежегодных продаж, только самих гетероструктурных транзисторов и МИС, уже приблизился к 7–8 млрд долл., ежегодно увеличиваясь более чем на 30 %. По всем прогнозам рынок этих изделий на ближайшие 12–15 лет, и далее, будет оставаться наиболее привлекательным для инвестиций.

К настоящему времени налажено массовое производство гетероструктур на пластинах диаметром до 150 мм, гетероструктурных транзисторов МИС для следующих применений:

- сотовая связь, сейчас это цифровая сотовая связь 3-го поколения — наиболее массовая область применения этой технологии, она занимает около 57 % "гетероструктурного" рынка (гетеротранзисторы содержатся почти в каждом, выпускаемом в мире, сотовом телефоне);
- занимающая около 23 % рынка быстропрогрессирующая высокоскоростная волоконно-оптическая связь, которая использует гетероструктурные МИС миллиметрового диапазона на частоты до 60 ГГц и выше; ведутся разработки приборов на частоты до 100 ГГц и выше;
- так называемая потребительская электроника, связанная с цифровым ТВ (частоты от 12 до 30–40 ГГц), ей принадлежит около 12 % рынка;
- гетероструктурные МИС на частоты 70...77 ГГц для автомобильных антистолкновительных радаров;
- СВЧ МИС для спутниковой связи на частоты до 60 ГГц;
- беспроводная связь широкополосного доступа на частоты до 40...60 ГГц и выше (точка–точка, точка–много точек) с предоставлением услуг мультимедиа (передачи сложных изображений, видеоконференций, дистанционное обучение, высокоскоростной Интернет и т. д.) — перспективная область применения гетероструктурной СВЧ-электроники;
- военная электроника, которой принадлежит 3–4 % рынка; это, в основном, бортовые и наземные радиолокаторы на активных фазированных антенных решетках (АФАР) X-диапазона, т. е. на частоту около 10 ГГц, для ведения разведки, обнаружения целей, наведения и сопровождения ракет, а также для радиоэлектронной борьбы.

В России современной промышленной гетероструктурной технологии пока нет, ни в части массового производства наногетероструктур, ни в части производства гетеротранзисторов, ни тем более микросхем. Сквозного, унифицированного и лицензированного СВЧ САПР также нет. Коммерческий рынок в стране не сформирован, и доминирует оборонный госзаказ, т. е. ситуация близка к тому, что было за рубежом в 1980-х годах. Текущее финансирование полностью расходуется на НИОКР, и необходимого обновления технологической базы не происходит уже в течение 15 лет.

Тем не менее, промышленные предприятия имеют отработанную инфраструктуру и многолетний опыт по выполнению ОКР и организации производства. Имеются технологические корпуса, почти готовые, или такие, что могут быть быстро подготовлены для проведения НИОКР и развертывания производства.

Отрадно, что в последние годы ситуация начинает меняться к лучшему. Во ФГУП "Исток" на выделенные Правительством инвестиции идет создание современной промышленной технологической линии по производству СВЧ микросхем с проектными нормами до 0,1 мкм и объемом выпуска до 1 млн шт. в год. Ее введение в эксплуатацию планируется в ближайшие 2–3 года.

К настоящему времени сформировался, хотя и относительно небольшой (с потребностью около 200 тыс. приборов в год) внутренний рынок, связанный с потребностью в гетероструктурных СВЧ приборах для приемопередающих модулей АФАР X- и K-диапазонов.

В Российской академии наук (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Институт СВЧ полупроводниковой электроники, Институт физики полупроводников СО РАН и др.), где работы не прекращались даже в самые тяжелые времена, создан достаточно мощный научный и технологический задел по всем направлениям наногетероструктурной электроники: от физики и технологии самых современных гетероструктур до исследований в области моделирования и проектирования приборов и технологий изготовления наногетероструктурных СВЧ МИС с размерами элемента до 0,2 мкм [2]. И что особенно важно, имеются высококвалифицированные кадры ученых (известные научные школы), способные, в кооперации со специалистами промышленности, в кратчайшие сроки (3–5 лет) решить сложнейшую задачу создания в России промышленной наногетероструктурной электроники мирового уровня.

Однако для достижения этой цели необходимо создание в стране нескольких специализированных научных и промышленных Центров, оснащенных самым современным технологическим и ис-

следовательским оборудованием для разработки современной технологии гетероструктурных СВЧ МИС с размерами элементов до 20–50 нм — в Санкт-Петербурге (на базе ФТИ им. А. Ф. Иоффе), в г. Москве (на базе ИСВЧПЭ РАН) и возможно в других городах.

Эти центры необходимо оснастить комплектом современного импортного технологического и исследовательского оборудования и чистыми технологическими помещениями (класс частоты до 100).

Жизнь показывает, что там, где требуются рабочие частоты выше 4–5 ГГц, наногетероструктурная технология быстро вытесняет кремниевую

технологию и классическую арсенид-галлиевую MESFET-технологию, завоевывая все большую долю СВЧ телекоммуникационного и радиолокационного мирового рынка.

#### Список литературы

1. Мокеров В. Г., Федоров Ю. В., Великовский Л. Э., Щербакова М. Ю. Возможность создания гетероструктурного транзистора на квантовых точках // Микросистемная техника. 2001. № 1. С. 3–6.
2. Алферов Ж. И., Асеев А. Л., Гапонов С. В. и др. Наноматериалы и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2003. № 8. С. 3–13.

УДК 621.3

**В. И. Карагусов**, д-р техн. наук,  
ООО "НТК "Криогенная техника", г. Омск

## НАНОКРИОГЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

*Существующие микрокриогенные системы намного превышают электронные объекты охлаждения по габаритным размерам и массе. Они имеют меньшие ресурсы и надежность. Современный уровень позволяет выполнять криогенные и электронные системы по единым нанотехнологиям. В результате криогенные системы могут быть размещены внутри электронных приборов, таких как, например, микросхемы.*

Все многообразие объектов микрокриогенной техники практически сводится к одному большому классу электронных приборов, таких как микросхемы, дискретные диоды и транзисторы, микросборки, фотоприемники различных диапазонов, сверхпроводящие приборы и широкий спектр датчиков [1]. Охлаждаемая масса (по медному эквиваленту) объектов охлаждения составляет от долей до десятков граммов, в отдельных случаях до нескольких килограммов. Практически во всех случаях большую часть охлаждаемой массы составляют элементы, которые функционально не требуют охлаждения. К ним относятся крепежные элементы, корпуса микросхем, дискретных элементов и датчиков подложки, внешние выводы, внутренние коммуникации и большинство внутренних элементов (например, в микросхемах). Существуют случаи, когда отдельные элементы объектов охлаждения приходится подогревать специальными нагревателями. Теоретически охлаждения требуют только активные зоны элементов, таких как диоды, транзисторы, сверхпроводники, фотоприемники и пр. По самым скромным оценкам требуется охлаждать только 0,001–10 % от общей массы, а если

оценить холодопроизводительность, то ее требуется на 3–6 порядков меньше, чем при охлаждении приборов в целом.

В связи с этим некоторые разработчики электронных приборов пытаются отказаться от использования микрокриогенной техники, которая на несколько порядков больше объектов охлаждения по массе, габаритным размерам, энергопотреблению, а также создает дополнительные проблемы, связанные с вибрациями, шумом, электромагнитными наводками, ресурсом, надежностью, регламентными работами и пр.

Активные исследованияnanoструктур ведущими исследователями стран мира позволили теоретически и экспериментально определить целый ряд их уникальных свойств [2–12]. К nanoструктурам принято относить объекты с характерным размером от долей нанометра до микрометра, а иногда и до нескольких микрометров. Наиболее активно исследуются такие nanoструктуры, как фуллерены, закрытые и открытые нанотрубки [2].

Фуллерены — сферические молекулы углерода C<sub>20</sub>, C<sub>60</sub>, C<sub>70</sub> и более крупные. Их принято называть четвертой формой углерода наряду с графитом, алмазом и карбином. На рис. 1 показана модель молекулы фуллерена-60.

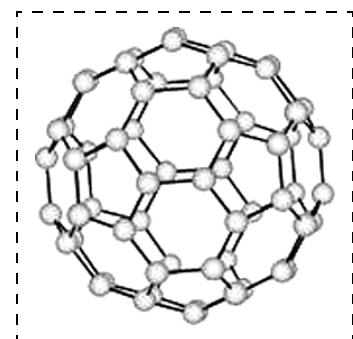


Рис. 1. Модель молекулы фуллерена-60

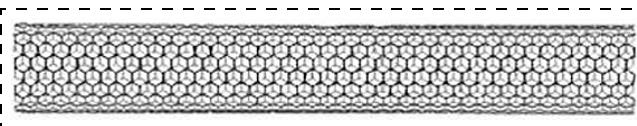


Рис. 2. Открытая нанотрубка

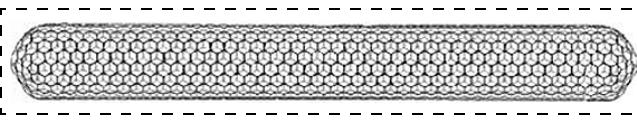


Рис. 3. Закрытая нанотрубка

Нанотрубками называют цилиндрические образования с толщиной стенки в один атомный слой. Они представляют собой крупные молекулы и бывают открытыми (рис. 2) и закрытыми (рис. 3). Часто их называют вытянутыми фуллеренами. Диаметр нанотрубок лежит в диапазоне от долей нанометра до микрометра, длина — до десятков микрометров. Наряду с одностенными нанотрубками, показанными на рис. 2 и 3, существуют многостенные или вложенные нанотрубки, показанные на рис. 4.

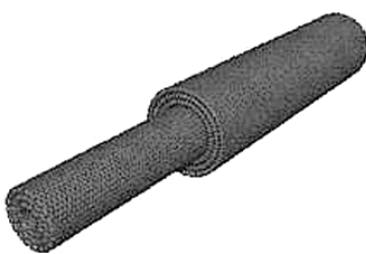


Рис. 4. Вложенные нанотрубки

Известны нанотрубки переменного диаметра или с местными сужениями (рис. 5), а также ветвящиеся нанотрубки (рис. 6). В последнее время удалось легировать углеродные нанотрубки целым рядом химических элементов, что значительно меняет их свойства. Более того, опубликованы сооб-

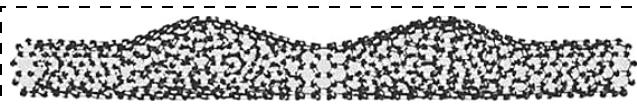


Рис. 5. Нанотрубка переменного диаметра

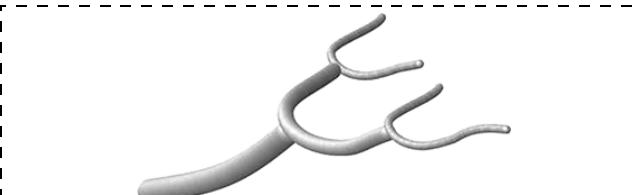


Рис. 6. Ветвящиеся нанотрубки

щения о создании нанотрубок из золота, платины и других химических элементов [13].

Опубликованы сообщения о возможности модификации кристаллической решеткиnanoструктур, в результате чего они меняют форму. В настоящее время с помощью такой модификации получены резкие изгибы трубок (рис. 7) и даже изготовлены наношестеренки (рис. 8).

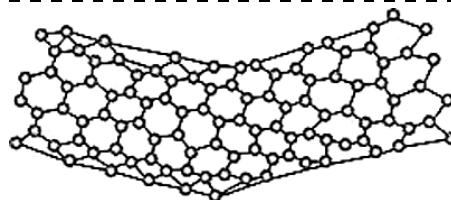


Рис. 7. Нанотрубка с изгибом

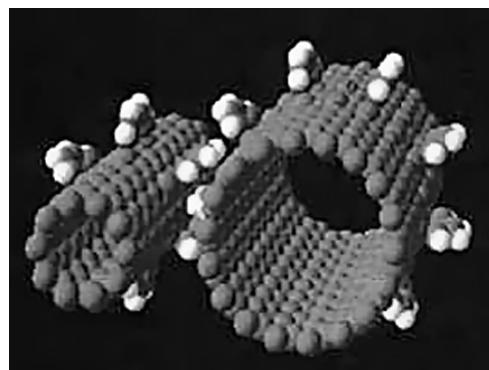


Рис. 8. Наношестеренки

Большой интерес к nanoструктурам (число публикаций за последние десять лет исчисляется тысячами) в первую очередь определяется их уникальными свойствами. К таким свойствам следует отнести:

- **электрические** — нанотрубки могут быть диэлектриками, полупроводниками, проводниками и сверхпроводниками, причем на одном материале, например углероде. При легировании свойства могут значительно изменяться как количественно, так и качественно [3, 11, 19, 23, 24];
- **магнитные** — от идеального диамагнетика до ферромагнетика [26];
- **механические** — прочность нанотрубок примерно в 20 раз превышает прочность лучших сталей; коэффициент упругого удлинения достигает 16 %, многократный изгиб (на частотах в сотни Гц) не приводит к усталостному разрушению; внутри закрытых nanoструктур могут храниться газообразные вещества под огромными давлениями [3, 4, 6, 7, 21, 22];
- **теплофизические** — теплопроводность и теплоемкость лежат в широком диапазоне значений

- от аномально малых до аномально высоких [8, 20];
- **химические** — широкий спектр химических реакций с различными веществами; растворимость в растворителях; возможность замены или достраивания в решетку отдельных атомов; возможность построенияnanoструктуры атом за атомом; выдающиеся адсорбционные свойства [16, 27];
  - **оптические** — нанотрубки обладают электронной эмиссией, что позволяет строить на их основе излучающие приборы, например сверхтонкие дисплеи; при облучении или освещении нанотрубки меняют свое сопротивление или геометрические размеры, что создает предпосылки для создания сверхмалых фотоприемных устройств с высоким разрешением. Обнаружена способность нанотрубок воспламеняться при облучении их видимым светом [9, 10];
  - **комбинированные** (например, электромеханические) — при изгибе нанотрубки изменяют свое омическое сопротивление, а при пропускании тока — геометрические размеры [4, 6, 7, 25].

Следует отметить, что nanoструктуры изучены еще далеко не полностью, регулярно публикуются сообщения об обнаружении новых свойств.

Уникальные свойства nanoструктур в широком диапазоне определяют и широкий спектр их возможных применений. Уже созданы лабораторные образцы нанодиодов и нанотранзисторов, работающих на частотах в сотни гигагерц [14, 15, 28]; разработаны макеты нановесов, на которых можно взвешивать вирусы; имеется целый ряд публикаций по различным вариантам нанотермометров. Проведены успешные эксперименты по разделению с помощью nanoструктур газов, таких как водород, азот, кислород. На практике установлена возможность хранения газов (водорода, аргона, кислорода, метана и др.) внутри закрытых нанотрубок с рекордными удельными характеристиками [16, 17]. В ближайшие годы ожидается создание

промышленных образцов сверхтонких дисплеев для телевизоров и компьютеров. В бионанотехнологиях и медицине ведутся работы по созданию нанороботов, способных перемещаться по кровеносным сосудам и доставлять лекарства непосредственно к требуемому месту. Уже сейчас сертифицированы и поступили в продажу медицинские препараты, содержащие фуллерены. Невозможно перечислить все возможные области применения нанотехнологий, тем более что новые появляются практически ежемесячно.

На рис. 9 показан нанодиод, полученный путем введения дислокации в решетку нанотрубки, а на рис. 10 — полевые нанотранзисторы с каналами из нанотрубок.

Прорыв, совершенный за последнее десятилетие в физике nanoструктур, позволяет сделать предположение, что в ближайшее десятилетие области приложения микрокриогенной техники могут значительно сузиться. Для того чтобы этого не случилось, необходимо характеристики криогенных систем охлаждения (КСО) максимально приблизить к характеристикам охлаждаемых объектов. Кроме того, такой подход позволит не только избежать сужения областей применения микрокриогенной техники, но и расширить их.

Если рассмотреть строение nanoструктур (см. рис. 1—10) и комплекс их свойств, то можно увидеть, что имеется достаточный набор для создания КСО нанометровых размеров. Такие наноКСО могут быть встроены в нанодиоды, нанотранзисторы и другие электронные приборы с нанометровыми размерами. Более того, наноКСО могут быть элементами наноэлектронных приборов, например, переходом нанодиодов или каналом полевых нанотранзисторов.

В случае нанодиода или нанотранзистора нанотрубка может выполнять функции теплообменника нагрузки КСО. Остается только достроить остальные элементы наноКСО.

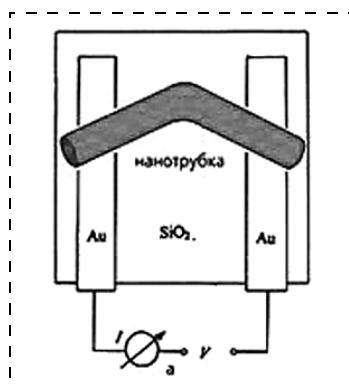


Рис. 9. Нанодиод

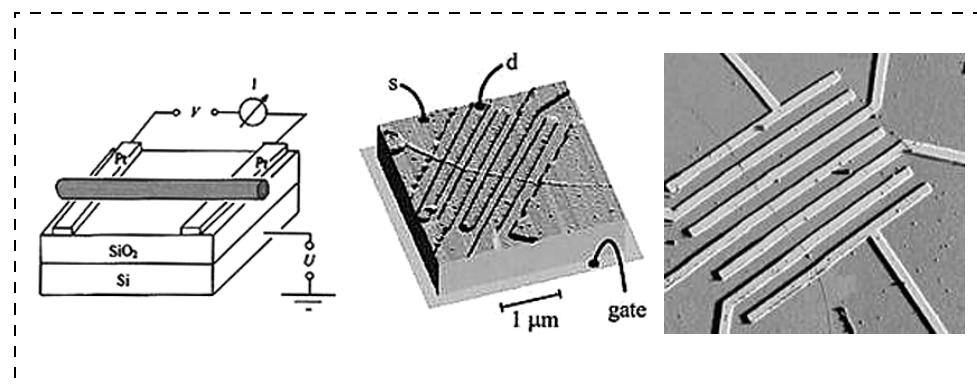


Рис. 10. Полевые нанотранзисторы

Сформулируем требования к наноКСО, которые могут быть встроены вnanoэлектронные приборы:

1. Наноразмеры должны определяться объектами размещения.

2. Высокая термодинамическая эффективность, обуславливающая малое энергопотребление и малые тепловыделения, которые опять же ограничиваются объектами размещения.

3. Отсутствие механически подвижных узлов и деталей (точнее — механические перемещения не должны превышать единиц или десятков нанометров).

4. Ресурс работы и надежность КСО должны соответствовать прибору в целом.

5. Отсутствие (или ограничение до требуемых пределов) вибраций и электромагнитных наводок, так как КСО, объект охлаждения и объект размещения представляют единое целое.

6. Теплота должна быть отведена к элементам, не критичным к температуре, либо к более теплым по требованиям объекта размещения.

7. Число КСО должно быть достаточным для охлаждения активных зон всех объектов охлаждения.

8. Технология изготовления КСО должна соответствовать технологии изготовления объектов охлаждения и размещения.

9. Внешние источники холода отсутствуют.

Перечисленным требованиям существующие микроКСО не удовлетворяют практически по всему перечню. Следовательно, задача должна быть поставлена следующим образом: необходима разработка нанокриогенных систем охлаждения на схемотехническом, конструктивном и технологическом уровнях.

**Схемотехнический уровень.** В соответствии с систематизацией из [18] к основным элементам КСО относятся системы:

- подготовки рабочего газа;
- предварительного охлаждения;
- использования эффекта охлаждения;
- окончательного охлаждения.

Две последние системы могут быть раздельными или объединенными. Для упрощения изложения в последующем они будут объединены. Кроме того, перечисленные системы будут рассмотрены в объеме, необходимом для обсуждения вопроса.

**Система подготовки рабочего тела состоит из трех подсистем:**

- подвода энергии;
- увеличения термодинамической силы;
- отвода теплоты.

**Основные типы подсистем подвода энергии:**

- электродвигатели вращения и линейные — в наноструктурах в настоящее время не могут быть

реализованы ввиду наномальных габаритных размеров (требования 1, 4, 8);

- ◆ вибрационный и акустический привод — могут быть реализованы в нанотрубах (см. свойства наноструктур);
- ◆ подвод энергии в виде теплоты (теплоиспользующая подсистема) — может быть реализован с помощью нагревателей, пропусканием тока через наноструктуры или отводом теплоты от элементов наноструктур с большим тепловыделением;
- ◆ подвод энергии в виде электрического поля — может быть осуществлен путем подачи электрического напряжения;
- ◆ подвод энергии в виде магнитного поля — может быть реализован путем подачи электрического тока;
- ◆ подвод механической энергии — может быть осуществлен путем подведения электрических импульсов к наноструктурам.

*Основные виды подсистем увеличения термодинамической силы:*

- ◆ сжатие рабочего газа в цилиндрапоршневой паре и турбомашинах — не может быть реализовано в соответствии с требованиями 1, 3, 4, 5, 8;
- ◆ сжатие рабочего газа в десорбционных процессах — может быть реализовано в соответствии со свойствами нанотрубок;
- ◆ сжатие рабочего газа при изменении размеров фуллеренов и нанотрубок под действием электрического поля (аналог электрострикции) — может быть осуществлено в соответствии со свойствами наноструктур;
- ◆ сжатие рабочего газа с помощью нагрева или термоакустического эффекта — может быть реализовано в соответствии со свойствами наноструктур;
- ◆ создание акустической волны — может быть реализовано путем подачи электрических импульсов на наноструктуры в соответствии с их свойствами;
- ◆ намагничивание ферромагнитных наноструктур — может быть осуществлено путем пропускания через них продольных или поперечных электрических токов;
- ◆ размагничивание сверхпроводящих наноструктур — может быть реализовано путем пропускания через них продольных или поперечных электрических токов.

*Основные типы подсистем отвода теплоты:*

- ◆ отвод теплоты на элементы, некритичные к температуре или требующие подогрева — может быть реализован;
- ◆ отвод теплоты на подложку или корпус нано-прибора — может быть реализован;

- ♦ отвод теплоты с помощью тепловых труб, выполненных на базе нанотрубок — может быть осуществлен в соответствии со свойствами нанотрубок;
- ♦ отвод теплоты другой наноКСО — может быть реализован, однако такое решение приводит к усложнению КСО и может быть целесообразным только на температурных уровнях ниже 2К.

**Система предварительного охлаждения, как правило, состоит из двух подсистем:**

- использования собственного холода;
- использования внешних источников холода.

Эту подсистему в дальнейшем рассматривать не будем, так как это противоречит требованию 9.

*Использование собственного холода может быть реализовано следующими путями:*

- ♦ использованием рекуперативных теплообменников (ТО) — может быть реализовано путем параллельного или спирального совмещения нанотрубок;
- ♦ использования регенеративных ТО — может быть реализовано путем аксиального размещения нанотрубок (см. рис. 4).

