

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 8 (85) ✧ 2007

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Издается с 1999 г.

Главный редактор

Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В.

Редакционный совет:

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

Редакционная коллегия:

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

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

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

Учредитель:

Издательство
"Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Лучинин В. В. Введение в индустрию наносистем 2

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Ветров А. А., Комиссаров С. С., Корляков А. В., Сергушичев А. Н.

Волоконно-оптический вибродатчик на основе микрооптомеханического преобразователя 8

Афанасьев А. В., Ильин В. А. Фотодиодные и МДП-сенсоры ультрафиолетового излучения на основе монокристаллического и пористого карбида кремния . . . 13

Корляков А. В. Сверхтонкие мембраны в микросистемной технике 17

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

Зими́на Т. М. Микро- и наносистемы в задачах жидкостного

и газового анализа 27

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Гайкович К. П. Сканирующая ближнепольная электромагнитная

томография 50

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

Косцов Э. Г., Фадеев С. И., Колесников А. А. Высокоэнергоемкие

микроэлектромеханические коммутаторы 66

ИНФОРМАЦИЯ 71

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ 74

Contents

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

Аннотации статей журнала и требования к оформлению статей доступны на сайте журнала:
<http://www.microsystems.ru>. E-mail: nmst@zknet.ru

ПОДПИСКА:

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

УДК 621.3

В. В. Лучинин, д-р техн. наук, проф.
Центр микротехнологии и диагностики
Санкт-Петербургского государственного
электротехнического университета "ЛЭТИ"

ВВЕДЕНИЕ В ИНДУСТРИЮ НАНОСИСТЕМ

Представлен системный подход к индустрии наносистем как приоритетному направлению развития науки и техники.

Дано определение основных понятий, используемых в индустрии наносистем, и определен ее научно-производственный и образовательный базис с учетом интеграции с приоритетными направлениями развития науки, техники и технологии.

Введение

В социально-экономических приоритетах государства особое место должно занимать развитие наукоемких отраслей производства с высоким уровнем добавленной стоимости. Для лидеров мировой экономики на современном этапе, таким направлением, безусловно, является **нанотехнология** [1, 2].

Целью настоящей статьи является краткое изложение системного подхода к **"индустрии наносистем"**, как приоритетному направлению развития науки и техники, фактору, определяющему повышение роли высоких технологий в экономике государства, стимулирующему решение социально-значимой для России задачи: "сохранению человеческого капитала" — носителя генетического, культурного и технологического наследия.

Методологические основы индустрии наносистем

В наших более ранних работах [3, 4] отмечалось, что в основе научно-технического прорыва на наноуровне, форсируемого промышленно развитыми странами, лежит *использование новых, ранее не известных свойств и функциональных возможностей материальных систем при переходе к наномасштабам, определяемых особенностями процессов переноса и распределения зарядов, энергии, массы и информации при наноструктурировании.*

Возьмем на себя ответственность изложить некоторые методические понятийные аспекты нового научно-технического направления.

Обратимся к важнейшему фактору — геометрическому размеру и приставке "нано", входящей в ряд основных, наиболее часто используемых в официальных документах, понятий: *нанотехнология, наноматериалы, наносистемы.*

Первоначально обратим внимание на исходные смысловые значения наиболее часто употребляемых приставок, идентифицирующих характеристические и геометрические размеры изучаемых объектов:

микро- (от греч. mikros — малый);

нано- (от греч. nanos — карлик).

Применительно к индустрии наносистем границы геометрического фактора в отношении возникновения новых нетрадиционных свойств, не присущих макро- и микросистемам, формально определены от единиц до 100 нм [5]. Однако вполне очевидно, что некоторый характеристический размер, идентифицирующий изучаемый объект по геометрическому параметру (толщина пленки, диаметр кластера или нанотрубки), должен рассматриваться не просто как абсолютная величина, а в отношении к определенным фундаментальным параметрам материалов, имеющим аналогичную метрическую размерность. Особенно сложно определить границы геометрического фактора применительно к биоорганическим объектам, обладающим многообразием связей и конформаций. Поэтому приставка "нано" скорее особое обобщенное отражение объектов исследований, прогнозируемых явлений, эффектов и способов их описания, чем просто характеристика протяженности базового структурного элемента.

Необходимость данного замечания обусловлена следующим. К сожалению, термины **"наноматериалы"** и **"нанотехнологии"** стали настолько модными и "экономически привлекательными", что многие традиционные разработки атомно-молекулярного уровня искусственно приобрели имидж **"нано"**. Наряду с определенной конъюнктурой, это, безусловно, связано и с тем, что, как отмечалось в предисловии редактора русского перевода к одной из первых в России иностранных книг по нанотехнологии [6], **"нигде не проводится систематизация объектов и процессов нанотехнологии"**.

Развивая и обобщая наши представления об индустрии наносистем [3, 4], а также анализируя ранее опубликованные работы [1, 2, 5, 6, 7], вынесем на обсуждение ряд базовых понятий с приставкой **"нано"**, наиболее полно отражающих именно проявление функционально-системных свойств, а не только чисто геометрических особенностей (параметров) объектов.