**Система использования и окончательного охлаждения состоит из следующих подсистем:**

- окончательного охлаждения;
- отвода теплоты от объекта охлаждения или от его активной зоны.

*Основные типы подсистем окончательного охлаждения:*

- ♦ расширение рабочего газа в цилиндропоршневой паре и турбомашине — не может быть реализовано в соответствии с требованиями 1, 3, 4, 5 и 8;
- ♦ расширение рабочего газа в дросселях и местных сужениях — не может быть реализовано в соответствии с требованиями 1, 3, 4 и 8;
- ♦ производство холода в адсорбционных процессах — может быть осуществлено в соответствии со свойствами нанотрубок;
- ♦ расширение рабочего газа при изменении размеров фуллеренов и нанотрубок под действием электрического поля — может быть реализовано в соответствии со свойствамиnanoструктур;
- ♦ размагничивание ферромагнитных nanoструктур — может быть осуществлено путем пропускания через них продольных или поперечных электрических токов;
- ♦ намагничивание сверхпроводящих nanoструктур — может быть реализовано путем пропускания через них продольных или поперечных электрических токов.

*Подсистема отвода теплоты от объекта охлаждения или от его активной зоны представляет собой ТО различных типов.*

Следует отметить, что рассмотрены не все возможные способы и системы, а только те, которые в той или иной степени соответствуют известным автору на момент написания статьи свойствам nanoструктур. Если в nanoструктурах будут обнаружены другие эффекты, то перечень подсистем будет расширен.

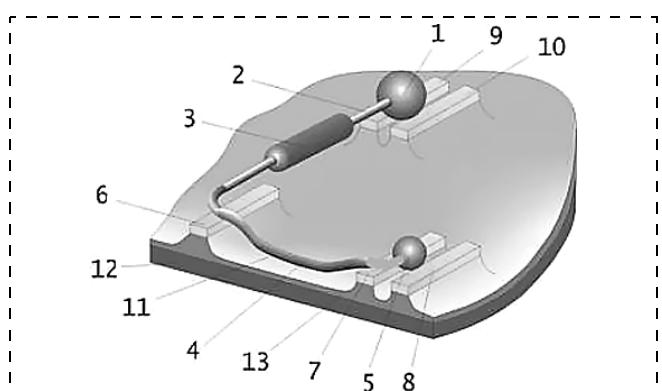
В соответствии с проведенным анализом рассмотрим криогенные циклы и КСО, которые могут быть реализованы на основе нанотехнологий.

**КСО, работающие по циклу Стирлинга**, содержат следующие основные элементы:

- узел сжатия рабочего газа, создающий пульсирующее давление. Может быть выполнен на фуллеренах и нанотрубках двумя способами: импульсным нагревом или за счет изменения размеров nanoструктур под действием электрического поля;
- узел расширения, работающий на одной частоте с узлом сжатия, но со сдвигом по фазе. Может быть выполнен на фуллеренах и нанотрубках при изменении их размеров под действием электрического поля;
- регенеративный ТО. Может быть выполнен из однослойных или многослойных нанотрубок;
- ТО нагрузки и отвода теплоты. Могут выполняться из однослойных и многослойных нанотрубок. Нанотрубки ТО нагрузки одновременно являются элементами нанодиодов или нанотранзисторов.

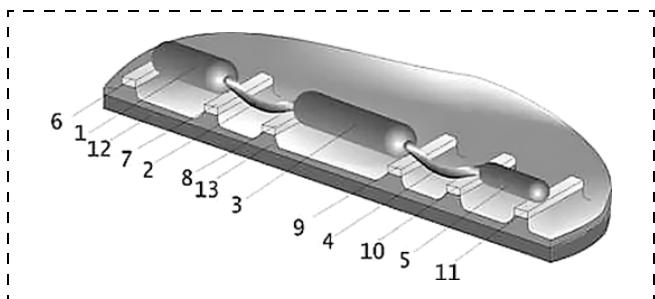
На рис. 11 показана схема наноКСО, работающей по циклу Стирлинга, выполненной как одно целое с полевым нанотранзистором (приведен вариант фуллереновых узлов сжатия и расширения). На этом и последующих рисунках топология наноэлектронных приборов показана упрощенно.

Как видно на рис. 11, КСО вполне могут быть размещены в наноэлектронных приборах, причем



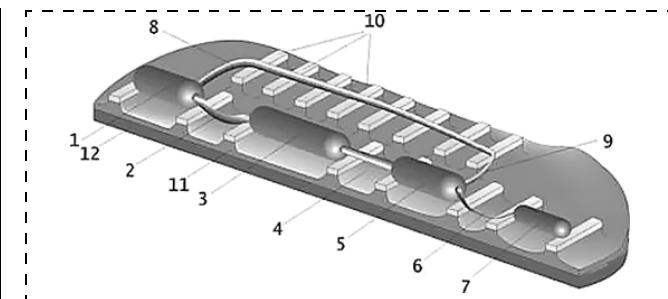
**Рис. 11. Нанокриогенная система охлаждения Стирлинга (первый вариант):**

1 — фуллереновый узел сжатия; 2 — ТО отвода теплоты; 3 — регенератор из многослойных нанотрубок; 4 — ТО нагрузки (нанотранзистор на холодном уровне); 5 — фуллереновый узел расширения; 6, 7, 8, 9, 10 — электроды; 11 — активная зона полевого нанотранзистора; 12 — кремний; 13 — окись кремния



**Рис. 12. Нанокриогенная система охлаждения Стирлинга (второй вариант):**

1 — узел сжатия; 2 — ТО отвода теплоты; 3 — регенератор; 4 — ТО нагрузки; 5 — узел расширения; 6, 7, 8, 9, 10, 11 — электроды; 12 — кремний; 13 — окись кремния



**Рис. 13. Нанокриогенная система охлаждения на базе пульсационной трубы:**

1 — узел создания пульсаций давления; 2 — ТО отвода теплоты; 3 — регенератор; 4 — ТО нагрузки; 5 — пульсационная труба; 6 — ТО отвода теплоты — дроссель; 7 — резонансный объем; 8 — нагнетательная трубка; 9 — дроссель; 10 — электроды; 11 — окись кремния; 12 — кремний

охлаждается не вся микросхема (и даже не весь нанотранзистор), а только активная его зона. Следует отметить, что не только ТО нагрузки может быть элементом нанотранзистора или нанодиода. Так, ТО 2 может выполнять функции нанодиода, не требующего охлаждения, а регенератор 3 может быть элементом нанотранзистора с охлаждением на промежуточных температурных уровнях.

На рис. 12 приведен другой вариант наноКСО, работающей по циклу Стирлинга. Особенности этого варианта заключаются в том, что узлы сжатия и расширения выполнены на нанотрубках, элементы наноКСО одновременно являются элементами нескольких электронных наноприборов. Узел сжатия 1 и ТО отвода теплоты 2 могут выполнять роль элементов нанодиодов и нанотранзисторов на теплом температурном уровне, регенератор 3 — на промежуточных, а ТО нагрузки 4 и узел расширения 5 — на холодном.

**КСО на базе пульсационной трубы** содержат следующие основные элементы:

- узел создания пульсаций давления — может быть выполнен на фуллеренах и нанотрубках импульсным нагревом или изменением размеровnanoструктур под действием электрического поля;
- пульсационную трубу, ТО нагрузки и отвода теплоты, выполняемые из нанотрубок;
- регенеративный ТО из многослойной нанотрубки;
- дроссельные отверстия, формируемые местными сужениями нанотрубок;
- резонирующую емкость из фуллерена или нанотрубки.

Так же, как и в предыдущем случае, практически все элементы наноКСО на базе пульсационной трубы могут одновременно являться элементами наноэлектронных приборов.

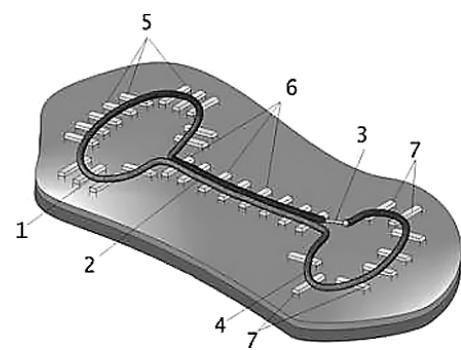
На рис. 13 показана наноКСО на базе пульсационной трубы. Все ее элементы выполнены из нанотрубок.

Элементы 1, 2, 6, 7, 8 и 9 могут выполнять роль элементов нанодиодов и нанотранзисторов на теплом температурном уровне, 3 и 5 — на промежуточных, а ТО нагрузки 4 — на холодном.

**Дроссельные КСО** содержат следующие основные элементы:

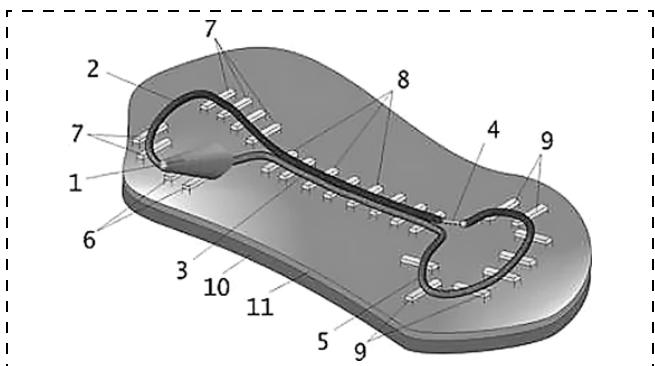
- нереверсивный узел сжатия, реализуемый путем пропускания бегущего электрического тока вдоль нанотрубки (перистальтика);
- ТО отвода теплоты — такой же, как и в предыдущих случаях;
- дроссельный ТО, выполняемый параллельным соединением нанотрубок или навиванием одной нанотрубки на другую;
- ТО нагрузки, представляющий собой нанотрубку;
- функции дросселя выполняет местное сужение нанотрубки.

На рис. 14 изображена дроссельная наноКСО, выполненная из нанотрубок.



**Рис. 14. Дроссельная нанокриогенная система охлаждения:**

1 — нереверсивный узел сжатия; 2 — дроссельный ТО; 3 — дроссель; 4 — ТО нагрузки; 5 — электроды для подведения бегущего электрического поля; 6 — электроды наноэлектронных приборов на промежуточных температурных уровнях; 7 — электроды наноэлектронных приборов на нижнем температурном уровне



**Рис. 15. Дроссельная нанокриогенная система охлаждения:**

1 — акустический узел сжатия; 2 — ТО отвода теплоты; 3 — дроссельный ТО; 4 — дроссель; 5 — ТО нагрузки; 6 — электроды для подведения переменного электрического тока; 7 — электроды наноэлектронных приборов на теплом температурном уровне; 8 — электроды наноэлектронных приборов на промежуточных температурных уровнях; 9 — электроды наноэлектронных приборов на нижнем температурном уровне; 10 — кремний; 11 — оксид кремния

Дроссельный ТО 2 может быть элементом нациодов и нанотранзисторов на промежуточных температурных уровнях, а ТО нагрузки 4 — на холодном.

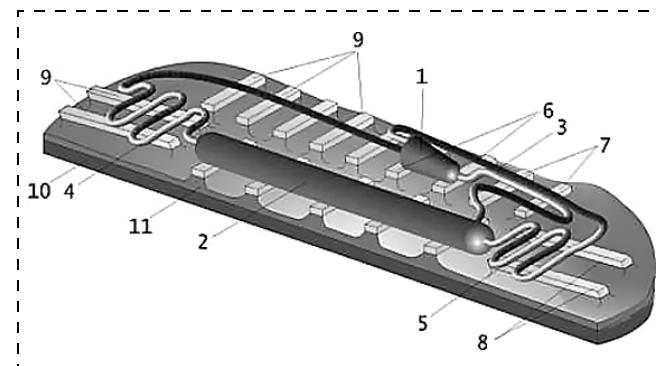
На рис. 15 приведена дроссельная нанокриогенная система с акустическим узлом сжатия рабочего газа. Принцип действия и действующие образцы таких компрессоров разработаны компанией MacroSonix [29]. Сжатие рабочего газа происходит в объеме переменного профиля при создании внутри него волн плотности рабочего газа. Вnanoструктурах профилированный объем может быть реализован в нанотрубках переменного диаметра, в фуллеренах или в комбинированных nanoструктурах. Волны плотности рабочего газа создаются колебаниями стенок nanoструктур при пропускании через них переменного электрического тока.

ТО отвода теплоты 2 может быть элементом нациодов и нанотранзисторов на теплом температурном уровне, дроссельный ТО 3 — на промежуточных, а ТО нагрузки 5 — на холодном.

**Вихревые КСО** основаны на эффекте Ранка [18]. При вихревом движении газа в трубе поток разделяется на теплый и холодный. Эти КСО не имеют подвижных узлов в холодной зоне, представляют собой трубчатые конструкции и достаточно просто реализуются в nanoструктурах. На рис. 16 показана вихревая наноКСО с трубой Ранка.

Элементы 2 и 4 могут выполнять роль элементов нациодов и нанотранзисторов на теплом температурном уровне, 3 — на промежуточных, а теплообменник нагрузки 5 — на холодном.

**Магнитокалорические (МК) и электрокалорические (ЭК) КСО.** При намагничивании целого ряда веществ (как правило, с содержанием редкозе-



**Рис. 16. Нанокриогенная вихревая система охлаждения:**

1 — нереверсивный узел сжатия; 2 — вихревая труба; 3 — рекуперативный ТО; 4 — ТО отвода теплоты; 5 — ТО нагрузки; 6 — электроды узла сжатия; 7 — электроды нанокриогенных приборов на промежуточных температурных уровнях; 8 — электроды электронных приборов на нижнем температурном уровне; 9 — электроды нанокриогенных приборов на теплом температурном уровне; 10 — кремний; 11 — оксид кремния

мельных элементов) происходит их нагрев, а при размагничивании — охлаждение [30]. В наибольшей степени этот эффект проявляется вблизи магнитных фазовых переходов — температур Юри и Нееля. В настоящее время известно достаточно большое число веществ, температуры магнитных фазовых переходов которых лежат в диапазоне от ультранизких температур (ниже 1К) до температур выше окружающей среды [31]. Для построения МК КСО необходимо подобрать оптимальные материалы с максимальным МК-эффектом на данном температурном уровне, организовать периодически изменяющее магнитное поле и тепловые потоки между МК-веществом, объектом охлаждения и системой отвода теплоты.

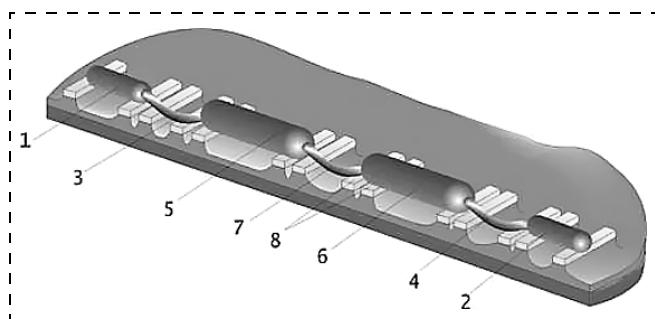
#### Основные элементы МК наноКСО:

- МК-рабочие тела — могут быть сформированы в виде нанотрубок или замещением атомов в углеродных нанотрубках редкоземельными;
- реверсивные узлы прокачки теплоносителя — аналогичны узлам сжатия и расширения предыдущих систем охлаждения, но с меньшей степенью сжатия;
- ТО, выполняемые из нанотрубок.

Магнитное поле создается путем пропускания электрического тока через спиральные нанотрубки или непосредственно через нанотрубку с МК-рабочим телом.

На рис. 17 показана МК наноКСО. Элементы 1—4 могут выполнять функцию элементов нациодов и нанотранзисторов на теплом температурном уровне, 5 и 6 — на промежуточных, а теплообменник нагрузки 7 — на холодном.

По аналогии с МК-системами охлаждения в nanoструктурах могут быть реализованы ЭК КСО.



**Рис. 17. Магнитокалорическая нанокриогенная система охлаждения:**

1, 2 — узлы прокачки теплоносителя; 3, 4 — ТО отвода теплоты; 5, 6 — блоки МК-рабочего тела; 7 — ТО нагрузки; 8 — электроды

Такие системы основаны на ЭК-эффекте, в результате которого некоторые сегнетоэлектрики при поляризации нагреваются и охлаждаются при уменьшении электрического поля [30]. Построение ЭК наноКСО аналогично МК наноКСО, приведенной на рис. 17.

Следует отметить, что на схематическом уровне вnanoструктурах теоретически возможна реализация большинства криогенных и холодильных систем охлаждения. Так, углеродные нанотрубки обладают адсорбционными свойствами, что создает предпосылки для создания адсорбционных наноКСО. Тем не менее, рассмотренные наноКСО представляются наиболее перспективными.

**Конструктивный уровень.** Этот уровень имеет две составляющие:

- проведение расчетов;
- разработка конструкторской документации.

*Проведение расчетов* в газовых трактах nanoструктур связано с целым рядом трудностей из-за отсутствия не только инженерных методик расчета наноКСО, но и из-за отсутствия теоретических и эмпирических зависимостей поведения газов в каналах наноразмеров. Практически все выражения тепломассообмена и гидравлики построены на эмпирических коэффициентах, зависящих от размеров, геометрии, среды, температурного уровня и большого числа других параметров. Более того, не ясно, насколько будут выполняться уравнения состояния газов в объемах наноразмеров. И в первом, и во втором случаях сильное влияние будут оказывать пристеночные и другие пограничные эффекты, а также сорбционные эффекты в наноканалах. Например, трудно предсказать, как поведут себя молекулы газов в межстенных каналах вложенных нанотрубок с характерным размером 0,34 нм. В этом случае подходы статистической физики становятся уже непригодными.

Рассмотренные выше эффекты в nanoструктурах в настоящее время исследованы только каче-

ственno. Для получения количественных соотношений требуется проведение целого ряда теоретических и экспериментальных исследований.

*Разработка конструкторской документации* на наноКСО должна проводиться одновременно с конструкторской разработкой наноэлектронных приборов, так как это одно неразрывное целое.

**Технологический уровень.** Существующие технологии, применяемые в криогенной и микро-криогенной технике, не могут быть использованы для производства наноКСО по очевидным причинам. Оборудование, предназначенное для производства микроKСO, также непригодно в нанотехнологиях. Вместе с тем, в настоящее время электронные нанотехнологии только разрабатываются. Стабильные технологии отсутствуют по целому ряду процессов. Оборудование для производства электронных наноприборов также находится в стадии разработки. Из этого следует, что отставание нанокриогенных технологий от наноэлектронных может быть скомпенсировано в достаточно короткие сроки, так как существующий задел в наноэлектронных технологиях может быть использован в нанокриогенных технологиях.

В заключение следует сделать вывод: криогенные системы охлаждения могут быть реализованы в nanoструктурах, что позволит расширить области применения как криогенной, так и электронной техники.

#### Список литературы

1. Грезин А. К., Зиновьев В. С. Микрокриогенная техника. М.: Машиностроение, 1977. С. 232.
2. Saito R. et al. Physical of carbon nanotubes // Imperial College Press Publishes. 1998. Р. 259.
3. Rocherfort A., Avouris Ph., Lesage F., Salahub D. R. Electrical and mechanical properties of distorted carbon nanotubes // Phys. Rev. B. November, 1999.
4. Rocherfort A., Salahub D. R., Avouris Ph. Effects of finite length on the electronic structure of carbon nanotubes // Journal of Physical Chemistry. 1999. V. 103. P. 641—646.
5. Colbert D. T., Smalley R. E. Past, Present and Future of Fullerene Nanotubes' Buckytubes // Perspectives of Fullerene Nanotechnology, 3—10, Kluwer Academic Publishers. 2002.
6. Avouris Ph., Hertel T., Martel R., Schmidt T., Shea H. R., Walkup R. E. Carbon Nanotubes: Nanomechanics, Manipulation, and Electronic Devices // Applied Surface Science? 1999, 141. P. 201.
7. Hertel T., Walkup R. E., Avouris Ph. Deformation of carbon nanotubes by surface Van Der Waals forces // Phys. Rev. 1998. V. 58 (20). P. 13870—13873.
8. Berber S., Kwon Y.-K., Tomanek D. Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes // Phys. Rev. Lett. 2000. 84. P. 4613.
9. Petr. Kral, Mele E. J., Tomanek D. Photogalvanic effects in heteropolar nanotubes // Phys. Rev. Lett. 2000. 85.
10. De Heer W. A., Chatelain A., Ugarte D. A carbon nanotube field-emission electron source // Science. 1995. 270. P. 1179—1180.
11. Mintmire J. W., Dunlap B. I., White C. T. Are fullerene tubes metallic? // Phys. Rev. Lett. 1992. 68 (5). P. 631—634.
12. Dillon A. C., Jones K. M., Bekkedahl T. A., Kiang C. H., Bethune B. S., Heben M. J. Storage of hydrogen in single-walled carbon nanotubes. Nature, 1997. 386. P. 377—379.

13. Ruoff R. S., Lorents D. C., Chan B., Malhotra R., Subramoney S. Single-crystal metals encapsulated in carbon nanoparticles // Science. 1993. Vol. 259. P. 346.
14. Tans S. J., Verschueren A. R. M., Dekker C. Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube // Nature. 1998. 393. P. 49–52.
15. Tans S. J., Devoret M. H., Dai H., Thess A., Smalley R. E., Geerligs L. J., Dekker C. Individual single-wall carbon nanotubes as quantum wires // Nature. 1997. 386. P. 474–477.
16. Hy Y., Ahn C. C., Witham C., Fultz B., Liu J., Rinzler A. G., Colbert D., Smith K. A., Smalley R. E. Hydrogen Adsorption and Cohesive Energy of Single-Walled Carbon Nanotubes // Applied Physics Letters. 1999. 74. P. 2307–2309.
17. Liu C., Fan Y. Y., Liu M., Cong H. T., Cheng H. M., Dresselhaus M. S. Hydrogen Storage in Single-Walled Carbon Nanotubes at Room Temperature // Science. 1999. Vol. 286. P. 1127.
18. Бродянский В. М., Семенов А. М. Термодинамические основы криогенной техники. М.: Энергия, 1980. С. 448.
19. Landman U., Barnett R., Scherbakov A. G., Avouris Ph. Metal-Semiconductor Nanocontacts: Silicon Nanowires // Phys. Rev. Letters. 2001. Vol. 85. No 9. P. 1958.
20. Berber S., Kwon Young-Kyun, Tomanek D. Unusually High Thermal Conductivity of Carbon Nanotubes // Phys. Rev. Lett. 2000. 84. P. 4613.
21. Rochedfort A., Salahub D. R., Avouris P. Effects of Finite Length on the Electronic Structure of Carbon Nanotubes // Journal of Physical Chemistry. 1999. Vol. 103. P. 641–646.
22. Hertel T., Walkup R. E., Avouris Ph. Deformation of carbon nanotubes by surface van der Waals forces // Phys. Rev. 1998. B. 58. P. 13870.
23. Mintmire J. W., Dunlap B. I., White C. T. Are fullerene tubes metallic? // Phys. Rev. Lett. 1992. Vol. 68. P. 631.
24. Frank S., Poncharal P., Wang Z. L., de Heer W. A. Carbon nanotube quantum resistor // Science. 1998. 280. P. 1744–1746.
25. Poncharal P., Wang Z. L., Ugarte D., de Heer W. A. Electrostatic deflections and electromechanical resonances of carbon nanotubes // Science. 1999. 283. P. 1513–1516.
26. Bachtold A., Strunk C., Salvetat J. P., Bonard J. M., Forro L., Nussbaumer T., Schronenberger C. Aharonov-bohm oscillations in carbon nanotubes // Nature. 1999. 397. P. 673–675.
27. Loiseau, Willaime F., Demony N., Hug G., Pascard H. Boron nitride nanotubes with reduced numbers of layers synthesized by arc discharge // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 76. P. 4737–4740.
28. Martel R., Schmidt T., Shea H. R., Hertel T., Avouris Ph. Single- and multi- wall carbon nanotube field-effect transistors // Applied Physics Letters. 1998. 73. P. 2447.
29. MacroSonix. Acoustic compressors // ASME. November. 2000.
30. Синявский Ю. В., Пашков Н. Д., Карагусов В. И., Горбовой Ю. М. Электро- и магнитокалорические рефрижераторы: Обзорная информация. Сер. ХМ-6. М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ. 1986. С. 44.
31. Карагусов В. И., Карагусова Е. Е. Применение редкоземельных материалов в микрокриогенной технике // Сб. докладов технологического конгресса "Современные технологии при создании продукции военного и гражданского назначения". Омск: Изд-во ОмГТУ. 2001. Ч. 1. С. 206–208.

# Конструирование и моделирование МСТ

УДК 621.3.049.76

**В. П. Драгунов**, канд. физ.-мат. наук,  
Новосибирский государственный технический  
университет

## НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Исследуются нелинейные колебания круглых, квадратных, треугольных и шестиугольных диафрагм с жесткозашемленными краями. Получены аналитические выражения, позволяющие моделировать поведение упругих элементов микромеханических систем в нелинейном приближении. В качестве базовых уравнений используются динамические аналоги уравнений фон-Кармана, учитывающие напряжения, возникающие в срединной плоскости пластины.

### Введение

Эффективность работы большинства микромеханических систем (MMC) определяется не только их статическими, но и динамическими характеристиками, а в случае акселерометров, гироскопов, датчиков переменных давлений и т. п. динамиче-

ские характеристики и параметры становятся определяющими.

Динамические характеристики MMC в первую очередь определяются характеристиками их упругих элементов (УЭ). Основные особенности поведения упругих элементов MMC при переменных воздействиях обычно связаны с малой массой и относительно большими перемещениями УЭ. В результате появляются зависимости характеристик MMC от состояния окружающей воздушно-газовой среды, а также нелинейностей возвращающей силы (силы упругости диафрагмы) и электростатической силы [1, 2].

В настоящей статье рассматривается поведение УЭ MMC разной формы при воздействии однородного переменного внешнего давления с учетом нелинейностей возвращающей и электростатической сил.

### Модель

На рис. 1 представлено схематическое изображение подвижного узла MMC диафрагменного типа. При подаче давления  $P$  упругий элемент (диафрагма) прогибается, что и используется для совершения полезной работы. Прогиб диафрагмы в первую очередь определяется конструкцией УЭ (топологией, анизотропией упругих свойств, фор-

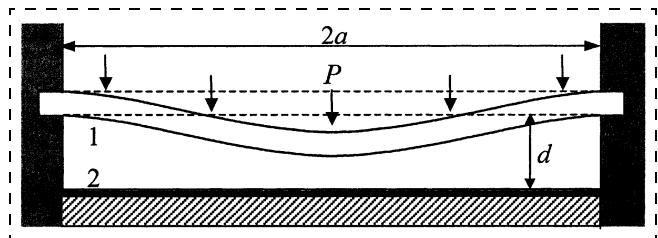


Рис. 1. Подвижный узел MMC:

1 — диафрагма (подвижный электрод); 2 — основание (неподвижный электрод)

мой), а также величиной и видом внешнего воздействия. Будем полагать, что наряду с приложенным давлением на диафрагму может действовать электростатическая сила, возникающая при приложении электрического напряжения  $V$  между диафрагмой (подвижный электрод) и основанием (неподвижный электрод).

Если прогибы диафрагмы  $W(x, y)$  соизмеримы с ее толщиной  $h$ , то при моделировании работы подвижного узла MMC необходимо находить самосогласованные решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, учитывающих напряжения, возникающие в срединной поверхности диафрагмы.

Совместим начало декартовой системы координат с положением центра тяжести диафрагмы при отсутствии внешнего давления. Оси  $x$  и  $y$  расположим в срединной плоскости невозмущенной диафрагмы, а ось  $z$  направим перпендикулярно ее поверхности. Обозначим  $U$ ,  $V$  и  $W$  перемещение точек срединной поверхности соответственно по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Тогда система уравнений, описывающих перемещение диафрагмы при воздействии переменного давления с учетом усилий, возникающих в срединной поверхности, может быть представлена в виде

$$(L - Q + \rho h G) W(x, y, t) = P^*(x, y, t); \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} &= \rho h \frac{\partial^2 U(x, y, t)}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial x} &= \rho h \frac{\partial^2 V(x, y, t)}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для изотропного случая

$$L = D \left( \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \right);$$

$$Q = N_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} + 2T \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2}{\partial y^2};$$

$$G = \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \frac{\partial}{\partial y};$$

$$T = \frac{12}{h^2} D \frac{(1-\nu)}{2} \left\{ \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial x} \frac{\partial W}{\partial y} \right\};$$

$$N_x = \frac{12}{h^2} D \left\{ \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 + \nu \left[ \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 \right] \right\};$$

$$N_y = \frac{12}{h^2} D \left\{ \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 + \nu \left[ \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 \right] \right\};$$

$$D = \frac{h^3}{12} \frac{E}{1-\nu^2},$$

где  $\rho$  — плотность;  $E$  — модуль упругости материала диафрагмы;  $P^*(x, y, t)$  — интенсивность внешних воздействий (включая воздействие окружающей воздушно-газовой среды);  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

Для последовательного учета влияния окружающей воздушно-газовой среды на перемещение диафрагмы необходимо совместно с (1) и (2) решать систему уравнений Навье—Стокса, а при наличии электростатических полей — еще и уравнение Пуассона. В общем случае такая система уравнений допускает лишь численное решение и сложна для анализа, поэтому большой интерес представляет поиск приближенных аналитических решений.

Для представления модели в аналитической форме, во-первых, пренебрежем силами инерции, действующими вдоль осей  $x$  и  $y$ . Во-вторых, влияние окружающей воздушно-газовой среды учтем в рамках гипотезы вязкого трения. В-третьих, ограничимся рассмотрением УЭ с большим отношением их латеральных размеров  $2a$  к расстоянию между электродами  $d$  (рис. 1). Тогда при оценке распределения напряженности электрического поля под диафрагмой можно не учитывать искривление силовых линий, а также пренебречь краевыми эффектами.

С учетом сделанных допущений система (1), (2) примет вид

$$\begin{aligned} \left( \rho h \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \mu \frac{\partial}{\partial t} + L - Q \right) W(x, y, t) &= \\ &= P(x, y, t) + P_{\text{эл}}(x, y, t); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad (4)$$

здесь  $\mu$  — коэффициент успокоения;  $P_{\text{эл}}(x, y, t) = \varepsilon \varepsilon_0 V_0^2 / [2d^2(1 - Wd)^2]$  — давление, создаваемое

электростатической силой при приложении постоянного электрического напряжения  $V_0$ ;  $Wd = W(x, y, t)/d$ .

В дальнейшем будем полагать, что диафрагма УЭ жестко защемлена по внешнему контуру, т. е. перемещения  $W$ ,  $U$  и  $V$  на внешнем контуре равны нулю. При этом на контуре равна нулю также и первая производная  $W$  по нормали к внешнему контуру. В качестве начальных условий примем, что при  $t = 0$  диафрагма находилась в невозмущенном состоянии, когда  $W(x, y, 0) = 0$  и  $\partial W(x, y, t)/\partial t = 0$ .

Решение системы (3), (4) будем искать методом Бубнова—Галеркина. Оценки показывают [3, 4], что в диапазоне частот от нуля до частоты главного резонанса при перемещениях диафрагмы, меньших ее толщины, влияние высших гармоник на динамические характеристики УЭ достаточно мало, и в дальнейшем мы им будем пренебречь. В этом случае в первом приближении перемещения  $W$ ,  $U$  и  $V$  можно представить в виде

$$W(x, y, t) = W_0(t)\varphi_w(x, y); \quad (5)$$

$$\begin{aligned} U(x, y, t) &= W_0(t)^2\varphi_u(x, y); \\ V(x, y, t) &= W_0^2(t)\varphi_v(x, y), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $W_0(t)$  — прогиб в точке, соответствующей центру тяжести диафрагмы;  $\varphi_k(x, y)$  — функции, определяемые граничными условиями и симметрией задачи. Тогда уравнение, определяющее прогиб диафрагмы в любой момент времени при воздействии однородного внешнего давления  $P(t)$ , примет вид

$$\begin{aligned} \iint_S \left[ \left( \rho h \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \mu \frac{\partial}{\partial t} + L - Q \right) \varphi_w(x, y) W_0(t) - \right. \\ \left. - P_{\text{общ}}(x, y, t) \right] \varphi_w(x, y) dx dy = 0; \end{aligned} \quad (7)$$

здесь  $S$  — площадь диафрагмы;  $P_{\text{общ}}(x, y, t) = P(t) + P_{\text{эл}}(x, y, t)$ .

Ограничим максимальный прогиб диафрагмы  $W_0(t)$  значением  $W_0(t)_{\max} \leq 0,25d$ . Тогда с погрешностью порядка нескольких процентов выражение для давления, создаваемого электростатической силой, можно представить в виде

$$P_{\text{эл}}(x, y, t) \approx \frac{\varepsilon \varepsilon_0 V_0^2}{2d^2} (1 + 2Wd + 3Wd^2 + 4Wd^3). \quad (8)$$

Интегрируя (7) и учитывая (8), получим уравнение, связывающее прогиб  $W_0(t)$  и внешнее воздействие  $P(t)$ :

$$\begin{aligned} \left( \rho h A_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \mu A_0 \frac{\partial}{\partial t} + A_1 \right) W_0(t) + A_3 W_0(t)^3 = \\ = P(t)g + F(V_0, t), \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} F(V_0, t) = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{2} \left( \frac{V_0}{d} \right)^2 \left\{ g + 2A_0 \frac{W_0(t)}{d} + \right. \\ \left. + 3A_2 \left( \frac{W_0(t)}{d} \right)^2 + 4q \left( \frac{W_0(t)}{d} \right)^3 \right\}; \end{aligned}$$

$$A_0 = \iint_S \varphi_w(x, y)^2 dx dy;$$

$$A_1 = \iint_S \varphi_w(x, y) L \varphi_w(x, y) dx dy;$$

$$A_2 = \iint_S \varphi_w(x, y)^3 dx dy;$$

$$A_3 = - \iint_S \varphi_w(x, y) Q^* \varphi_w(x, y) dx dy;$$

$$g = \iint_S \varphi_w(x, y) dx dy; \quad q = \iint_S \varphi_w(x, y)^4 dx dy;$$

$$Q^* = W_0(t)^{-2} Q.$$

Таким образом, при учете усилий, возникающих в срединной поверхности, и электрического поля в уравнении, определяющем прогиб диафрагмы, появляются слагаемые, пропорциональные  $W_0^2(t)$  и  $W_0^3(t)$ .

Полученные выражения позволяют провести анализ влияния топологии диафрагмы, а также нелинейностей возвращающей и электростатической сил, на динамические характеристики УЭ.

## Результаты расчетов и обсуждение

В качестве пробных для  $\varphi_w(x, y)$ ,  $\varphi_u(x, y)$  и  $\varphi_v(x, y)$  будем использовать функции, приведенные в [5]. При этом для плоских диафрагм, имеющих форму круга или правильного многоугольника, уравнение (9) можно представить в виде

$$\begin{aligned} \frac{1}{\omega_0^2} \frac{\partial^2 Wh}{\partial t^2} + \frac{\mu}{\rho h \omega_0^2} \frac{\partial Wh}{\partial t} + \alpha_1 Wh + \alpha_2^* Wh^2 + \\ + \alpha_3^* Wh^3 = \alpha_0^* P(t) \frac{S^2}{Dh}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $Wh = (W_0(t) - W_s(V_0))/h$ ;  $W_s(V_0)$  — статический прогиб в точке, соответствующей центру тяжести диафрагмы, под действием только постоянного электрического поля;  $\omega_0$  — собственная частота соответствующей линейной системы в отсутствии

затухания;  $\alpha_k$  — коэффициенты, зависящие от топологии диафрагмы, ее размеров и приложенного напряжения  $V_0$ . Расчеты показывают, что для круглой диафрагмы

$$\alpha_1 = 1 + 2,25\lambda_0 \left( \frac{W_s(V_0)}{h} \right)^2 - \left[ 1,9 + 4,07 \frac{W_s(V_0)}{d} + 6,33 \left( \frac{W_s(V_0)}{d} \right)^2 \right] 10^{-3} SV;$$

$$\alpha_2^* = 2,25\lambda_0 \frac{W_s(V_0)}{h} - \left[ 2,036 \frac{h}{d} + 6,33 \frac{W_s(V_0)}{h} \left( \frac{h}{d} \right)^2 \right] 10^{-3} SV;$$

$$\alpha_3^* = 0,75\lambda_0 - 0,00211 \left( \frac{h}{d} \right)^2 SV; \quad \alpha_0^* = 0,00158;$$

$$\omega_0^{-2} = 9,5 \cdot 10^{-4} \rho h \frac{S^2}{D};$$

для квадратной диафрагмы

$$\alpha_1 = 1 + 2,69\lambda_4 \left( \frac{W_s(V_0)}{h} \right)^2 - \left[ 1,54 + 3,26 \frac{W_s(V_0)}{d} + 5,03 \left( \frac{W_s(V_0)}{d} \right)^2 \right] 10^{-3} SV;$$

$$\alpha_2^* = 2,69\lambda_4 \frac{W_s(V_0)}{h} - \left[ 1,63 \frac{h}{d} + 5,03 \frac{W_s(V_0)}{h} \left( \frac{h}{d} \right)^2 \right] 10^{-3} SV;$$

$$\alpha_3^* = 0,897\lambda_4 - 0,00168 \left( \frac{h}{d} \right)^2 SV; \quad \alpha_0^* = 0,00133;$$

$$\omega_0^{-2} = 7,72 \cdot 10^{-4} \rho h \frac{S^2}{D};$$

для диафрагмы в форме правильного шестиугольника

$$\alpha_1 = 1 + 0,78\lambda_6 \left( \frac{W_s(V_0)}{h} \right)^2 - \left[ 1,44 + 3,076 \frac{W_s(V_0)}{d} + 4,6 \left( \frac{W_s(V_0)}{d} \right)^2 \right] 10^{-3} SV;$$

$$\alpha_2^* = 0,78\lambda_6 \frac{W_s(V_0)}{h} - \left[ 1,503 \frac{h}{d} + 4,6 \frac{W_s(V_0)}{h} \left( \frac{h}{d} \right)^2 \right] 10^{-3} SV;$$

$$\alpha_3^* = 0,259\lambda_6 - 0,00153 \left( \frac{h}{d} \right)^2 SV; \quad \alpha_0^* = 0,00129;$$

$$\omega_0^{-2} = 7,23 \cdot 10^{-4} \rho h \frac{S^2}{D};$$

для диафрагмы в форме правильного треугольника

$$\alpha_1 = 1 + 0,92\lambda_3 \left( \frac{W_s(V_0)}{h} \right)^2 - \left[ 1 + 2,114 \frac{W_s(V_0)}{d} + 3,26 \left( \frac{W_s(V_0)}{d} \right)^2 \right] 10^{-3} SV;$$

$$\alpha_2^* = 0,92\lambda_3 \frac{W_s(V_0)}{h} - \left[ 1,06 \frac{h}{d} + 3,26 \frac{W_s(V_0)}{h} \left( \frac{h}{d} \right)^2 \right] 10^{-3} SV;$$

$$\alpha_3^* = 0,306\lambda_3 - 0,00109 \left( \frac{h}{d} \right)^2 SV; \quad \alpha_0^* = 0,000857;$$

$$\omega_0^{-2} = 5 \cdot 10^{-4} \rho h \frac{S^2}{D}.$$

Выражения для коэффициентов  $\lambda_k$  приведены в [6].

Согласно (10), собственная частота соответствующей линейной задачи  $\omega = \omega_0 \sqrt{\alpha_1}$ . На рис. 2 приведены зависимости нормированной частоты собственных колебаний диафрагмы  $\omega^* = \omega(S \sqrt{\rho h / D})$  от приведенного электрического напряжения  $SV = 0,5 \varepsilon_0 V_0^2 S^2 / (D d^3)$ . Видно, что с учетом нелинейности возвращающей силы увеличение приложенного напряжения  $V_0$  может приводить не только к уменьшению ("soft-spring" effect), но и к уве-

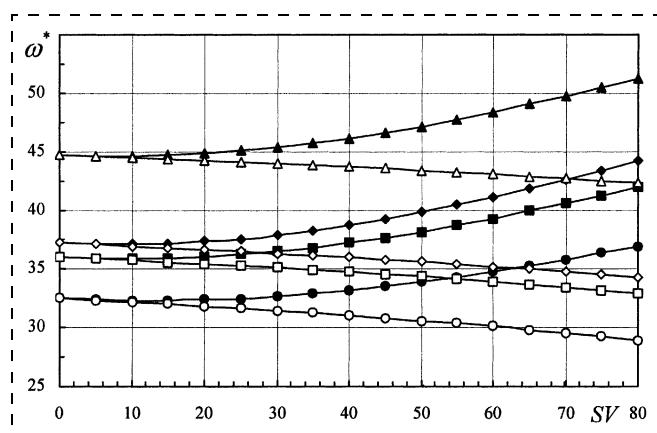


Рис. 2. Зависимости нормированной частоты собственных колебаний  $\omega^*$  для диафрагм разной формы от приведенного электрического напряжения  $SV$ :

●○ — для круглой диафрагмы; ■□ — для квадратной диафрагмы; ▲△ — для треугольной диафрагмы; ◆◇ — для шестиугольной диафрагмы. Тёмные маркеры соответствуют  $d/h = 5$ , светлые —  $d/h = 0,5$

личению ("hard-spring" effect) частоты собственных колебаний диафрагмы. Такое поведение связано с тем, что постоянное электрическое поле создает предварительный прогиб диафрагмы и напряжения в срединной поверхности. В результате при увеличении отношения  $d/h$  даже при  $W_s(V_0) \leq 0,25d$  отношение  $W_s(V_0)/h$  может стать больше 0,2, и нелинейность возвращающей силы станет существенной, что приведет к росту эффективной жесткости диафрагмы.

Приведем (10) к безразмерному виду. Для этого введем безразмерную переменную  $t^* = \omega t$ . Тогда (10) запишем в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 Wh}{\partial t^{*2}} + 2\eta \frac{\partial Wh}{\partial t^*} + Wh + \alpha_2 Wh^2 + \alpha_3 Wh^3 = \\ = \alpha_0 \frac{S^2}{Dh} P\left(\frac{t^*}{\omega}\right), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $2\eta = \mu/(\rho h \omega)$ , а  $\alpha_k = \alpha_k^*/\alpha_1$ . Оценки показывают, что коэффициенты у нелинейных членов в (11) при изменении формы диафрагмы могут изменяться более чем на 30 %.

В общем случае аналитическое решение уравнения (11) возможно только для статического случая. При переменных воздействиях решение ищется либо численно, либо приближенными методами. В случае слабой нелинейности решение уравнения (11) удается представить в аналитической форме [7]. Проанализируем поведение такой системы со слабой нелинейностью при гармоническом внешнем воздействии, т. е. положим в (11), что

$$\begin{aligned} \alpha_0 \frac{S^2}{Dh} P\left(\frac{t^*}{\omega}\right) = \alpha_0 \frac{S^2}{Dh} P_0 \cos\left(\frac{\Omega}{\omega} t^*\right) = \\ = F_0 \cos\left(\frac{\Omega}{\omega} t^*\right), \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\Omega$  — частота вынуждающей силы, а  $F_0 = \alpha_0 S P$ .

Для малых амплитуд воздействий  $P_0$ , когда нелинейностью возвращающей силы можно пренебречь, решение (11) имеет вид

$$\begin{aligned} Wh = a \exp(-\eta t^*) \cos\left(\frac{\omega_d}{\omega} t^* + \beta\right) + \\ + F_0^* \cos\left(\frac{\Omega}{\omega} t^* + \vartheta\right), \end{aligned} \quad (13)$$

т. е. совпадает с решением для соответствующей линейной системы (здесь  $a$  — амплитуда свободных колебаний,  $\omega_d^2 = \omega^2(1 - 4\eta^2)$ , а  $F_0^*$  — амплитуда вынужденных колебаний). В установившемся режиме при этом сохраняются только вынужденные колебания с частотой вынуждающей силы, но

сдвинутые по фазе по отношению к возбуждению. Этот сдвиг зависит от затухания и соотношения между  $\Omega$  и  $\omega$ .

При увеличении  $P_0$  и (или)  $\Omega \approx \omega$  амплитуда колебаний увеличивается и в (11) уже нельзя пренебречь нелинейными членами. Однако анализ показывает, что за исключением особых случаев, когда отношение  $\Omega/\omega$  близко к 1/3, 1/2, 1, 2 или 3, решение (11) можно представить в виде

$$Wh \approx a(t^*) \cos(t^* + \beta(t^*)) + F_0^* \cos\left(\frac{\Omega}{\omega} t^* + \vartheta\right). \quad (14)$$

При этом в установившемся режиме  $a(\infty) \rightarrow 0$  и в первом приближении решение для нелинейной системы совпадает с решением для соответствующей линейной системы.

В окрестности же главного резонанса, когда  $\Omega \approx \omega$ , член, соответствующий свободным колебаниям, уже не может быть полностью отделен от вынужденной составляющей. При этом решение (11) принимает вид

$$Wh \approx a(t^*) \cos\left(\frac{\Omega}{\omega} t^* - \gamma(t^*)\right) +$$

$$+ 0,5\alpha_2 a(t^*)^2 \left[ \frac{1}{3} \cos\left(2\frac{\Omega}{\omega} t^* - 2\gamma(t^*)\right) - 1 \right], \quad (15)$$

где в установившемся режиме  $a$  и  $\gamma$  становятся константами, зависящими от амплитуды и частоты возбуждения. Анализ показывает, что в окрестности главного резонанса в установившемся режиме амплитуда колебаний  $a$  связана с параметром расстройки  $\sigma = \frac{\Omega}{\omega} - 1$  соотношением

$$\sigma = \frac{3}{8} \alpha a^2 \pm \sqrt{\frac{F_0^2}{4\alpha^2} - \eta^2}, \quad (16)$$

где  $\alpha = \alpha_3 - 1,11\alpha_2^2$ . Таким образом, нелинейные члены уравнения (11) дают вклад и в первое и во второе слагаемое (15). При этом из второго слагаемого, обусловленного только квадратичной нелинейностью, видно, что колебательное движение не симметрично относительно точки  $Wh = 0$  и что кроме колебаний с частотой вынуждающей силы  $\Omega$  в системе будут наблюдаться колебания с частотой  $2\Omega$ .

Зависимости амплитуды колебаний в окрестности главного резонанса от расстройки  $\sigma$  для круглой диафрагмы с  $dh = 0,5$  и 5, рассчитанные с использованием (16) при  $F_0 = 0,005$ ,  $SV = 0$  и 75, приведены на рис. 3 (сплошные линии). Видно, что учет нелинейности возвращающей и электростатической сил приводит к искривлению амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) диафраг-

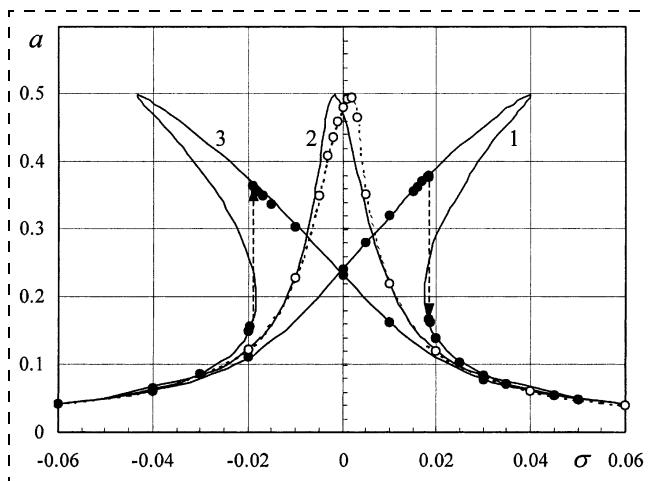


Рис. 3. Зависимости амплитуды колебаний для круглой диафрагмы от расстройки  $\sigma$ :

1 —  $SV = 0$ ,  $dh = 0,5$  и 5; 2 —  $SV = 75$ ,  $dh = 5$ ; 3 —  $SV = 75$ ,  $dh = 0,5$ . Сплошные линии — расчет по (16), точки — расчет методом Рунге—Кутта

мы в окрестности главного резонанса. Амплитуда и частота колебаний в резонансе определяются выражениями

$$a_p = \frac{F_0}{2\eta}; \quad \omega_p = \omega \left( 1 + \frac{3}{8} \alpha a_p^2 \right).$$

Заметим, что нелинейность системы привела к появлению зависимости резонансной частоты от амплитуды колебаний. В то же время сама амплитуда колебаний в резонансе не зависит от величины нелинейности системы, а значит, и от приложенного электрического напряжения  $V_0$ .

На этом же рисунке приведены соответствующие АЧХ (точки), полученные в результате решения уравнения (11) методом Рунге—Кутта без использования допущения о малости амплитуд колебаний. Видно, что согласие между результатами аналитического и численного расчетов достаточно хорошее, однако, в отличие от аналитических, численные расчеты не позволяют проводить оценки в областях неустойчивого равновесия.

На рис. 4 приведены зависимости амплитуды колебаний от расстройки  $\sigma$  в окрестности главного резонанса для диафрагм круглой, квадратной, шестиугольной и треугольной формы, рассчитанные при  $SV = 0$  и  $SP = 3,165$ . Аналогичные зависимости, рассчитанные при  $SV = 75$  и тех же значениях  $F_0$ , приведены на рис. 5. Отметим, что динамические характеристики у диафрагм квадратной и шестиугольной формы для одинаковых  $SP$  различаются слабо, а характерный вид кривых на рис. 4 и 5 указывает, что при снятии АЧХ в окрестности главного резонанса могут наблюдаться гистерезисные явления. Анализ решений (11) показывает, что

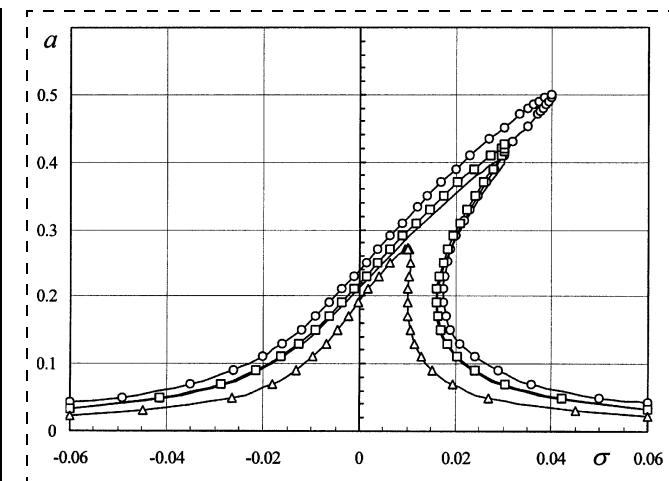


Рис. 4. Зависимости амплитуды колебаний от расстройки  $\sigma$  для диафрагм круглой —  $\circ$ , квадратной —  $\square$ , шестиугольной —  $-$ , и треугольной —  $\Delta$  формы, рассчитанные при  $SV = 0$  и  $SP = 3,165$

для  $\alpha > 0$  и при значениях  $F_0 \leq 1,433 \sqrt{2\eta/\alpha}$  резонансные кривые при любой расстройке соответствуют устойчивым состояниям равновесия системы. При этом гистерезисные явления еще не возникают.

Подобные гистерезисные явления при  $\alpha_2 = 0$  могут наблюдаться и в небольшой частотной области около  $\Omega \approx \omega_0/3$  [7, 8]. Решение (11) в окрестности данной частоты в первом приближении можно представить в виде

$$Wh = a(t^*) \cos \left( \frac{3\Omega}{\omega_0} t^* - \gamma(t^*) \right) + \\ + \frac{F_0}{(3\Omega/\omega_0)^2 - 1} \cos \left( \frac{\Omega}{\omega_0} t^* \right). \quad (17)$$

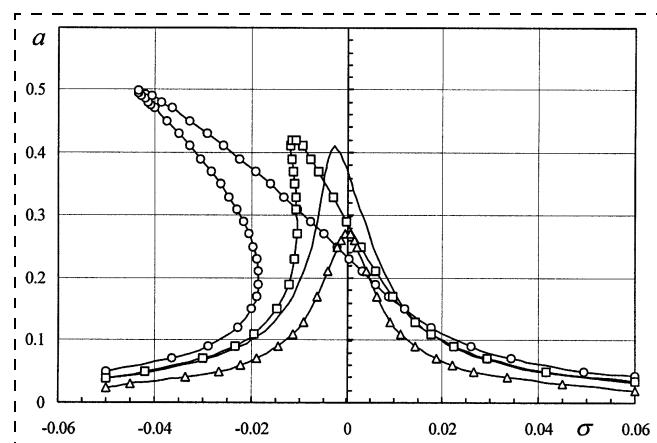


Рис. 5. Зависимости амплитуды колебаний от расстройки  $\sigma$  для диафрагм круглой, квадратной, шестиугольной и треугольной формы, рассчитанные при  $SV = 75$ . Обозначения те же, что на рис. 4

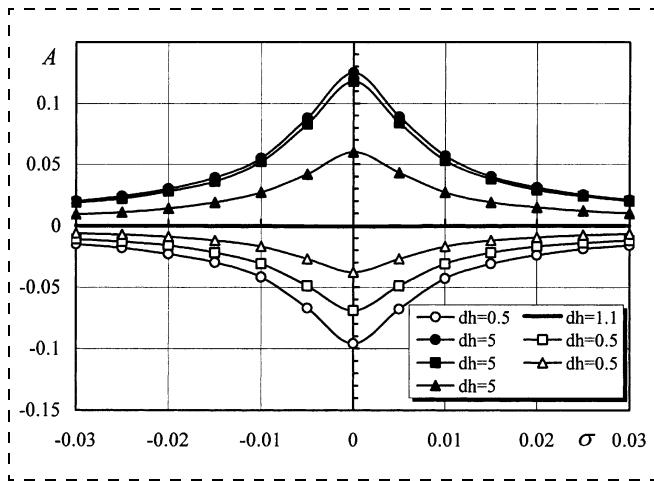


Рис. 6. Зависимости амплитуды колебаний на частоте  $2\Omega$  от расстройки  $\sigma$  для диафрагм круглой, квадратной и треугольной формы, рассчитанные при  $SV = 75$  и  $F_0 = 0,05$ . Обозначения те же, что и на рис. 2

В установившемся режиме  $a$  и  $\gamma$  в (17) становятся константами, зависящими от  $F_0$ ,  $\alpha$  и  $\sigma$ . При этом колебания, соответствующие свободной составляющей, в отличие от линейного случая, не исчезают. Данные колебания происходят с частотой  $3\Omega$ . Анализ показывает, что в установившемся режиме связь между амплитудой собственных колебаний, расстройкой  $\sigma$  и возбуждающей силой  $F_0$  в этом случае определяется выражением

$$\sigma = 3\alpha\Lambda^2 + \frac{3}{8}\alpha a^2 \pm \sqrt{\left(\frac{\alpha}{a}\Lambda^3\right)^2 - \eta^2}, \quad (18)$$

где  $\Lambda = 0,5F_0/[1 - (3\Omega/\omega_0)^2]$ . При этом амплитуду колебаний и расстройку, соответствующие максимумам кривых, можно оценить, используя выражения

$$a_{\max} = \frac{\alpha}{\eta}\Lambda^3 \quad \text{и} \quad \sigma_{\max} = 3\alpha\Lambda^2 \left(1 + \frac{\alpha^2}{8\eta^2}\Lambda^4\right).$$

Сопоставляя (16) и (18), можно заметить, что в последнем случае (супергармонический резонанс) для достижения заметных амплитуд колебаний потребуется значительно большая амплитуда внешнего воздействия.

В случае  $\alpha_2 \neq 0$  супергармонический резонанс будет наблюдаться при частоте возбуждения  $\Omega \approx \omega/2$ . Решение (11) в окрестности данной частоты для малых амплитуд колебаний в первом приближении можно представить в виде

$$Wh = \frac{F_0}{1 - (\Omega/\omega)^2} \cos\left(\frac{\Omega}{\omega} t^*\right) - A \cos\left(\frac{2\Omega}{\omega} t^* - \gamma\right),$$

где  $A = \alpha_2 F_0^2 / \{4[1 - (\Omega/\omega)^2]^2 \sqrt{\eta^2 + \sigma^2}\}$ ;  $\sigma = 2\Omega/\omega - 1$ ,  $\gamma = \arctg(\sigma/\eta)$ .

Зависимости амплитуды колебаний  $A$  на частоте  $2\Omega$  от расстройки  $\sigma$  для диафрагм круглой, квадратной и треугольной формы, рассчитанные при  $SV = 75$  и  $F_0 = 0,05$ , приведены на рис. 6. Видно, что при изменении отношения  $d/h$  амплитуда свободной составляющей колебаний изменяет знак. В результате можно подобрать такие значения  $d/h$  и  $SV$ , при которых колебания на частоте  $2\Omega$  практически будут отсутствовать.

### Заключение

В статье рассмотрено влияние нелинейности возвращающей силы диафрагмы и электростатической силы на поведение УЭ ММС при переменных внешних воздействиях. Получены аналитические выражения, позволяющие моделировать влияние электрического поля и однородного внешнего давления на динамические характеристики УЭ круглой, квадратной, треугольной и шестиугольной формы. Обнаружено, что в зависимости от значения отношения  $d/h$  увеличение электрического поля может приводить не только к уменьшению, но и к увеличению частоты собственных колебаний УЭ. В окрестности основного и супергармонического резонансов рассчитаны АЧХ для диафрагм разной формы. Установлено, что соответствующим выбором  $d/h$  и  $SV$  можно практически подавить колебания диафрагмы на частоте  $2\Omega$ .

### Список литературы

1. Bao M., Yang H., Sun Y., French P. Modified Reynolds' equation and analytical analysis of squeeze-film air damping of perforated structures // J. of Micromechanics and Microengineering. 2003. N 13. P. 795–800.
2. Gui C., Legtenberg R., Tilmans H. A. C., Fluitman J. H. J., Elwenspoek M. Nonlinearity and hysteresis of resonant strain gauges // J. of Microelectromechanical systems. 1998. V. 7. N 1. P. 122–127.
3. Драгунов В. П. Расчет передаточной характеристики прямоугольного упругого элемента интегрального тензореобразователя // Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1996. С. 93–99.
4. Thomas O., Touze C., Chaigne A. Asymmetric non-linear forced vibrations of free-edge circular plates. Part II: experiments // J. of Sound and Vibratio. 2003. N 265. P. 1075–1101.
5. Драгунов В. П. Нелинейность упругих элементов микромеханических систем // Микросистемная техника. 2004. № 5. С. 7–13.
6. Драгунов В. П. Нелинейная модель упругого элемента МЭМС // Микросистемная техника. 2004. № 6. С. 19–24.
7. Nayfeh A. H., Mook D. T. Nonlinear oscillations. New York. Wiley classics library edition published. 1995. 704 p.
8. Драгунов В. П. Динамическая модель упругого элемента микромеханических систем // Научный вестник НГТУ. 2004. № 1 (16). С. 93–103.

# ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

УДК 681.7.068.4

**Ю. Н. Кульчин**, д-р физ.-мат. наук,  
**О. Т. Каменев**, канд. физ.-мат. наук,  
**Ю. С. Петров**,  
Дальневосточный государственный технический  
университет (ДВПИ им. В. В. Куйбышева),  
г. Владивосток

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ АМПЛИТУДЫ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

*Представлены общие принципы организации распределенной волоконно-оптической измерительной сети, а также принципы организации и построения такой сети для восстановления распределения поля амплитуды поперечных колебаний исследуемой поверхности.*

### Введение

Развитие волоконно-оптических телекоммуникационных систем привело к формированию в восьмидесятых годах прошлого столетия новой области оптоэлектроники — волоконно-оптических датчиков (ВОД). Достоинства ВОД, такие как высокая чувствительность, малые размеры, устойчивость к электромагнитным помехам и агрессивным воздействиям окружающей среды, потенциально низкая стоимость, определили их дальнейшее развитие [1]. Однако современные тенденции развития измерительной техники показывают, что в настоящее время для получения в реальном времени достоверной картины о состоянии контролируемых объектов и протекающих в них процессах необходимо применение информационно-измерительных систем, в состав которых входит большое число различных датчиков физических величин, объединенных в единые измерительные сети. Применение отдельных датчиков в такой системе становится беспerspektивным, так как при этом число информационных каналов, равное числу датчиков, резко возрастает, что приводит к снижению помехозащищенности измерительной системы, а также делает затруднительным получение достоверных результатов измерений ввиду необходимости

стии обработки значительных информационных массивов в реальном времени. Поэтому в последние годы во всем мире большое внимание уделяется поиску принципиально новых подходов к построению информационно-измерительных систем, в которых датчики должны объединяться в сложные измерительные сети [2].

Одним из наиболее перспективных путей решения указанной задачи является разработка датчиков с распределенной в пространстве чувствительностью, которые могут быть легко объединены в распределенную измерительную сеть. Наиболее подходящей элементной базой для создания подобных устройств является волоконная оптика, так как наряду с перечисленными выше достоинствами волоконно-оптические датчики сочетают в одном и том же измерительном тракте функции как информационного канала, так и измерительного преобразователя. Это делает возможным создание принципиально новых быстродействующих распределенных измерительных устройств, способных интегрироваться в сложные информационно-измерительные системы [3] и осуществлять контроль за многомерными функциями распределения физических полей.

В данной работе представлены общие принципы организации распределенной волоконно-оптической измерительной сети, а также принципы организации и построения такой сети для восстановления распределения поля амплитуды поперечных колебаний исследуемой поверхности.

### Общие принципы построения распределенной волоконно-оптической измерительной сети

В общем случае распределенная волоконно-оптическая измерительная сеть (РВОИС) представляет собой набор отдельных измерительных линий, определенным образом уложенных в пространстве. Топология РВОИС определяется характером решаемой задачи, а также методами сбора и обработки информации об исследуемом физическом поле. Для уменьшения числа информационных каналов следует использовать томографические методы [4], реализация которых предполагает формирование каждой измерительной линией интегрального образа функции распределения физического поля. Как показано в работе [5], даже в случае неполного набора интегральных образов, формируемого РВОИС, возможно успешное восстановление распределения скалярного физического поля.

При реализации томографических методов сбора информации топология РВОИС либо соответ-

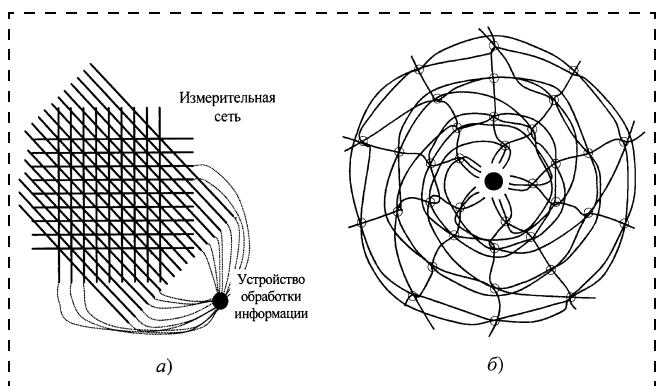


Рис. 1. Топология распределенной измерительной сети:  
а — прямолинейная; б — "паутина"

ствует классической томографии, в которой свет распространяется прямолинейно (рис. 1, а), либо строится по аналогии с паучьей сетью, когда вся информация сходится к центру системы, где располагается устройство обработки информации (рис. 1, б). Первый вариант предназначен для случаев, когда устройство обработки находится за пределами области исследования (мониторинг поверхностей физических объектов и т. п.), второй вариант предназначен для охранных сетей. Отклонения топологии измерительной сети от принципов классической томографии становятся возможными благодаря способности волоконных световодов (ВС) направлять оптическое излучение практически по любой траектории. Это обстоятельство, в частности, играет большую роль при построении измерительных сетей для мониторинга векторных физических полей [6].

Как показано на рис. 2, а, волоконно-оптическая измерительная линия (ВОИЛ) представляет собой измерительный преобразователь с распреде-

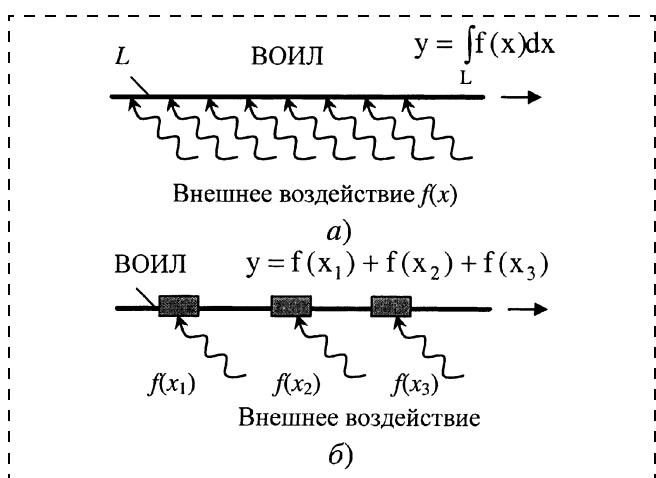


Рис. 2. Волоконно-оптическая измерительная линия:  
а — распределенная; б — квазираспределенная

ленной чувствительностью. На выходе такой линии формируется интегральный фазовый или амплитудный сигнал воздействия внешнего физического поля на ВОИЛ вдоль траектории укладки ВС [7]. Точность восстановления распределения исследуемого физического поля определяется частотой укладки ВОИЛ в области исследования. Если частота укладки выше максимальной пространственной частоты исследуемого поля, то распределение будет корректно восстановлено.

Так как томографические методы позволяют восстанавливать значения искомого распределения только в точках пересечения ВОИЛ, то необязательно обеспечивать чувствительность линии к исследуемому воздействию по всей длине линии. Достаточно сделать чувствительными только области пересечений. В этом случае возможно применение квазираспределенной ВОИЛ, которая представляет собой последовательное соединение точечных измерительных преобразователей [7] (рис. 2, б). Такая линия обладает большей помехозащищенностью.

Создание распределенной ВОИЛ возможно в случае использования для ее построения одноволоконного двухмодового интерферометра (ОДИ) [7]. ОДИ является основным компонентом для создания наиболее чувствительных волоконно-оптических датчиков физических величин — фазовых ВОД.

Как и в объемной оптике, принцип действия фазовых волоконно-оптических датчиков основан на регистрации интерферометрическим способом произошедших в результате внешних воздействий изменений фаз распространяющихся в волоконном световоде мод. Базой ОДИ является отрезок двухмодового волоконного световода, в котором распространяются две линейно поляризованные моды  $LP_{01}$  и  $LP_{11}$  (рис. 3, а). Подобное устройство наиболее полно соответствует принципам построе-

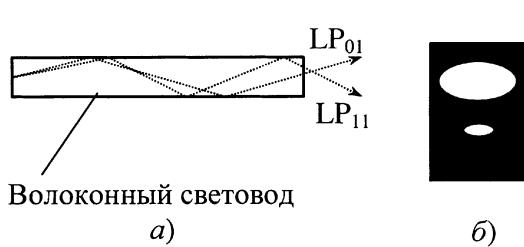


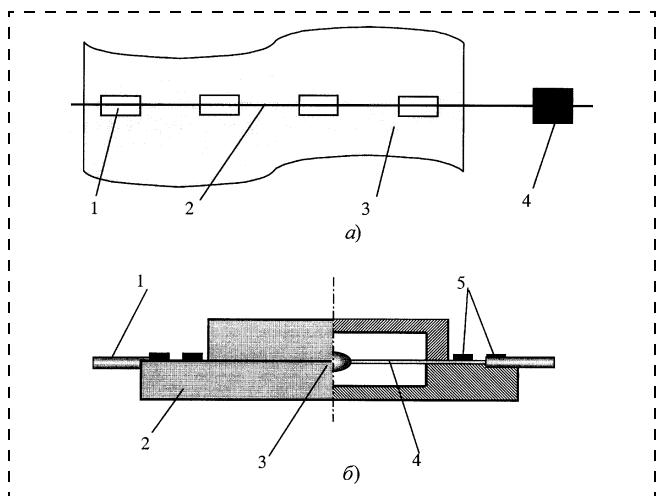
Рис. 3. Схема одноволоконного двухмодового интерферометра (а) и картина интерференции на его выходе (б)

ния распределенных измерительных линий, а картина интерференции на его выходе достаточно проста (рис. 3, б) и легко обрабатывается, что делает перспективным использование ОДИ для создания РВОИЛ.

### Распределенная волоконно-оптическая измерительная сеть для восстановления распределения поля амплитуды поперечных колебаний

Соотношение интенсивностей интерференционных пятен на выходе ОДИ определяется разностью фаз распространяющихся в волоконном световоде мод, которая изменяется при внешнем воздействии на измерительную линию. Чувствительность волоконного световода к незначительным (десятка микрометров) поперечным смещениям поверхности, на которой он закреплен, незначительна. Поэтому для исследования распределений амплитуды, интенсивности или связанных с ними скоростей и ускорений вибрационного поля конструкцию измерительной линии следует модифицировать, придав ей чувствительность к указанным параметрам. Поперечные колебания поверхности будут оказывать прямое воздействие на параметры излучения в волоконном световоде, если измерительную линию выполнить в виде набора чувствительных элементов (ЧЭ), содержащих отрезки ВС с закрепленными концами (рис. 4, а) [6].

Колебания отрезков ВС будут возбуждаться в ЧЭ под воздействием вибрации внешней среды так, как это происходит в классической задаче о



**Рис. 4. Волоконно-оптическая измерительная линия для регистрации амплитуды поперечных колебаний поверхности:**

а — схема линии; 1 — чувствительные элементы; 2 — двухмодовый волоконный световод; 3 — контролируемый объект; 4 — устройство фазовой демодуляции; б — сечение конструкции чувствительного элемента; 1 — оптоволоконный кабель; 2 — корпус; 3 — инерционная масса; 4 — двухмодовый ВС; 5 — крепления, обеспечивающие натяжение ВС

поперечных колебаниях струны под воздействием внешней периодической силы. При этом для повышения чувствительности в области низких частот к центру отрезков ВС в каждом из ЧЭ крепится инерционная масса (рис. 4, б). Результирующая деформация изгиба и растяжения отрезков обуславливает фазовую чувствительность ВОИЛ к параметрам вибрационного поля.

Простота интерференционной картины ОДИ позволяет использовать различные методы ее обработки. В данной конструкции предпочтение отдано использованию устройства фазовой демодуляции, которое представляет собой волоконно-оптический пространственный фильтр [7]. При этом интенсивность излучения на выходе линии описывается выражением

$$I = I_0(A + B \cos(C + D\Delta L)),$$

где  $I_0$  — интенсивность излучения на выходе устройства фазовой демодуляции;  $\Delta L$  — изменение длины волоконного световода ОДИ;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  — константы, определяемые параметрами ОДИ и пространственного фильтра. Для одного ЧЭ при малой амплитуде колебаний зависимость между удлинением световода и поперечным смещением поверхности  $y = y_0 \cos(\omega t)$  — линейная. Поэтому можно записать

$$I = I_0(A + B \cos(C + D_1 y_0 \cos(\omega t))),$$

где  $\omega$  — частота колебаний поверхности;  $D_1$  — константа. Если чувствительных элементов в линии несколько, а расстояние между ними много меньше характерного пространственного периода измеряемого поля, то изменение интенсивности излучения на выходе линии определяется суммой амплитуд колебаний точек поверхности  $y_\Sigma$ , в которых закреплены ЧЭ:

$$I = I_0(A + B \cos(C + D_1 y_\Sigma \cos(\omega t))). \quad (1)$$

Константа  $C$  определяется положением рабочей точки ОДИ. Если настроить ОДИ таким образом, чтобы рабочая точка находилась в центре линейной области косинусоидальной зависимости, то при малых колебаниях интенсивность излучения на выходе ВОИЛ будет описываться выражением

$$I = I_0(A_1 + B_1 y_\Sigma \cos(\omega t)). \quad (2)$$

Амплитуда переменной составляющей сигнала фотоприемника, установленного на выходе предлагаемой РВОИЛ, будет прямо пропорциональна суммарной амплитуде колебаний исследуемых точек поверхности, на которой уложена измерительная линия. При этом предполагается, что разность фаз колебаний в этих точках пренебрежимо мала либо отсутствует (случай стоячей волны).

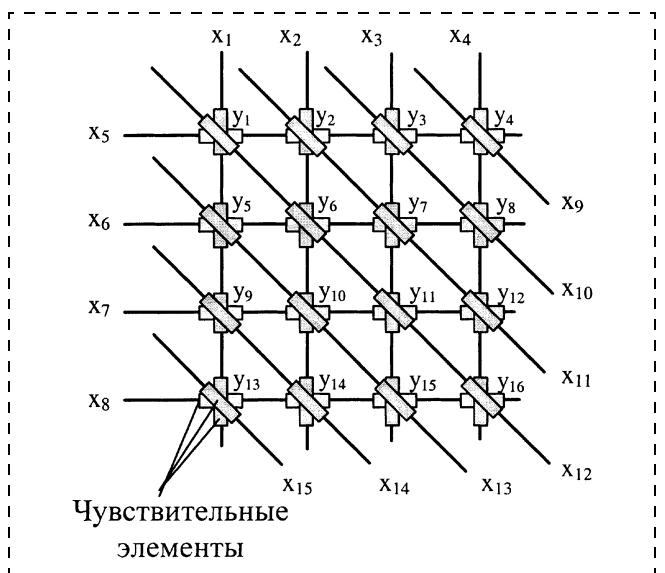


Рис. 5. Архитектура распределенной волоконно-оптической измерительной сети:

$y_1, \dots, y_{16}$  — амплитуды колебаний в 16 точках исследуемой поверхности;  $x_1, \dots, x_{15}$  — амплитуды изменения сигналов на выходе фотоприемников измерительных линий

На рис. 5 представлена схема укладки описанных ВОИЛ в распределенную измерительную сеть размерности  $4 \times 4$ . Так как исследуемое поле является скалярным, то число направлений укладки линий равно трем.

Информационный массив  $[x_1, \dots, x_{15}]$ , формируемый данной измерительной сетью, является набором томографических данных, по которым устройство обработки информации информационно-измерительной системы восстанавливает искомое распределение амплитуды поперечных колебаний исследуемой поверхности.

Как можно видеть из рис. 5, число восстанавливаемых значений функции распределения равно  $n \times n$  ( $n$  — размерность сети), в то время как число измерительных линий меньше и равно  $4n - 1$ . Таким образом, применение томографических методов сбора данных о распределении исследуемого физического поля сокращает число информационных каналов и размерность информационных массивов, обрабатываемых информационно-измерительной системой. Например, для случая  $100 \times 100$  объем данных сокращается с 10 000 до 399. Однако подобное сокращение информации делает задачу восстановления функции распределения по томографическим данным некорректной. Это приводит к необходимости применения итерационных алгоритмов восстановления.

На практике увеличение числа чувствительных элементов, установленных на ВОИЛ, или повышение их чувствительности приводит к тому, что и при незначительных внешних воздействиях рабо-

тая точка интерферометра выходит за пределы линейной области. На рис. 6 представлены зависимости амплитуды выходного сигнала ВОИЛ от амплитуд колебаний точек исследуемой поверхности. Рис. 6, *a* соответствует эксперименту, в котором колебания совершил один элемент линии, обладающий высокой чувствительностью. Рис. 6, *b* соответствует эксперименту, в котором колебания совершил элемент с низкой чувствительностью при наличии колебаний на втором элементе. На обоих рисунках можно видеть нелинейность при увеличении интенсивности внешнего воздействия на РВОИЛ. Восстановление физического поля по томографическим данным, поступающим от такой измерительной сети, не может быть корректно осуществлено с использованием итерационных алгоритмов.

Одним из наиболее перспективных путей решения задачи обработки выходных сигналов распределенных измерительных сетей в реальном времени является использование для этих целей нейроноподобных вычислительных систем. Как показано в

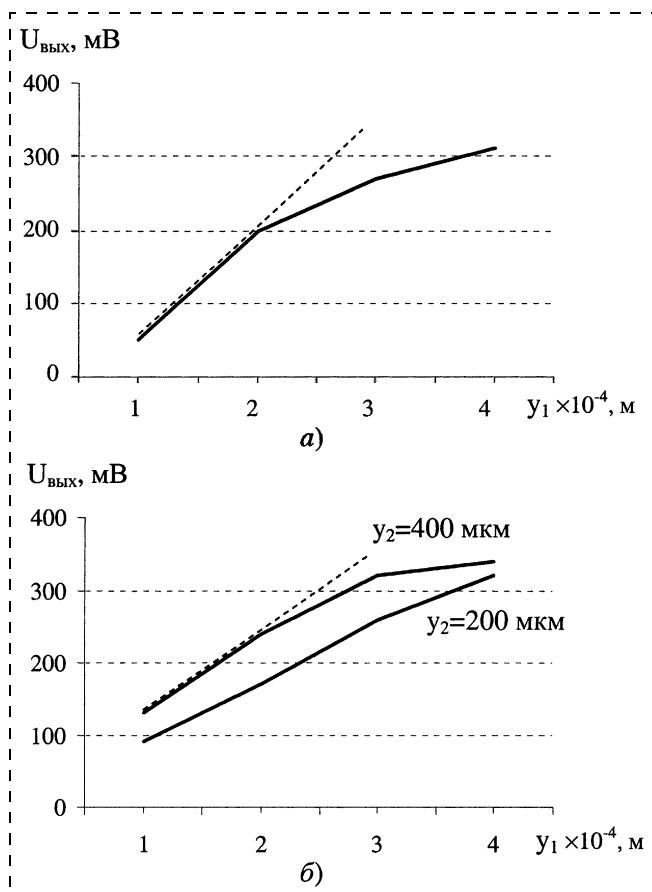
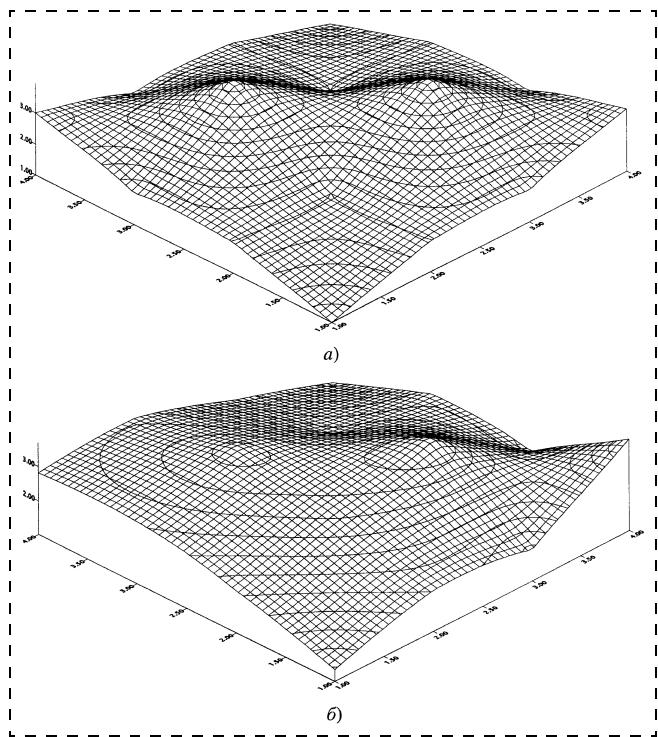


Рис. 6. Зависимость амплитуды выходного сигнала ВОИЛ от амплитуд колебаний точек исследуемой поверхности:

*a* — для одного чувствительного элемента ( $y_0$  — амплитуда колебаний корпуса ЧЭ); *b* — для двух чувствительных элементов ( $y_1$  — амплитуда колебаний первого ЧЭ;  $y_2$  — амплитуда колебаний второго ЧЭ)



**Рис. 7. Распределение амплитуды поперечных колебаний исследуемой поверхности:**

*а* — исходное; *б* — восстановленное

работе [8], решение задачи восстановления физического поля по томографическим данным успешно решается с использованием нейросетевых технологий.

Для обработки томографических данных, поступающих от РВОИС, в настоящей работе предлагается использовать трехслойный персептрон, в котором нейроны внутреннего слоя имеют нелинейную функцию активации. На рис. 7 представлены результаты восстановления распределения амплитуды

поперечных колебаний поверхности, на которой был уложен макет предлагаемой распределенной волоконно-оптической измерительной сети.

### Заключение

В настоящей работе представлены принципы организации и построения распределенной волоконно-оптической измерительной сети для восстановления распределения поля амплитуды поперечных колебаний поверхности. Предложена конструкция комбинированной распределенной волоконно-оптической измерительной линии, которая обеспечивает регистрацию интегрального воздействия поля поперечных деформаций на область укладки. Представлены результаты восстановления поля амплитуды поперечных колебаний исследуемой поверхности с использованием разработанной распределенной волоконно-оптической сети, демонстрирующие хорошее качество восстановления.

### Список литературы

1. Бутусов М. М., Галкин С. Л. и др. Волоконная оптика и приборостроение. Л.: Машиностроение, 1987.
2. Distributed fiber optical sensors and measuring networks // Proc. of SPIE. 2001. V. 4357.
3. Кульчин Ю. Н., Витрик О. Б., Кириченко О. В., Петров Ю. С. Многомерная обработка сигналов с использованием волоконно-оптической измерительной сети // Квантовая электроника. 1993. Т. 20 (5). С. 711—714.
4. Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии. М.: Мир, 1990.
5. Кульчин Ю. Н., Витрик О. Б., Кириченко О. В., Петров Ю. С., Воробьев Ю. Д. Квазираспределенный волоконно-оптический датчик // Измерительная техника. 1994. № 1. С. 16—17.
6. Кульчин Ю. Н., Витрик О. Б., Кириченко О. В., Петров Ю. С. Сейсмоизмерительное устройство // Патент РФ на изобретение № 2066467 по заявке 94005196 от 14.02.94. ВНИИГПЭ.
7. Кульчин Ю. Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. М.: Физматлит, 2001. 272 с.
8. Кибернетика и вуз: Межвуз. научно-технич. сб. Вып. 28. Томск: Изд. ТПУ, 1994.

### Информация

Компания Coventor ([www.coventor.ru](http://www.coventor.ru)) выпустила новую версию своего пакета CoventorWare 2004, предназначенного для проектирования MEMS устройств.

Пакет CoventorWare является первым специализированным программным обеспечением, ориентированным на проектирование и подготовку производства коммерческих микроэлектромеханических устройств и микромашин. Предлагаемый продуктом инструментарий включает функции моделирования MEMS устройств с учетом управляющей электрической схемы, подготовки двухмерных масок для производства, трехмерной модели для упаковки устройств в корпус, а также эмуляции технологических операций.

Пакет CoventorWare включает четыре программных модуля, обеспечивающих полный цикл проектирования MEMS устройств: Architect, Designer, Analyzer и Integrator. В новую версию CoventorWare 2004 включен модуль MEMulator 2004, который раньше представлял собой автономную программу и позволял визуализировать этапы технологического процесса производства интегральных MEMS устройств. В новой версии эта программа позволит строить не идеальную, а реалистичную трехмерную твердотельную модель, FEM анализ которой может быть выполнен с помощью модуля Analyzer, что позволит повысить качество конечных изделий.

**За любой дополнительной информацией просим обращаться  
по адресу [info@eltm.ru](mailto:info@eltm.ru) или по телефону (095) 974-14-80**

# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 53.082.9

**М. Ю. Вагин**, канд. хим. наук,  
**А. А. Калякин**, д-р хим. наук,  
Химический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ ДЛЯ ПРЯМОЙ РЕГИСТРАЦИИ АФФИННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СЛОЕВ МОЛЕКУЛ ПАВ

Показана возможность формирования молекулярного бислоя на твердой подложке посредством самоорганизации молекул неионогенного ПАВ *Brij-52* на поверхности золота. Полученные слои были изучены с помощью электрохимической импедансной спектроскопии. Было показано, что образующиеся структуры являются однородными и содержат минимальное число дефектов. Емкость слоев, рассчитанная из импедансных спектров, была близка к емкости бислойных липидных мембран (БЛМ), разделяющих два водных раствора электролита, что свидетельствовало об образовании бислоя молекул *Brij-52* в результате самоорганизации на твердой поверхности. В отличие от БЛМ, образующиеся структуры обладали высокой стабильностью, что обеспечило возможность их использования в анализе. Были предложены простые методики для создания биосенсоров для прямой регистрации аффинных взаимодействий на основе разработанных бислоев *Brij-52*. Для изготовления ДНК-сенсора было предложено использовать поверхностную иммобилизацию олигонуклеотидов, модифицированных углеводородными остатками, способными самопроизвольно встраиваться в гидрофобную часть бислоя. Для изготовления иммуносенсора было предложено использовать адсорбционную иммобилизацию антител на поверхности бислоя *Brij-52*. Для регистрации отклика также использовали импедансную спектроскопию. Добавление в систему с ДНК-сенсором комплементарного олигонуклеотида вызывало уменьшение реальной части импеданса, тогда как добавление специфического антигена в систему с иммуносенсором вызывало увеличение реальной части. Полученные результаты являются многообещающими в разработке сенсоров для клинической диагностики или для контроля состояния окружающей среды.

### Бислойные мембранны амфильтальных молекул

Ориентированные бислои амфильтальных молекул являются основой клеточных мембран. Бислойные липидные мембранны (БЛМ) разделяют два водных раствора электролита. Структура БЛМ представляет собой два взаимопроникающих слоя упорядоченных молекул (рис. 1), полярные участки (головки) которых направлены к водному окружению, образуя гидрофильные регионы, тогда как неполярные ацильные цепи, направленные

внутрь бислоя, образуют гидрофобную область. Подобные мембранны представляют собой эффективный барьер для ионов [1].

Больше сорока лет назад была показана возможность образования искусственных БЛМ [2]. Плоские БЛМ могут быть образованы в растворе электролита с помощью двух возможных методов: метода "закрашивания" [2] и метода сворачивания монослоя [3]. Метод "закрашивания" включает в себя нанесение небольшого количества раствора липида в неполярном органическом рас-

творителе на небольшое по диаметру круглое отверстие в пластиковой мембране, разделяющей два водных раствора электролита. При этом БЛМ образуются в результате самоорганизации при контакте с водным раствором электролита [2]. Второй метод формирования БЛМ основан на образовании монослоя амфильтальных молекул на границе раздела жидкость/воздух с последующим достраиванием бислоя, разделяющего два водных раствора электролита [3].

Электрохимическая импедансная спектроскопия является мощным инструментом исследования электрических свойств искусственных и природных биологических мембран. К исследуемой системе прикладывается небольшое по амплитуде (обычно меньше 5 мВ) синусоидальное напряжение и измеряется отклик в виде возникающего тока. Независимой переменной является частота переменного напряжения. Использование импедансной спектроскопии при исследовании мембранны позволяет экспериментально измерять такие параметры, как сопротивление мембранны, а также оценивать ее однородность и емкость.

Около двадцати лет назад были получены и исследованы импедансные спектры БЛМ, разделяющих два раствора электроли-

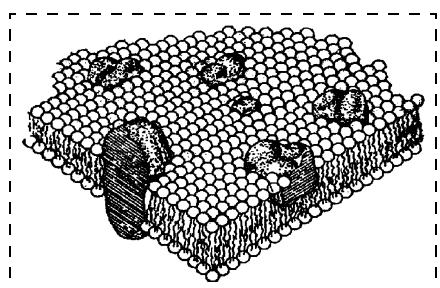


Рис. 1. Схематичное изображение клеточной мембраны

та [4, 5]. В координатах Найквиста ( $Z'$ ,  $Z''$ ) на высоких частотах спектр представляет собой полуциркуль, переходящий в больший радиус на низких частотах (< 100 Гц). Обычно свободные БЛМ обладают очень высоким сопротивлением ( $10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}^{-2}$ ) и емкостью ~0,4–0,6 мкФ · см<sup>-2</sup> [6].

Применение БЛМ в электрохимических сенсорных системах является весьма привлекательным [7], поскольку их свойства существенно зависят от микроокружения. В частности, БЛМ могли быть использованы в качестве трансдьюсеров, т. е. физико-химических преобразователей информации о протекании биохимической реакции, в биосенсорах для прямой регистрации аффинных взаимодействий. Тем не менее, использование свободных БЛМ, т. е. разделяющих два водных раствора электролита, затруднительно. Кроме того, такие мембранные нестабильны: их время жизни не превышает нескольких часов [8]. По этой причине были предприняты попытки формирования БЛМ на твердых поверхностях. Был предложен простой метод формирования фосфолипидных бислоев на твердой поверхности [9], однако однородность мембранных не была доказана. Также была показана возможность самоорганизации тиолов или так называемых тиолипидов на поверхности золота [10]. Однако полученные импедансные спектры существенно отличались по форме от спектров для свободных БЛМ, что свидетельствовало о неоднородности получаемых коллоидных образований.

По всей видимости, БЛМ на твердых проводящих поверхностях нестабильны и не становятся однородными после их внесения в водный раствор электролита. Для стабилизации БЛМ на твердой поверхности было предложено предварительно наносить на подложку слои полимеров [8, 11]. Лишь в этом случае

импедансные спектры для формируемых мембран были схожи со спектрами свободных БЛМ. На высоких частотах спектр представлял собой полуциркуль, переходящий на низких частотах в прямую линию с наклоном, равным наклону спектра чистого электрода.

**Бислои молекул Brij-52 на поверхности золота.** Поскольку коллоидные образования синтетических поверхностно-активных веществ (ПАВ) термодинамически более устойчивы по сравнению с липидными образованиями, было предложено использовать синтетическое неионогенное ПАВ Brij-52 для формирования гомогенных мембранных непосредственно на твердых поверхностях. Слои формировались следующим образом [12]: 5 мкл этанольного раствора Brij-52 наносили на поверхность золотого дискового электрода, после чего каплю раствора высушивали. Далее электрод помещали в водный раствор электролита. Амфи菲尔ная мембрана формировалась в результате самоорганизации либо в течение ночи без приложения потенциала, либо в течение 1–2 ч при приложении 0–0,1 В.

Спектр электрохимического импеданса в координатах Найквиста для чистого золотого электрода в растворе электролита (рис. 2) на высоких частотах стремился к вертикальной линии, тогда как на низких частотах становился заметным отклонение спектра от емкостной вертикальной линии [12]. Для описания полученных экспериментальных данных был проведен анализ наблюдаемого спектра с использованием эквивалентных схем. Было предложено моделировать спектр чистого электрода при потенциале двойного электрического слоя последовательным соединением сопротивления  $R$ , представляющего собой омическое сопротивление раствора, и емкостного элемента, представляющего собой емкость

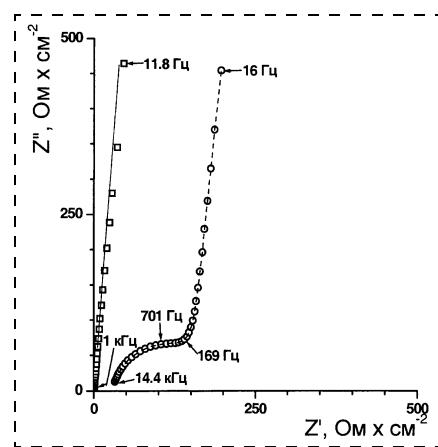


Рис. 2. Импедансные спектры в координатах Найквиста для чистого золотого электрода в растворе фонового электролита (□) и для электрода со слоем Brij-52 (○). Сплошная линия — теоретический спектр импеданса для системы с чистым электродом, рассчитанный с использованием соответствующей эквивалентной схемы (рис. 3, а), штриховая линия — теоретический импедансный спектр для системы со слоем Brij-52 на поверхности электрода, рассчитанный с использованием усложненной эквивалентной схемы (рис. 3, б)

двойного электрического слоя (рис. 3, а) [12]. Однако, принимая во внимание неровность поверхности поликристаллического золота, а также возможность протекания процессов переноса заряда даже в двуслойной области потенциалов, вместо чистой емкости для моделирования был использован элемент постоянной фазы (ЭПФ) с адmittансом (комплексным обратным импедансом), равным  $A(j\omega)^\phi$ , где  $A$  — константа,  $\omega$  — угловая частота,  $j$  — мнимая единица и  $\phi$  — фазовый угол, изменяющийся от 0 до 1. Когда  $\phi$  равен 0, ЭПФ проявляется себя как истинное сопротивление; когда же  $\phi$  равен 1, ЭПФ представляет собой истинную емкость. Обработка спектров в трехмерном пространстве ( $Z'$ ,  $Z''$ ,  $v$ ) в рамках предложенной модели проводилась при использовании метода наименьших квадратов [13].

На рис. 2 видно, что теоретическая кривая (сплошная линия) хорошо описывает экспериментальные данные. Для серии из

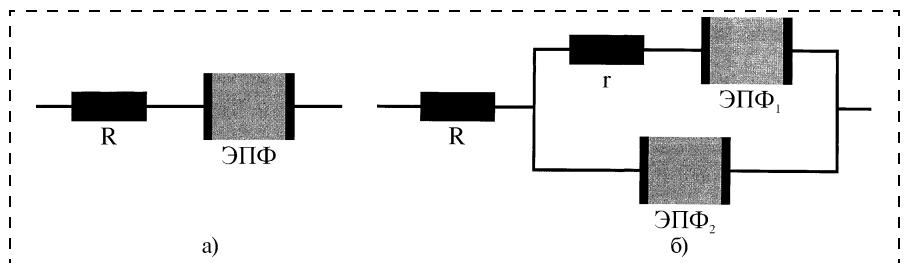


Рис. 3. Эквивалентные схемы для системы с поликристаллическим электродом в растворе фонового электролита (а) и для системы с дополнительной мембраной на поверхности электрода (б)

пяти электродов  $\phi$  составлял  $0,97 \pm 0,4$  [12], что свидетельствовало о том, что ЭПФ представлял собой практически истинную емкость. Рассчитанная емкость двойного электрического слоя составила  $28 \pm 3 \text{ мкФ} \cdot \text{см}^{-2}$  [12], что хорошо согласуется с данными [14].

Для формирования мембранны ПАВ на поверхности золота электрод со слоем ПАВ выдерживали в водном растворе электролита при фиксированном потенциале. В течение 30–40 мин спектр импеданса существенно изменялся, достигая стационарной формы через 1–2 ч. Было показано, что структура мембранны зависит от концентрации наносимого раствора ПАВ. На концентрациях ниже 1 мМ форма спектра не существенно отличалась от спектра для чистого электрода. После высыхания мембрана на поверхности электрода становилась видимой и визуально неоднородной. Спектры импеданса для таких систем существенно отличались от спектров для однородных БЛМ [6].

Спектры импеданса, характерные по форме для БЛМ, наблюдались лишь при использовании растворов ПАВ с концентрацией выше 10 мМ. При увеличении концентрации радиус полукруга на высоких частотах уменьшался, что свидетельствовало об образовании тонких мембранны [8]. Было показано, что оптимальной является концентрация 0,1 М [12]. Мембранны, полученные из концентрированных растворов, после самоорганиза-

ции и высыхания становились невидимыми.

Спектр импеданса для таких мембранны Brij-52 (см. рис. 2) существенно отличается от спектра для чистого золота электрода. На высоких частотах спектр представляет собой полукруг, тогда как на низких частотах стремится к прямой с наклоном для чистого электрода. Такая характерная форма спектра близка к форме спектров для мембранны БЛМ, сформированных на твердых поверхностях с полимерными промежуточными подложками [8]. Таким образом, мембранны, сформированные в результате самоорганизации молекул Brij-52 на поверхности золота, являются однородными, т. е. содержат минимальное число дефектов [12].

Для описания экспериментальных спектров мембранны Brij-52 была предложена усложненная схема: были добавлены сопротивление мембранны  $r$  и ЭПФ<sub>2</sub>, связанный с емкостью мембранны (рис. 3, б). С использованием комплексного нелинейного метода наименьших квадратов [13] была проведена обработка спектров в трехмерном пространстве ( $Z'$ ,  $Z''$ ,  $v$ ) в рамках соответствующей модели. На рис. 2 видно, что теоретическая кривая (штриховая линия) хорошо описывала экспериментальные данные. При этом  $\phi$  для ЭПФ<sub>2</sub> составлял  $0,9 \pm 0,03$  [12], что свидетельствовало как о том, что данный элемент представляет собой емкость, так и об однородности оптимизированных мембранны Brij-52.

Рассчитанная из спектра емкость мембранны составила  $1,0 \pm 0,4 \text{ мкФ} \cdot \text{см}^{-2}$  [12], что свидетельствовало об образовании бислоя молекул синтетического ПАВ, поскольку емкость свободных БЛМ составляет  $0,4\text{--}0,6 \text{ мкФ} \cdot \text{см}^{-2}$  [6].

Стабильность БЛМ, сформированных на различных поверхностях, является критическим фактором, ограничивающим их широкое использование. Время жизни наиболее стабильных БЛМ составляет 24–36 ч [7], тогда как однородные БЛМ на поверхности полиэлектролитов еще менее стабильны [8]: за 90 мин импедансный спектр существенно меняется, теряя при этом форму, характерную для свободных БЛМ.

В отличие от липидных систем, бислои Brij-52 на поверхности золота были более стабильны. После самоорганизации в течение 3–4 ч изменений в спектре импеданса не наблюдалось. При выдерживании электрода с бислоем на поверхности в растворе фонового электролита в течение трех дней спектр менялся незначительно. При этом изменения реальной и мнимой частей составили менее 15 %. Даже через неделю импедансный спектр для электрода с мембранны обладал формой, характерной для однородных БЛМ [12]. Таким образом, в результате самоорганизации на поверхности золота удалось получить обладающий достаточной стабильностью однородный бислои молекул синтетического ПАВ, что позволило перейти к его использованию в разработке сенсорных систем для прямой электрохимической регистрации аффинных взаимодействий.

#### Бислои Brij-52 в качестве трансдьюсеров для прямой регистрации аффинных взаимодействий

Определение различных биоактивных компонентов играет существенную роль в современной клинической диагностике. Боль-

шое число биочувствительных материалов основано на реакциях специфических аффинных взаимодействий, среди которых можно выделить гибридизацию комплементарных последовательностей ДНК и взаимодействия антитела — антиген.

На сегодняшний день разработан ряд подходов для определения различных биоактивных компонентов. Разработаны системы, комбинирующие классический ELISA (Enzyme-Linked Immuno-sorbent Assay, иммуноферментный анализ) и различные методы регистрации метки [15]. Также предложены электрохимические сенсоры аффинных взаимодействий [16, 17] и системы на основе пьезоэлектрических преобразователей отклика распознавания [18]. Разработанные сенсоры для определения ДНК включают электрохимические [19—26], оптические [19, 27, 28] и пьезоэлектрические системы [19, 29] регистрации отклика. Тем не менее, по-прежнему существует проблема неоднозначности преобразования сигнала специфического биораспознавания.

Прямая безреагентная электрохимическая детекция является весьма многообещающим подходом для регистрации аффинных взаимодействий. Акт связывания может быть зарегистрирован посредством мониторинга изменений электрических и поверхностных свойств датчика. Таким образом, прямая детекция существенно упрощает протокол анализа, поскольку в данном случае отсутствует необходимость в стадии добавления/связывания/определения индикатора.

Для разработки сенсоров прямой регистрации могут быть использованы различные преобразователи отклика связывания (трансдьюсеры). Являясь основой клеточных мембран, БЛМ представляют собой эффективные ионные барьеры, свойства которых

существенно зависят от микрокружения, поэтому их использование в сенсорах прямой детекции является перспективным [7, 30]. Было предложено использовать бислои молекул Brij-52 в качестве трансдьюсеров для прямой регистрации аффинных взаимодействий [31].

**ДНК-сенсор.** Для изготовления ДНК-зонда было предложено провести на поверхности бислоя Brij-52 иммобилизацию коротких последовательностей ДНК (олигонуклеотидов), модифицированных углеводородными остатками, способными самопротивольно встраиваться в гидрофобный регион бислоя [31]. Для этого после самоорганизации золотой электрод с мембраной помещали в буферный раствор олигонуклеотида, модифицированного гидрофобной цепью, и выдерживали в течение ночи для проведения иммобилизации. Предполагалось, что гибридизация комплементарных олигонуклеотидов должна вызывать изменение поверхностных свойств мембранны.

Импедансные спектры, записанные до и после добавления

комплементарного олигонуклеотида, представлены на рис. 4 [31]. Видно, что добавление комплемента вызвало изменение формы спектра. В частности, на высоких частотах уменьшилась действительная часть. Анализ с помощью эквивалентных схем показал, что гибридизация олигонуклеотидов на поверхности приводила к уменьшению сопротивления мембранны и двукратному увеличению емкости мембранны, что, возможно, было вызвано появлением локальных нарушений структуры бислоя.

Добавление в систему раствора некомплементарного олигонуклеотида не вызывало изменений в спектре. Таким образом, генерация отклика была обусловлена исключительно комплементарной гибридизацией олигонуклеотидов [31].

Для разработки биосенсора аффинных взаимодействий не обязательно проводить регистрацию спектра в широком диапазоне частот. Наиболее существенные изменения спектра были получены при частотах в интервале 1—10 кГц (рис. 5). Наибольший отклик был зарегистрирован на частоте 2 кГц,

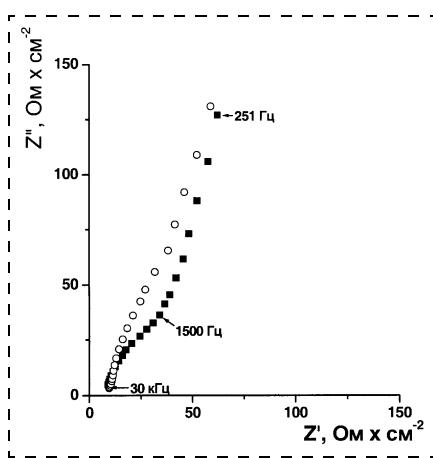


Рис. 4. Спектр импеданса для системы с электродом с иммобилизованными олигонуклеотидами на поверхности бислоя Brij-52, модифицированной гидрофобной цепью  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)^{15} - dT_{15}$  (■), и спектр, записанный после добавления комплементарного олигонуклеотида  $dA_{15}(10^{-8} \text{ M}, ○)$

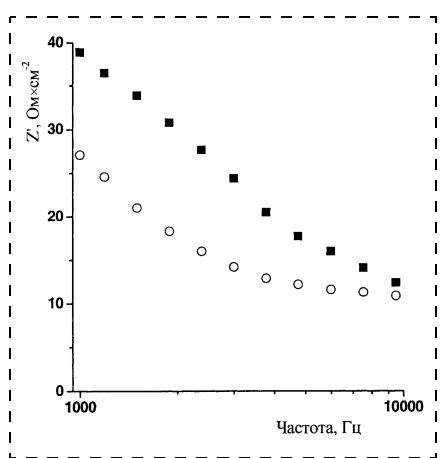


Рис. 5. Спектр реальной части импеданса для системы с иммобилизованными олигонуклеотидами на поверхности электрода (■) и спектр, записанный после добавления комплементарного олигонуклеотида ( $10^{-8} \text{ M}$ , ○)

где изменение сигнала составило 40 % от фона [31], что в 2 раза превышает отклик аналогичной системы, полученной с помощью фотолитографии с использованием редокс-активного индикатора гибридизации [21].

**Иммуносенсор.** Для изготовления иммуносенсора на основе прямой регистрации аффинного связывания было предложено провести на поверхности бислоя Br<sup>ij</sup>-52 иммобилизацию антител посредством адсорбции за счет внедрения гидрофобных частей антител в гидрофобную область бислоя [31]. Для этого электроды после самоорганизации мембранны Br<sup>ij</sup>-52 оставляли на ночь в буферном растворе поликлональных антител. Импедансные спектры, зарегистрированные до и после добавления антигена (пероксидазы из корней хрена), представлены на рис. 6. Видно, что добавление антигена вызывало изменение формы спектра. Анализ с помощью эквивалентных схем показал, что связывание белка на поверхности приводило к двукратному уменьшению емкости мембранны, что, возможно, было

вызвано увеличением эффективной толщины мембранны в результате связывания крупных молекул антигена ( $M_{\text{пероксидазы}} = 40\,000$ ) [31]. Аналогичные изменения сигнала наблюдались при связывании крупных молекул [29, 32–35]. Следует отметить, что связывание антигена приводило к увеличению реальной части импеданса, что, по всей видимости, было обусловлено уменьшением ионной проницаемости мембранны, тогда как гибридизация олигонуклеотидов на поверхности ДНК-сенсора приводила к падению активного сопротивления.

Добавление антигена в систему с чистым слоем Br<sup>ij</sup>-52 не вызывало появления изменений спектра. Кроме того, откликов в системе не наблюдалось при добавлении неспецифического антигена. Появление изменений спектра импеданса при добавлении специфического антигена происходило в течение короткого интервала времени. Обычно полное развитие сигнала достигалось за 20 мин. Таким образом, возникновение отклика было обусловлено исключи-

тельно специфическим связыванием антигена [31].

Для разработки биосенсора на основе регистрации спектра импеданса достаточно измерять комплексное сопротивление на частотах, соответствующих наиболее существенным изменениям. Последние были получены на частотах ~1–10 кГц (рис. 7). Наибольший отклик был получен на частоте 3 кГц, где изменение сигнала составило 50 % от фона [31], что в 5 раз превышает отклик для аналогичной системы, основанной на регистрации изменения механических свойств трансдьюсера на основе БЛМ на твердой поверхности [36].

## Выводы

В результате простой оптимизированной методики на поверхности золота в результате самоорганизации молекул незаряженного ПАВ Br<sup>ij</sup>-52 формировались воспроизводимые по свойствам однородные бислои амфильтальных молекул, отличающиеся повышенной стабильностью.

Было предложено использовать получаемые слои в качестве трансдьюсеров для прямой регистрации аффинных взаимодействий посредством электрохимической импедансной спектроскопии. За счет использования олигонуклеотидов или антител, иммобилизованных на поверхности мембранны, была проведена прямая электрохимическая регистрация гибридизации комплементарных олигонуклеотидов и взаимодействия антитело – антиген соответственно. Отклики для обеих методик превышали отклики для систем, известных из публикаций. Новые сенсорные системы обладали существенной стабильностью при хранении, ограниченной лишь стабильностью биологических элементов распознавания.

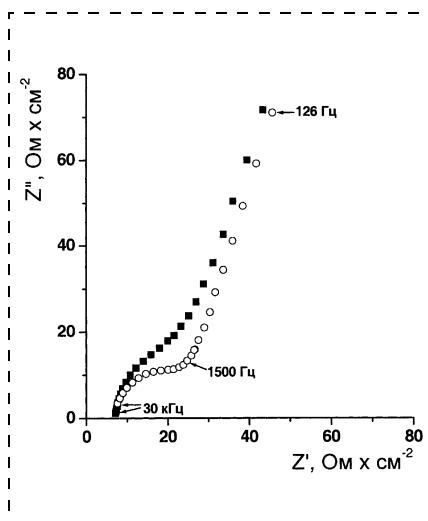


Рис. 6. Спектр импеданса для системы с электродом с иммобилизованными антителами против пероксидазы из корней хрена на поверхности бислоя Br<sup>ij</sup>-52 (■) и спектр, записанный после добавления пероксидазы ( $3 \cdot 10^{-5}$  M, ○)

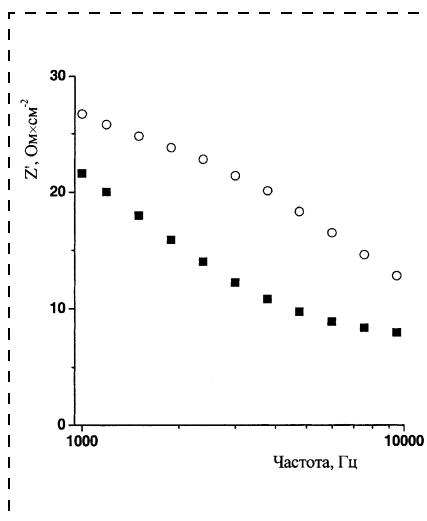


Рис. 7. Спектр реальной части импеданса для системы с иммобилизованными антителами на поверхности электрода (■) и спектр, снятый после добавления антигена ( $3 \cdot 10^{-5}$  M, ○)

Предложенные подходы на основе бислойных трансдьюсеров могут быть использованы в дальнейшем в клинической диагностике, ДНК-скрининге и быстрым определении различных загрязнителей окружающей среды.

### Список литературы

1. Mitchel P. Chemoosmotic coupling in oxidative and photosynthetic phosphorylation // Biological Rev. 1966. V. 41. P. 445–502.
2. Mueller P., Rudin D. O., Tien H. T., Wescott W. C. Reconstruction of cell membrane structure in vitro and its transformation into an excitable system // Nature. 1962. V. 194. P. 979–980.
3. Montal M. Methods in Enzymology. V. 32. / Eds: S. P. Colowick, N. O. Kaplan. New York. Academic Press, 1974. P. 545.
4. De Leve R., Seidah N. G., Larkin D. Tetraphenylborate adsorption onto an artificial ultrathin membrane // J. Electroanal. Chem., 1974. V. 49. P. 153–159.
5. De Leve R., Vukadin D. Dipicrylamine transport across an ultrathin phosphatidylethanolamine membrane // J. Electroanal. Chem., 1975. V. 62. P. 95–109.
6. Hanai T., Haydon D. A., Taylor J. The influence of lipid composition and of some adsorbed proteins on the capacitance of black hydrocarbon membranes // J. Theor. Biol., 1965. V. 9. P. 422.
7. Nikolelis D. P., Krull U. J. Bilayer lipid membranes for electrochemical sensing // Electroanalysis. 1993. V. 5. P. 539–545.
8. Lindholm-Sethson B. Electrochemistry at ultrathin organic films at planar gold electrodes // Langmuir. 1996. V. 12. P. 3305–3314.
9. Tien H. T., Salamon Z. Formation of self-assembled lipid bilayers on solid substrates // Bioelectrochem. Bioenerg. 1989. V. 22. P. 211–218.
10. Terrettaz S., Stora T., Duschl C., Vogel H. Protein binding to supported lipid membranes, investigation of the cholera toxin-ganglioside interaction by simultaneous impedance spectroscopy and surface plasmon resonance // Langmuir. 1993. V. 9. P. 1361–1369.
11. Nakashima N., Yamaguchi Y. A Lipid bilayer electrical device. Dramatic decrease in impedance of a electrode device coated with electrolyte-doped lipid films in air / J. Electroanal. Chem. 1995. V. 384. P. 187–189.
12. Karyakin A. A., Vagin M. Y., Choba M. A., Klyachko N. L. Self-Assembled Amphiphilic Bilayers of Surfactant Brij-52 on Gold Electrodes // Electroanalysis. 1999. V. 15. P. 1094–1096.
13. Macdonald J. R. Impedance spectroscopy. New York: Wiley, 1987. P. 321.
14. Hamelin A. Modern Aspects of Electrochemistry. V. 16 / Eds: B. E. Conway, R. E. White, J. O'M. Bokris. New York, Plenum Press. 1985. P. 1.
15. Invitsky D. M., Sitzkov R. A., Kurochkin V. E. Flow-injection amperometric system for enzyme immunoassay // Anal. Chim. Acta. 1995. V. 261. P. 45–52.
16. Setford S. J., Van Es R. M., Blankwate Y. J., Kroger S. Receptor binding protein amperometric affinity sensor for rapid  $\beta$ -lactam quantification in milk // Anal. Chim. Acta. 1999. V. 398. P. 13–22.
17. Corbisier P., Van Der Lelie D., Borremans B., Provoost A., De Lorenzo V., Brown N. L., Lloyd J. R., Hobman J. L., Csoregi E., Johansson G., Mattiasson B. Whole cell- and protein-based biosensors for the detection of bioavailable heavy metal in environmental samples // Anal. Chim. Acta. 1999. V. 387. P. 235–244.
18. Tessier L., Schmitt N., Watier H., Brumas V., Patat F. Potential of the thickness shear mode acoustic immunosensors for biological analysis // Anal. Chim. Acta. 1997. V. 347. P. 207–217.
19. Christopoulos T. K. Nucleic acid analysis // Anal. Chim. 1999. V. 71. P. 425R–438R.
20. Wang J., Jiang M., Mukherjee B. Flow detection of nucleic acids at a conducting polymer-modified electrode // Anal. Chim. 1999. V. 71. P. 4095–4099.
21. Hashimoto K., Ito K., Ishimori Y. Microfabricated disposable DNA sensor for detection of hepatitis B virus DNA // Sens. Actuators B. 1998. V. 46. P. 220–225.
22. Garnier F., Korri-Youssoufi H., Srivastava P., Mandrand B., Delair T. Toward intelligent polymers: DNA sensors based on oligonucleotide-functionalized polypyrroles // Synth. Metals. 1999. V. 100. P. 89–94.
23. Brett C. M. A., Brett A. M. O., Serano S. H. P. An EIS study of DNA-modified electrodes // Electrochim. Acta. 1999. V. 44. P. 4233–4239.
24. Berggren C., Sthandske P., Brundell J., Johansson G. A feasibility study of a capacitive biosensor for direct detection of DNA hybridization // Electroanalysis. 1999. V. 11. P. 156–160.
25. Bardea A., Patolsky F., Dagan A., Willner I. Sensing and amplification of oligonucleotide-DNA interactions by means of impedance spectroscopy: a route to a Tay-Sachs sensor // Chem. Commun. 1999. V. 1. P. 21–22.
26. Maruyama K., Motonaka J., Mishima Y., Matsuzaki Y., Nakabayashi I., Nakabayashi Y. Detection of target DNA by electrochemical method // Sens. Actuators B. 2001. V. 3756. P. 1–5.
27. Piunno P. A. E., Krull U. J., Hudson R. H. E., Damha M. J., Cohen H. Considerations for the quantitative transduction of hybridization of immobilized DNA // Anal. Chim. Acta. 1994. V. 288. P. 205–214.
28. Hanafi-Bagby D., Piunno P. A. E., Wust C. C., Krull U. J. Concentrations dependence of a thiazole orange derivative that is used to determine nucleic acid hybridization by an optical biosensor // Anal. Chim. Acta. 2000. V. 411. P. 19–30.
29. Rickert J., Gopel W., Beck W., Jung G., Heiduschka P. A "mixed" self-assembled monolayer for an impedance immunosensor // Biosens. Bioelectron. 1996. V. 11. P. 757–768.
30. Chiang K. L., Krull U. J., Nikolelis D. P. Ellipsometric determination of the structure of surface-stabilized bilayer lipid membranes on silver metal // Anal. Chim. Acta. 1997. V. 357. P. 73–77.
31. Vagin M. Y., Karyakina E. E., Hianik T., Karyakin A. A. Electrochemical transducers based on surfactant bilayers for the direct detection of affinity interactions // Biosens. Bioelectron. 2003. V. 18. P. 1031–1037.
32. Hianik T., Snejdarkova M., Sokolikova L., Meszar E., Krivanek R., Tvarozek V., Novotny I., Wang J. Immunosensors based on supported lipid membranes, protein films and liposomes modified by antibodies // Sens. Actuators B. 1999. V. 57. P. 201–212.
33. Mirsky V. M., Riepl M., Wolfbeis O. S. Capacitive monitoring of protein immobilization and antigen-antibody reactions on monomolecular alkylthiol films on gold electrodes // Biosens. Bioelectron. 1997. V. 12. P. 977–989.
34. Mirsky V. M., Mass M., Krause C., Wolfbeis O. S. Capacitive approach to determine phospholipase A(2) activity toward artificial and natural substrates // Anal. Chim. 1998. V. 70. P. 3674–3678.
35. Saum A. G. E., Cumming R. H., Rowell F. J. Use of substrate coated electrodes and AC Impedance spectroscopy for the detection of enzyme activity // Biosens. Bioelectron. 1998. V. 13. P. 511–518.
36. Hianik T., Passeechnik V. I., Sokolikova L., Snejdarkova M., Sivak B., Fajkus M., Ivanov S. A., Franek M. Affinity biosensors based on solid supported lipid membranes. Their structure, physical properties and dynamics // Bioelectrochem. Bioenerg., 1998. V. 47. P. 47–55.

УДК 541.13

**В. А. Козлов**, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
**Д. А. Терентьев**,  
Центр Молекулярной Электроники  
Московского физико-технического института  
(государственного университета)

## КОРРЕКЦИЯ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЛЕКУЛЯРНО-ЭЛЕКТРОННОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ВРАЩАТЕЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ ИНФРАНIZKИХ ЧАСТОТ

*Путем незначительного изменения геометрических параметров электродной системы решена практическая задача получения плоской частотной характеристики молекулярно-электронного углового акселерометра в широком диапазоне частот и с наперед заданной точностью.*

К настоящему времени созданы и нашли свою область применения миниатюрные (до 9 мм в диаметре) акселерометры вращательных движений на базе молекулярно-электронных преобразователей (МЭП) [1–3]. Принципиальной особенностью их конструкции является отсутствие колебательной механической системы. Вследствие этого передаточная функция таких преобразователей целиком определяется молекулярно-электронной системой, в основу физического принципа работы которой положено явление конвективной диффузии в растворах электролитов. Поэтому молекулярно-электронные преобразователи не имеют зоны нечувствительности, обычной для механических систем, которая связана с наличием сухого трения, а рабочая полоса частот таких преобразователей простирается от 0 Гц до 4 кГц.

Для использования МЭП в качестве чувствительных элементов акселерометров вращательных движений, обладающих необходимыми метрологическими характеристиками, в частности, необходимо, чтобы в широком диапазоне частот (от 0,01 до 50 Гц) выходной сигнал преобразователя после коррекции электроникой был с достаточно высокой точностью ( $\leq 2\%$ ) пропорционален при-

ложенному угловому ускорению. Однако экспериментальные исследования обнаружили, что в области частот от 0,05 до 1 Гц наблюдается частотная зависимость передаточной функции МЭП (равной отношению выходного тока к амплитуде приложенного углового ускорения) вида  $1/\sqrt{\omega}$ , что крайне затрудняет разработку корректирующей электроники во всей рабочей полосе частот.

Попытки теоретического исследования амплитудно-частотной характеристики передаточной функции МЭП были предприняты в ряде работ [4–6]. В [6] было получено в квадратурах выражение для передаточной функции МЭП с четырьмя электродами, полностью согласующееся с экспериментальными данными в области частот от 0,01 до 50 Гц. Также было выявлено, что частотная характеристика МЭП самым существенным образом зависит от конфигурации его электродной системы, в частности, от радиуса кольцевого канала  $a$ , толщины электродов  $h$  и расстояния между ними  $d$ .

Полученные в работе [6] результаты позволяют сделать вывод о возможности нахождения такой конфигурации электродной системы МЭП, при которой его частотная характеристика после коррекции электроникой будет с необходимой точностью плоской. Кроме того, полученные результаты оправдывают использование разработанной в [6] теоретической модели для решения данной задачи оптимизации амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) молекулярно-электронного углового акселерометра, чему и посвящена настоящая статья.

Согласно определению, передаточная функция молекулярно-электронного акселерометра вращательных движений определяется выражением

$$W = \frac{J_{2A}}{\varepsilon} = \frac{J_{2A}}{Q} \frac{Q}{\varepsilon}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — внешнее угловое ускорение;  $J_{2A}$  — переменная составляющая выходного тока МЭП;  $Q$  — объемная скорость течения жидкости в канале.

Для рассматриваемого акселерометра в области частот ниже 50 Гц отношение  $Q/\varepsilon$  слабо зависит от  $\omega$ , и его можно считать равным константе.

Для вычисления значения выражения  $J_{2A}/Q$  используем полученные в работе [6] результаты, согласно которым

$$\frac{J_{2A}}{Q} = \frac{\int_S S_{JQ}(a, z) dS_K \int_S S_{J2K}(a, z) dS_A - \int_S S_{JQ}(a, z) dS_A \int_S S_{J2K}(a, z) dS_K}{\int_S S_{J2A}(a, z) dS_A \int_S S_{J2K}(a, z) dS_K - \int_S S_{J2A}(a, z) dS_K \int_S S_{J2K}(a, z) dS_A}, \quad (2)$$

где

$$S_{J2A}(r, z) = \frac{\frac{1}{eD} \sum_{k=1}^{\infty} j_{2Ask} p_{\lambda_k}(r) \sin q_k z}{\int_S_A dz' \sum_{k=1}^{\infty} j_{2Ask} \cos q_k z'};$$

$$S_{J2K}(r, z) = \frac{\frac{1}{eD} \sum_{k=1}^{\infty} j_{2Ksk} p_{\lambda_k}(r) \sin q_k z}{\int_S_K dz' \sum_{k=1}^{\infty} j_{2Ksk} \cos q_k z'};$$

$$S_{JQ}(r, z) = \sum_{k=1}^{\infty} g_k(r) \times \\ \times \frac{-2J_1 j_{1ck}}{\pi a^2 e D \int_S_A dz' \sum_{k=1}^{\infty} j_{1ck} \cos q_k z'} \sin q_k z;$$

$$p_{q_k}(r) = \frac{I_0(q_k r)}{q_k I_1(q_k a)};$$

$$\lambda_k^2 = q_k^2 + i\omega/D;$$

$$q_k = k\pi/H;$$

$g_k(r)$  — решение системы

$$\begin{cases} g_k''(r) + g_k'(r)/r - \lambda_k^2 g_k(r) = \\ = -(1 - r^2/a^2) p_{q_k}(r); \\ g_k'(r)|_{r=0} = g_k'(r)|_{r=a} = 0, \end{cases}$$

которое легко можно найти в виде ряда либо в квадратурах;

$$j_{1ck} = \frac{2(\sin q_k z_{KR} - \sin q_k z_{KL} + \sin q_k z_{AR} - \sin q_k z_{AL})}{q_k H},$$

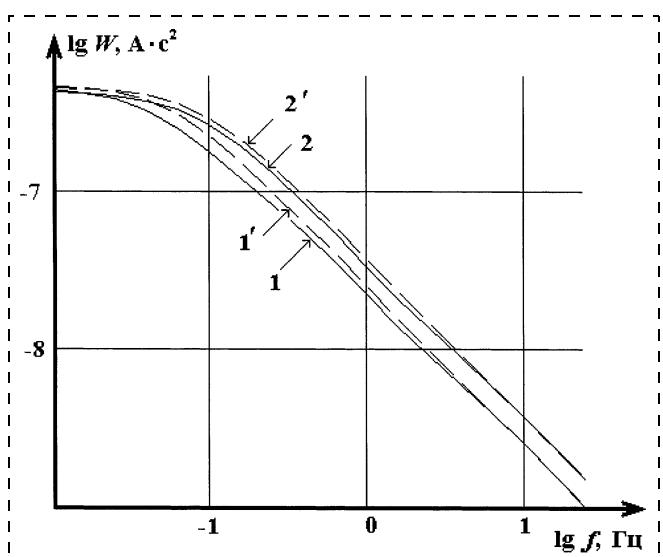
$$j_{2Ask} = \frac{-2(\cos q_k z_{AR} - \cos q_k z_{AL})}{q_k H};$$

$$j_{2Ksk} = \frac{-2(\cos q_k z_{KR} - \cos q_k z_{KL})}{q_k H};$$

$J_1$  — полный постоянный ток через анод;  $D$  — коэффициент диффузии;  $S_A$  и  $S_K$  — поверхности анода и катода соответственно;  $z$  — координата вдоль оси канала;  $z_{AR}$  и  $z_{AL}$  — правая и левая  $z$ -координаты правого анода;  $z_{KR}$  и  $z_{KL}$  — правая и левая  $z$ -координаты правого катода;  $e$  — заряд электрона;  $I_0(x)$  и  $I_1(x)$  — модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядка;  $2H$  — периметр канала.

Полученные выражения имеют довольно сложный вид, однако в ситуации, когда размеры электродного узла  $a, h, d$  много меньше периметра канала  $2H$ , а также являются величинами одного порядка, что выполняется в реальных акселерометрах, возможно получение асимптотических оценок значения передаточной функции молекулярно-электронного углового акселерометра. Анализ асимптотики частотной характеристики в этом случае показывает, что при частотах много ниже диффузионной  $\omega_D = D/l^2$  (здесь  $l$  — характерный размер электродного узла), которая при стандартных для акселерометров параметрах ( $D = 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $2H = 10 \text{ см}$ ,  $a = 50 \text{ мкм}$ ,  $h = 120 \text{ мкм}$ ,  $d = 50 \text{ мкм}$ ) примерно равна  $0,1 \text{ Гц}$ , значение передаточной функции слабо зависит от  $\omega$ , а при частотах много выше нее снижается как  $1/\omega$ . В переходной области — при  $\omega$  порядка  $\omega_D$  — частотная зависимость более сложная, и для нахождения значений передаточной функции необходимо применение численных методов.

Задача выравнивания частотной характеристики подобного вида, как правило, решается с помощью обычной интегрирующей  $RC$ -цепочки. Однако попытки применения такой методики коррекции к угловому акселерометру с указанными стандартными параметрами электродного узла показали, что его частотная характеристика в переходной области ведет себя таким образом, что достичь неравномерности АЧХ меньшей, чем  $10 \%$ , с помощью описанной схемы не удается.



Частотные характеристики акселерометра до коррекции электроникой (1, 2) и их аппроксимации функциями вида  $1/\sqrt{1 + \omega^2/\omega_0^2}$  (1', 2') при следующих параметрах:

1 и 1' —  $a = 50 \text{ мкм}$ ,  $h = 120 \text{ мкм}$ ,  $d = 50 \text{ мкм}$  (стандартные размеры); 2 и 2' —  $a = 50 \text{ мкм}$ ,  $h = 50 \text{ мкм}$ ,  $d = 50 \text{ мкм}$

Сразу отметим, что попытки изменить  $\omega_D$  так, чтобы первоначальная область перестала входить в рабочий частотный диапазон, либо неизбежно приводят к снижению коэффициента преобразования (в случае понижения  $\omega_D$ ), что крайне нежелательно, либо невозможны из-за существующих технологических ограничений — расстояние между электродами не должно быть меньше 10 мкм (в случае повышения  $\omega_D$ ).

На наш взгляд, одним из наиболее перспективных способов решения поставленной задачи является подбор такой конфигурации электродной системы, при которой передаточная функция молекулярно-электронного акселерометра вращательных движений максимально близка к функции вида  $1/\sqrt{1 + \omega^2/\omega_0^2}$ , полностью корректируемой RC-цепочкой. Для этого, используя формулы (1)–(2), мы рассчитали частотные характеристики передаточной функции  $W$  при различных соотношениях между  $a$ ,  $h$  и  $d$ .

Как показал анализ полученных теоретических частотных характеристик, изменение расстояния между электродами  $h$  до 30–60 мкм при сохранении остальных параметров неизменными позволяет после коррекции электроникой достичь не превышающей 5 % неравномерности АЧХ выходного сигнала акселерометра, причем коэффициент преобразования МЭП в этом случае во всей рабочей полосе частот практически не изменяется (см. рисунок).

На основании полученных результатов были спроектированы и изготовлены экспериментальные образцы с уменьшенным до 50 мкм расстоянием между электродами  $h$ . Сравнение эксперимен-

тальной и теоретической частотных характеристик акселерометров вращательных движений показало, что результаты настоящей работы полностью согласуются с опытом, что позволяет сделать вывод о правильности выбранной модели и соответствии численных расчетов на ее базе с экспериментальными данными.

Таким образом, показано, что путь незначительного изменения геометрических параметров электродной системы позволяет решить практическую задачу получения плоской частотной характеристики молекулярно-электронного углового акселерометра в широком диапазоне частот и с на-перед заданной точностью.

#### Список литературы

1. Боровков В. С., Графов Б. М., Новиков А. А. и др. Электрохимические преобразователи первичной информации. М.: Машиностроение, 1969.
2. Физические основы жидкостных и твердотельных измерительных систем и устройств обработки информации // Под ред. Т. Ф. Сударкина. М.: МФТИ, 1994.
3. Введение в молекулярную электронику / Под ред. Н. С. Лидоренко. М.: Энергоатомиздат, 1984, 320 с.
4. Бабанин А. В., Козлов В. А., Петъкин Н. В. Нестационарная диффузия в электрохимической ячейке с периодической структурой электродов // Электрохимия. 1990. Т. 26. Вып. 5. С. 601–606.
5. Larcam C. W. Theoretical analysis of the solution solid polarised cathode acoustic linear transducer // The Journal of the Acoustic Society of America. 1965. V. 37. N 4. P. 664–678.
6. Козлов В. А., Терентьев Д. А. Исследование частотных характеристик пространственно ограниченной электрохимической ячейки в условиях конвективной диффузии // Электрохимия. 2002. Т. 38. Вып. 9. С. 1104–1112.

## РФФИ СТРАНИЧКА РФФИ

*В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1998 г. Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 6 за 1998 г. <http://intra.rfbr.ru>*

## АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

### Молекулярная структура и механизмы регуляции плотных контактов

Номер проекта: 98-04-48750  
Год представления отчета: 2000

С использованием разработанных в течение 1998 г. экспериментальных клеточных моделей проведены исследования межклеточной передачи липидных зондов различной молекулярной геометрии через плотные контакты в монослое клеток сублиний MDCK-N. Был применен разработанный нами метод

локального окрашивания мембранны одиночной клетки. Использовались флуоресцентные липидные зонды с различной молекулярной геометрией: меченный периленоилом фосфатидилхолин, а также зонды на основе диолеофосфатидилэтаноламина (ФЭА), одна из жирных кислот которого замещалась на флуорофор N-4-нитробензо-2-окса-1,3-дизол (НБД), прикрепленный к голове (глицеролу) ФЭА через жирнокислотный спейсер длиной в 6 (С6) или 12 С углеродных звеньев (С6-НБД-ФЭА или С12-НБД-ФЭА соответственно).

Проведенные эксперименты показали, что эффективность окрашивания одиночной клетки, а также межклеточная пере-

дача липидных зондов различна и, по-видимому, зависит от молекулярной геометрии зонда. Зонд с молекулярной формой, близкой к конусу (C6-НБД-ФЭА), более эффективно встраивался в мембрану одиночной клетки, но не переходил с окрашенной клетки на соседние в плотном монослое клеток MDCK-N. Зонды, имеющие близкую к цилиндрической молекулярную форму (C12-НБД-ФЭА или периленоилфосфатидилхолин), встраивались в мембрану очень медленно, но перераспределялись из меченой клетки в соседние.

Проведен предварительный анализ кинетики перераспределения зонда через межклеточную границу в приближении свободной диффузии.

Разработаны экспериментальные клеточные модели для оценки состояния плотных контактов (ПК) у клеток в монослойной культуре.

Исследована эффективность межклеточной передачи липидных зондов в монослойной культуре клеток MDCK (сублиний MDCK-1, MDCK-2, MDCK-N) при разных способах загрузки зонда. Использованы флуоресцентные зонды C6-NBD, R18, PKH-26 и периленоилфосфатидилхолин (ПФХ).

Оценены следующие способы загрузки: (1) посев суспензии клеток, содержащей известное количество клеток (1–10 %), меченных зондом; (2) посев меченых клеток на монослой немеченых; (3) локальное окрашивание одиночных клеток в монослое из пэтч-пипетки в конфигурации cell-attached; (4) окрашивание монослоя и последующее фотообесцвечивание (photo-bleaching).

При локальной загрузке ПФХ (метод 3) в монослое клеток MDCK-N обнаружена межклеточная передача липидного зонда. Освоена методика измерения трансэпителиального сопротивления (ТЭС) в монослое клеток, культивируемых на коллагеновых мембранных в специально сконструированной ячейке. Проведены оценки ТЭС у клеток MDCK-N в контрольных условиях, а также при действии некоторых известных модуляторов плотных контактов (среда без кальция, температура). Полученные данные соответствуют предсказаниям липидной модели плотного контакта.

## **Энергозависимые контрактильные и сенсорные системы как регуляторы транспорта воды в растении**

Номер проекта: 98-04-48822

Год представления отчета: 2001

Задача, на решение которой был направлен проект, выполнена. Опыты проводились с двумя модельными системами, разработанными в лаборатории руководителя проекта, — "воздушными" корнями и "рукавичками". "Воздушными" условно называны отделенные корни подсолнечника, обсущенные с поверхности и помещенные в замкнутые пустые сосуды; они вообще не поглощают воду извне, но, тем не менее, интенсивно выделяют экссудат благодаря секреторной деятельности паренхимных клеток.

Использование этой модели впервые позволило разграничить поглощающую и нагнетающую деятельность корня и изучать последнюю "в чистом виде". "Рукавички" — отделенные корни кукурузы, лишенные центрального цилиндра, а, стало быть, и ксилемного сока, который, согласно осмотической концепции, насасывает воду; несмотря на это, экссудация "рукавичек" вдвое интенсивнее, чем обычных корней, имеющих центральный цилиндр. "Воздушные" корни постоянно, а "рукавички" на начальном этапе не могут функционировать подобно осмометру — в этом заключается главное преимущество этих моделей. Их экссудация осуществляется исключительно (у "воздушных" корней) или в основном (у "рукавичек") за счет метаболической составляющей корневого давления; поэтому она оказалась значительно более чувствительной как к ингибиторам контрактильных белков, так и к нейромедиаторам и кальцию, чем экссудация обычных корней.

Полученные данные 1) подтверждают энергозависимое участие белков цитоскелета, включая актин, миозин, тубулин, в формировании метаболической составляющей корневого давления; 2) делают вероятным участие трансмиттеров, аналогичных нейромедиаторам животных, и кальция в регуляции корневого давления путем энергозависимого взаимодействия с белками цитоскелета; 3) свидетельствуют об ошибочности все еще широко распространенной концепции, уподобляющей нагнетающую деятельность корня работе простого осмометра; 4) выявляют некоторые метаболические механизмы регуляции транспорта воды в растении. Все полученные данные являются приоритетными.

## **Теоретический и компьютерный анализ молекулярно-генетических основ гормональной регуляции**

Номер проекта: 98-04-49479

Год представления отчета: 2001

Создана компьютерная технология формализованного представления разнородной информации по молекулярно-генетическим механизмам регуляции эндокринных функций на различных иерархических уровнях функционирования (ген, клетка, ткань, орган и целостный организм). Основой технологии является разработанная нами специализированная молекулярно-биологическая база данных GeneNet. На основе реферирования научной литературы нами созданы диаграммы базы GeneNet, описывающие:

- регуляцию биосинтеза стероидных гормонов (альдостерона, глюкокортикоидов, тестостерона и эстрadiола) на транскрипционном уровне;
- регуляцию содержания в клетке холестерина, исходного вещества синтеза стероидных гормонов;
- действие альдостерона в главных клетках дистальных канальцев почек крыс;
- действие гормона эритропоэтина на дифференцировку и созревание эритроцита;
- регуляцию биосинтеза гормона лептина и его эффекта на уровне организма (диаграмма "Leptin (organism level)");
- регуляцию функции щитовидной железы (диаграмма "Thyroid system").

В качестве базового уровня при описании молекулярно-генетических механизмов регуляции физиологических систем на транскрипционном уровне использованы тематические разделы базы транскрипционных регуляторных районов (Transcription Regulatory Regions Database, TRRD).

На основе реферирования научной литературы созданы либо существенно пополнены тематические разделы базы данных TRRD, включающие информацию о генах эндокринной системы (ES-TRRD, 112 генов), липидного метаболизма (LM-TRRD, 75 генов) и эритропоэза (ESGR-TRRD, 56 генов). Всего за отчетный период (1998–2000 гг.) осуществлено реферирование 415 статей. База данных GeneNet установлена на молекулярно-биологическом сервере Института цитологии и генетики и доступна пользователям через сеть Интернет. Осуществлена интеграция базы данных GeneNet с тематическими разделами базы TRRD в рамках единой компьютерной системы GeneExpress. На основе данных, накопленных в базе TRRD, проведен анализ транскрипционного уровня регуляции эндокринных функций. Выявлены особенности структурно-функциональной организации транскрипционных регуляторных районов генов, контролирующих эндокринную регуляцию физиологических процессов. На основе данных базы GeneNet построены математические модели регуляции уровня холестерина в клетке, а также дифференцировки эритроцита под действием эритропоэтина. Математические модели позволяют рассчитывать кинетику основных компонентов изучаемых систем в норме, а также моделировать поведение систем, несущих мутации.

## **Молекулярно-генетические механизмы повышенной устойчивости мутантов бактерий к летальному действию ионизирующей радиации и ультрафиолетового света**

Номер проекта: 98-04-48696

Год представления отчета: 2000

Изучены радиобиологические характеристики трех радиоустойчивых штаммов *E. coli* K-12 DE39, CH17 и KS0160, выделенных в США д-ром Д. Юингом (D. Ewing) по признаку устойчивости к рентгеновскому излучению. Определены параметры кривых инактивации гамма-лучами, перекисью водорода и ультрафиолетовым светом. Для дальнейшей работы выбран штамм KS0160, как наиболее радиорезистентный. Проверена способность клонированных нами ранее из радиоустойчивого штамма *E. coli* Gam(r)444 плазмид pGam12, pGam18 и pGam26 увеличивать радиоустойчивость штамма KS0160. Заметного повышения радиоустойчивости не обнаружено, что позволяет предположить существование подобных мутаций в штамме KS0160. Методом рекомбинации *in vivo* сконструирована плазмимда, несущая аллель радиоустойчивости из штамма KS0160 pGam300, способная повышать устойчивость клеток дикого типа к гамма-излучению с фактором изменения дозы ФИД-2. Проведено картирование мутации радиоустойчивости gam12 методом гибридизации с фагами лямбда библиотеки Кохары, несущими геном *E.coli*. Получено несколько позитивных сигналов. Общим признаком этих клонов Кохары явилось присутствие IS1-элемента. Высказано предположение, что мутантный аллель находится рядом с одним из IS1-элементов. Синтезированы праймеры к району IS1-cspG и проведена амплификация, подтвердившая предположение, что мутация радиоустойчивости gam12, по-видимому, затрагивает ген холодового стресса cspG. Проверено влияние инактивации за счет вставки транспозона одного из генов-регуляторов системы белков холодового стресса cspA на радиочувствительность. Показаны рост радиоустойчивости гетерозиготы cspA(-)/cspA(+) и еще более высокая устойчивость гомозиготы cspA(-)/cspA(-). Синтезированы праймеры к левому и правому концам фага Mu, flankирующим клонированные последовательности в векторе pBC4042, проведено пробное секвенирование исходной плазмиды и плазмид, несущих домinantный аллель радиоустойчивости gam18 и recessивный аллель радиоустойчивости gam12.

## **Индукцируемое образование множественных жизнеспособных наноклеток из одной бактериальной клетки**

Номер проекта: 98-04-48338

Год представления отчета: 1999

Известно, что природные экосистемы содержат нанобактерии (называемые также ультрамикробактерии, бактериальные фильтрующиеся формы и т. п.) и что обработка бактериальных культур химическими агентами ведет к образованию мелких (0,05–0,4 мкм) клеток (мелких L-форм, элементарных тел и т. п.). Авторы данного проекта обнаружили, что обработка бактериальных и археальных культур высокочастотным облучением (ВЧ) также приводила к образованию аналогичных мелких клеточных форм. Проект посвящен исследованиям образуемых наноклеток: разработке ВЧ-режима получения наноклеток; электронно-микроскопическому и цитохимическому анализу клеточного содержимого после ВЧ-воздействия (дифференциация и разделение обработанных клеток). Несмотря на существенное сокращение финансовой поддержки, исследователи получили принципиально новые результаты. В рамках осуществления данного проекта должно быть отмечено следующее: образование различных типов малых форм (наноформ) из исходных бактериальных/археальных клеток в зависимости от

разных типов ВЧ, времени и мощности облучения; различные типы разделения внутриклеточного материала; представление о формировании нанобактерий, фильтрующихся бактериальных форм, ультрамикробактерий и т. п. как о направленном на выживание общем ответе бактерий на неблагоприятные условия или повреждающие факторы.

## **Роль структурно-динамической организации реакционных центров пурпурных бактерий и модельных систем в процессах преобразования энергии света в электрохимическую энергию разделенных зарядов**

Номер проекта: 98-04-48677

Год представления отчета: 2001

Методом абсорбционной пикосекундной спектроскопии исследованы кинетики переходных процессов в фотосинтетических РЦ пурпурной бактерии *Rb. sphaeroides* при различных воздействиях, затрагивающих сетку водородных связей. Показано, что замещение H<sub>2</sub>O на D<sub>2</sub>O не заменяет величину *E<sub>m</sub>*, тогда как добавление 70 % глицерина и 35 % ДМСО увеличивает значение *E<sub>m</sub>* на 30 и 45 мВ, соответственно. Вместе с тем, замещение H<sub>2</sub>O на D<sub>2</sub>O и добавление ДМСО уменьшает значения констант скоростей миграции энергии (*k<sub>m</sub>*), разделения зарядов (*k<sub>e</sub>*) и переноса электрона (*k<sub>Q</sub>*) в 1,5–3 раза, тогда как добавление глицерина не влияет на величины *k<sub>m</sub>*, *k<sub>e</sub>* и *k<sub>Q</sub>*. Выполнен теоретический анализ возможных механизмов изменения значений *E<sub>m</sub>* как следствие модифицирующих воздействий. Учтено изменение диэлектрической проницаемости, набухание белковой глобулы и изменение распределения зарядов внутри глобулы. Предложена энергетическая модель, объясняющая природу пигмент-белковых взаимодействий в РЦ во временном диапазоне 10<sup>-13</sup>–10<sup>-7</sup> с. Сделан вывод, что водородные связи в окрестностях кофакторов активно реагируют на появление неравновесных состояний переносчиков, способствуя их сolvатации. В результате формируются оптимальные энергетические конфигурации, способствующие реализации высокoeffективных прямых фотосинтетических реакций и препятствующие обратным процессам. Синтезирована новая триадная система на основе мезопорфирина II. Дополнительными компонентами триады являлись остаток метилового эфира L-тироцина (ТуGOMe) и 2-(2-гидроксиэтил)-тио-3-метил-1,4-нафтохинон. Методами стационарной и динамической флуоресцентной спектроскопии исследована миграция энергии и перенос электрона в системе. Определены квантовые выходы флуоресценции для P-Q *Φ* = 0,16 и для TuGOMe-P-Q *Φ* = 0,53. Проведен компьютерный расчет наиболее предпочтительной конформации триады. Исследованы фотофизические свойства карборанового производного 5, 10, 15, 20-тетра (N – аминофенил) порфирина. Впервые экспериментально зарегистрирован внутримолекулярный перенос электрона от возбужденного состояния порфириновой части молекулы к карборанилам с константой скорости ~415 пс<sup>-1</sup> и эффективностью ~0,8. Определены константы скоростей образования состояния с переносом заряда и рекомбинации разделенных зарядов. Предложена схема фотофизических процессов в данном соединении.

## **Предсказание пространственной структуры белков с использованием теории самосогласованного поля и множественных гомологий белковых цепей**

Номер проекта: 98-04-49303

Год представления отчета: 2001

Создана общая теория использования гомологичных цепей для предсказания трехмерных белковых структур. В настоящее

время возможность предсказания третичной структуры белка по его собственной аминокислотной последовательности весьма проблематична, так как она ограничена неизбежными погрешностями в оценке энергий разных укладок. Однако развитая нами теория показала, что, используя набор достаточно отдаленных гомологов (т. е. белков с почти одинаковой, несмотря на множество мутаций, трехмерной структурой) и усредняя энергию каждой укладки по всем этим гомологам, можно резко снизить "шум" погрешностей и найти общую укладку всех этих гомологических цепей. Эти теоретические (аналитические) оценки подтверждены (а) компьютерными экспериментами с упрощенными моделями белков и (б) "протягиванием" последовательностей многих десятков белковых семейств по сотням белковых структурных каркасов. Для упрощенных моделей белков показано, что усреднение энергии по множеству слабогомологичных последовательностей позволяет находить их пространственные структуры методом имитации их сворачивания даже тогда, когда для всех отдельных цепей это сделать невозможно, — из-за погрешностей в потенциалах взаимодействий. Что касается расчетов реальных белков, то применение множества слабогомологичных белковых последовательностей, а равно и множества слабогомологичных белковых скелетов, действительно, позволяет заметно улучшить опознавание укладок белковых цепей их первичными структурами. Построена компьютерная программа для такого опознавания укладок белковых цепей методом "протягивания". Разработаны методы анализа сети путей сворачивания-разворачивания белка. Показано, что эти методы дают возможность довольно точно оценки скорости сворачивания белка по размеру домена и форме укладки цепи в нем. Моделирование сворачивания-разворачивания всех белков, в которых экспериментально выделены остатки, принадлежащие к "ядрам сворачивания", продемонстрировало неплохое согласие с экспериментом (в смысле выделения важных для кинетики сворачивания мест белковой цепи).

## **Характеристика генетического разнообразия этнических групп России путем гаплотипирования митохондриальной ДНК с помощью олигонуклеотидных микрочипов**

Номер проекта: 98-04-48740

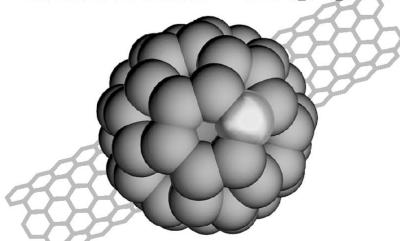
Год представления отчета: 2001

За отчетный период (1998—2000 гг.) исследовано разнообразие mtДНК в восьми этнических группах европейской части России. В целом были выявлены гаплотипы более 620 индивидов. Исследованные популяции относятся к трем языковым группам: славянской (русские), финно-угорской (мары, удмурты, морда эзя, морда мокша) и тюркской (татары, башкиры, чуваши). На основе частот выявленных гаплотипов были рассчитаны характеристики внутри- и межпопуляционного разнообразия. Филогенетические отношения между гаплотипами выявлялись с использованием метода медианных сетей. Такой анализ позволил оценить степень родства исследованных этнических групп и их положение среди других народов. Исследованные популяции относятся к различным языковым семьям, однако имеют большое число общих линий, в том числе не обнаруженных у других народов. Можно отметить и отдельные различия, коррелирующие с языковой принадлежностью: в целом тюркоязычные популяции (башкиры, татары, чуваши) содержат больше монголоидных линий, чем финно-угорские народы (мары, эзя, мокша). Среди гаплогрупп, характерных для Европы, также имеются различия между представителями разных языковых семей региона. В частности, гаплогруппа K имеет весьма низкий процент среди финно-угорских народов. Гаплогруппа U2 выявлена главным образом только у финно-угорских народов. Таким образом, несмотря на общность, выявленную у исследованных народов, имеются также отличия, коррелирующие с языковой принадлежностью.

## **МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ**

Москва, Новый Арбат, 36, здание Правительства Москвы

### **MNTEx - 2004**



8-10 декабря 2004 года

#### **ДИРЕКЦИЯ ВЫСТАВКИ:**

ООО "Компания МКМ ПРОФ",  
107140, г. Москва, ул. Верхняя Красносельская, 2,  
офис 402  
Тел./факс: (095) 502-19-38, 775-17-20, 502-19-37  
[www.mktxpo.ru](http://www.mktxpo.ru) e-mail: [mkmprof@mail.ru](mailto:mkmprof@mail.ru)

#### **ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА:**

- симпозиум "Микророботы, микромашины и системы"
- симпозиум "Наноструктуры: физика и технология"
- симпозиум "Нанотехнологии и фотонные кристаллы"
- совещание "Нанофотоника 2004"
- семинары и симпозиумы по применению наноматериалов и нанотехнологий

#### **ОРГАНИЗАТОРЫ:**

Департамент науки и промышленной политики города Москвы  
ОАО "Московский комитет по науке и технологиям"

#### **УСТРОИТЕЛЬ:**

ООО "Компания МКМ ПРОФ"

ОАО "Московский комитет по науке и технологиям",  
121069, г. Москва, Борисоглебский пер., д.6, стр.3  
Тел.: 202-76-91, 201-23-86; факс: 201-30-95  
e-mail: [pas@mkntr.ru](mailto:pas@mkntr.ru)

# КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ ЖУРНАЛА "МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА"

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР** — Мальцев Петр Павлович, д-р техн. наук, проф., начальник научно-технического сектора Секции прикладных проблем при Президиуме РАН, зав. каф. "Микросистемная техника", МИРЭА, г. Москва  
**ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА** — Лучинин Виктор Викторович, д-р техн. наук, проф., директор Центра диагностики и микротехнологии Санкт-Петербургского государственного университета, г. С.-Петербург

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

**Аристов Виталий Васильевич**, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., директор Института проблем технологий микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, п. Черноголовка, зав. каф. "Наноэлектронники" МФТИ  
**Васильев Всеволод Викторович**, чл.-корр. НАН Украины, д-р техн. наук, проф., директор Отделения гибридного моделирования и систем управления в энергетике НАН Украины  
**Гапонов Сергей Викторович**, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., директор Института физики микроструктур РАН, зав. каф. "Электроника" НИхГУ, г. Нижний Новгород  
**Каляев Виктор Анатольевич**, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., директор НИИ многопроцессорных вычислительных систем ТГРТУ, зав. каф. "Автомобильная электроника", г. Таганрог  
**Климов Дмитрий Михайлович**, акад. РАН, д-р техн. наук, проф., советник РАН, г. Москва  
**Лифшиц Виктор Георгиевич**, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., директор Научно-технического центра полупроводниковой микроэлектроники Института автоматики и процессов управления ДВО РАН, зав. каф. "Физика и технология материалов для полупроводниковой электроники" ДГУ, г. Владивосток  
**Мокеров Владимир Григорьевич**, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., директор Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, зав. каф. "Полупроводниковые приборы". МИРЭА, г. Москва  
**Никитов Сергей Аполлонович**, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., зам. директора Института радиотехники и электроники РАН, г. Москва  
**Чаплыгин Юрий Александрович**, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., ректор Московского государственного института электронной техники (технического университета), зав. каф. "Микроэлектроника и микросистемная техника", г. Зеленоград

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

**Антонов Борис Игоревич**, директор изд-ва "Новые технологии", г. Москва  
**Астахов Михаил Васильевич**, д-р хим. наук, проф., зав. каф. "Физическая химия" Московского государственного института стали и сплавов (технический университет)  
**Белоус Анатолий Иванович**, д-р техн. наук, проф., зам. директора Научно-исследовательского конструкторско-технологического предприятия БелМикроСистемы НПО "Интеграл", Республика Беларусь, г. Минск  
**Быков Виктор Александрович**, д-р техн. наук, директор ЗАО NT-MDT ГосНИИФиз проблем им. Ф. В. Лукина, г. Зеленоград  
**Васильев Александр Алексеевич**, начальник отдела Минпромнауки России, г. Москва  
**Волчихин Владимир Иванович**, д-р техн. наук, проф., ректор Пензенского государственного университета, г. Пенза

**Горнев Евгений Сергеевич**, д-р техн. наук, проф., зам. генерального директора ОАО "Элла", г. Зеленоград  
**Градецкий Валерий Георгиевич**, д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией Института проблем механики РАН, г. Москва  
**Журавлев Петр Васильевич**, канд. техн. наук, директор Конструкторско-технологического института прикладной микроЭлектроники СО РАН г. Новосибирск  
**Захаревич Владимир Георгиевич**, д-р техн. наук, проф., ректор Таганрогского государственного радиотехнического университета, г. Таганрог  
**Кальнов Владимир Александрович**, канд. техн. наук, ученый секретарь Физико-технологического института РАН, г. Москва  
**Карякин Аркадий Аркадьевич**, д-р хим. наук, проф., зав. лабораторией "Биосенсоры" Химического ф-та МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва  
**Кузин Александр Юрьевич**, д-р техн. наук, с. н. с., начальник центра 32 ГНИИ МО РФ, г. Мытищи  
**Мокров Евгений Алексеевич**, д-р техн. наук, генеральный директор — главный конструктор НИИ физических измерений, г. Пенза  
**Норенков Игорь Петрович**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. САПР, МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва  
**Панич Анатолий Евгеньевич**, д-р техн. наук, проф., директор — главный конструктор Научного конструкторского бюро "Пьезоприбор", г. Ростов-на-Дону  
**Панфилов Юрий Васильевич**, д-р техн. наук, проф. МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва  
**Петросянц Константин Орестович**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. "Электроника и электротехника" Московского государственного института электроники и математики (технического университета)  
**Петрунин Вадим Федорович**, д-р физ.-мат. наук, проф. Московского государственного инженерно-физического института, зав. отраслевой лабораторией  
**Путилов Александр Валентинович**, д-р техн. наук, проф. Министерства промышленности и энергетики России, г. Москва  
**Пятышев Евгений Нилович**, канд. физ.-мат. наук, Санкт-Петербургский гос. техн. ун-т, зав. лабораторией микротехнологии и микроэлектромеханических систем, г. Санкт-Петербург  
**Сауров Александр Николаевич**, д-р техн. наук, проф., директор НПК "Технологический центр" МИЭТ (технического университета), г. Зеленоград  
**Сигов Александр Сергеевич**, д-р физ.-мат. наук, проф., ректор Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики (технического университета), зав. каф. "Электроника конденсированных сред"  
**Станкевич Владимир Георгиевич**, д-р физ.-мат. наук, проф. директор отделения "Курчатовского источника синхронного излучения" ИОЯФ РНЦ "Курчатовский институт", г. Москва  
**Старостин Анатолий Константинович**, д-р физ.-мат. наук, проф., директор ФГУП "Научно-исследовательский и экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования", г. Москва  
**Степанов Юрий Иванович**, канд. техн. наук, начальник 22 ЦНИИ МО РФ, г. Мытищи, зав. каф. "Материалы и изделия радиоэлектронники" МИРЭА  
**Сухопаров Анатолий Иванович**, канд. техн. наук, доцент, Председатель Федерального фонда развития электронной техники, г. Москва  
**Телец Виталий Арсеньевич**, д-р техн. наук, с. н. с., начальник центра 22 ЦНИИ МО РФ, г. Мытищи

# CONTENTS

**Ivanov A. A., Maltsev P. P.** *Microsystems Technology as a Base of Scientifical and Technical Progress in Arms Development* ..... 2

The questions of the development of new arms on the base of microsystems technology are considered.

**Vasiliev A. A.** *Very Low Power Semiconductor Sensors Based on Thin Dielectric Membranes* ..... 7

In this paper, different variant of sensor technology, which enable the manufacturing of semiconductor and thermocatalytic sensors of combustible and toxic gases with minimum power consumption are considered. These are technologies of thick films, fabrication of thin dielectric membranes based on aluminum oxide (TAF — Thin Alumina Membranes) and a combination of silicon micromachining with the deposition of thick film sensing layers. Two last methods allow us to fabricate sensors applicable in pocket and autonomous instruments.

**Mokerov V. G.** *Heterostructure Electronics and New Prospects of Nanoelectronics* ..... 13

State of the art and the future prospects of physics and technology of semiconductor nanoheterostructure, as well as nanotechnology of device fabrication of their basis are discussed.

**Karagusov V. I.** *Nanocryogenic Technologies* ..... 15

The existing microcryogenic systems much more exceed electronic units of cooling in dimensions and mass. They have less resources and reliability. The modern level allows to execute cryogenic and electronic systems by the united nanotechnologies. As a result the cryogenic systems can be placed within electronic devices, for example, such as chips.

**Dragunov V. P.** *Nonlinear Dynamic Model of Elastic Element for MMS* ..... 23

In this article, a study nonlinear vibrations of circular, square, triangular and hexagonal diaphragms with a clamped edges is presented. The analytical equations which help to simulate behavior of elastic elements for micromechanical systems are obtained. The dynamic analogue of the von Karman equations is used to establish the governing equations, taking into account the stretching of the mid-plane of the plate.

**Kulichin Yu. N., Kamenev O. T., Petrov Yu. S.** *Lateral Deformation Amplitude Distribution Reconstruction by Distributed Fiber Optic Measuring Network* ..... 30

General principles of distributed fiber-optic measuring network organization are presented. The fiber optic measuring network for lateral deformation amplitude distribution reconstruction is presented. The distributed fiber-optic measuring line is presented.

**Vagin M. Yu., Karyakin A. A.** *Electrochemical Sensors for Direct Detection of Affinity Interactions Based on the Self-Assembled Layers of Surfactant Molecules* ..... 35

The opportunity for the molecular bilayer formation onto the solid support is proposed due to the self-assembling of the nonionic surfactant Brij-52 molecules on the gold surface. The obtained membranes were studied by electrochemical impedance spectroscopy. The structures have uniform structure and contained only a minor number of defects. The layer capacitance calculated from impedance spectra was close to the capacitance of the lipid bilayers which separates the two aqueous solutions of electrolyte, indicating that the self-assembling of Brij-52 resulted in formation of its bilayer on the gold electrode surface. The uniform bilayers of Brij-52 on gold support are stable, in contrast to lipids, which provide the opportunity of their application for analytical purposes. The simple methods for the preparing of direct affinity sensors based on developed Brij-52 bilayers are proposed. For DNA-sensor we propose to immobilize oligonucleotide on the surfactant bilayer surface by spontaneous infiltration of hydrocarbon chain bound to oligonucleotide into the hydrophobic region of surfactant bilayer. The adsorption of antibodies on bilayer surface has resulted in immunosensor development. The direct detection of affinity interactions in both cases has been investigated by impedance spectroscopy. The addition of complement into the DNA-sensor system led to the decrease of real part of the impedance. At the contrary the addition of specific antigen into the immunosensor system led to the increase of real part of the impedance. The obtained results are promising for the development of impedimetric affinity sensors for clinical or environmental applications.

**Kozlov V. A., Terentyev D. A.** *Correction of the Frequency Response of an Molecular Electronic Rotary Accelerometer within the Infra Low Frequencies Region* ..... 41

By minor variation of geometrical parameters of the electrode system the practical problem of reception of the flat frequency response of an molecular electronic angular accelerometer in a wide frequency range and with the preset accuracy is solved.

## For foreign subscribers:

*Joint-stock company MK-Periodica. E-mail: info@periodicals.ru Tel.: +7(095) 284-5008. Fax: +7(095) 681-3798*

*The journal bought since november 1999.*

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

**ISSN 1684-6419.**

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

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

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4/1. Телефон редакции журнала **(095) 269-5510**. E-mail: [it@novtex.ru](mailto:it@novtex.ru). Журнал зарегистрирован в Государственном Комитете Российской Федерации по печати. Свидетельство о регистрации № 018929 от 10.06.99.

Дизайнер Т.Н. Погорелова. Технический редактор И.С. Павлова. Корректор Ю. Н. Рыбакова

Сдано в набор 02.08.2004. Подписано в печать 03.09.2004. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Усл. кр.-отт. 7,84. Уч.-изд. л. 7,39. Заказ 1456. Цена договорная

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