Наносистема — материальный объект в виде упорядоченных или самоупорядоченных, связанных между собой элементов с нанометрическими характеристическими размерами, кооперация которых обеспечивает возникновение у объекта новых свойств, проявляющихся в виде квантово-размерных, синергетически-кооперативных, "гигантских" эффектов и других явлений и процессов, связанных с проявлением наномасштабных факторов.

Наноматериалы — вещества и композиции веществ, представляющие собой искусственно или ес-

тественно упорядоченную или неупорядоченную систему базовых элементов с нанометрическими характеристическими размерами и особым проявлением физического и (или) химического взаимодействий при кооперации наноразмерных элементов, обеспечивающих возникновение у материалов и систем совокупности ранее неизвестных механических, химических, электрофизических, оптических, теплофизических и других свойств, определяемых проявлением наномасштабных факторов.

Нанотехнология — совокупность методов и способов синтеза, сборки, структуро- и формообразования, нанесения, удаления и модифицирования материалов, включая систему знаний, навыков, умений, аппаратное, материаловедческое, метрологическое, информационное обеспечение процессов и технологических операций, направленных на создание материалов и систем с новыми свойствами, обусловленными проявлением наномасштабных факторов.

Нанодиагностика — совокупность специализированных методов исследований, направленных на изучение структурных, морфолого-топологических, механических, электрофизических, оптических, биологических характеристик наноматериалов и наносистем, анализ нанокolicеств вещества, измерение метрических параметров с наноточностью.

Наносистемотехника — совокупность методов моделирования, проектирования и конструирования изделий различного функционального назначения, в том числе наноматериалов, микро- и наносистем с широким использованием квантово-размерных, кооперативно-синергетических, гигантских эффектов и других явлений и процессов, проявляющихся в условиях материальных объектов с нанометрическими характеристическими размерами элементов.

Наряду с определением ранее указанных понятий, основой которых, в первую очередь, является естественно-научный базис, сделаем попытку представить широко используемые в литературе термины [1], вызывающие неоднозначное их восприятие.

Нанонаука — система знаний, основанная на описании, объяснении и предсказании свойств материальных объектов с нанометрическими характеристическими размерами или систем более высокого метрического уровня, упорядоченных или самоупорядоченных на основе наноразмерных элементов.

Нанотехника — машины, механизмы, приборы, устройства, материалы, созданные с использованием новых свойств и функциональных возможностей систем при переходе к наномасштабам и обладающие ранее недостижимыми массогабаритными и энергетическими показателями, технико-экономическими параметрами и функциональными возможностями.

Фундаментальные основы индустрии наносистем

В основе системы знаний об объекте исследований безусловно лежит анализ его вещественно-материального базиса, структурного упорядочения и устойчивости, пространственно-временной организации, а также количественное и качественное проявление традиционных и ранее неизвестных свойств в зависимости от условий синтеза и функционирования.

В качестве объекта исследований в рамках данной статьи была выбрана совокупность ранее представленных понятий (наноматериалы, нанотехнология, нанодиагностика, наносистемотехника) и предпринята попытка выделения комплекса их функциональных особенностей, отражающих облик "индустрии наносистем" (табл. 1).

Наиболее характерными проявлениями "наномира", даже по сравнению с традиционными объектами с микроскопическими характеристическими размерами, следует признать:

- появление нетрадиционных видов симметрии и особых видов сопряжения границ раздела, конфигураций с динамически перестраиваемой структурой;

Таблица 1

Характеристика "Индустрии наносистем"

Направление развития	Функциональные особенности
Наноматериалы	
• 0-мерные: квантовые точки • 1-мерные: квантовые нити, нанотрубки, нановолокна, линейные полимеры • 2-мерные: квантовые ямы, сверхрешетки, пленки Ленгмюра—Блоджетт, биомембраны • 3-мерные: нанокомпозиты, фуллерены, фуллероиды, астралены, мицеллы, биоорганические полимеры	• Легкость • Прочность • Стойкость • Эластичность • Биосовместимость • Селективность • Энергоемкость • Память
Нанотехнология	
• Атомно-молекулярное наслаивание • Атомно-молекулярная сборка и самосборка • Атомно-молекулярное модифицирование и удаление • Атомно-молекулярная селекция • Неравновесный синтез	• Наноточность • Нанолокализация • Нанопозиционирование • Наноизбирательность • Нанокатализ • Самоформирование • Самоорганизация
Нанодиагностика	
• Атомно-зондовая микроскопия • Электронная микроскопия и спектроскопия • Масс-спектрометрия • Оптическая спектроскопия • Дифрактометрия • Эллипсометрия • Электрофорез • Хроматография • Парамагнитный резонанс	• Наноточность • Наночувствительность • Нанокolicество
Наносистемотехника	
• Кооперативность • Избирательность • Полиморфизм • Распределенность • Интеграция синтеза и функционирования	• Наномасштабирование • Квантовые размерные эффекты • Синергетические эффекты • "Гигантские" эффекты • Ассоциативные эффекты • Неравновесные процессы

- доминирование над процессами искусственного упорядочения явлений самоупорядочения и самоорганизации, отражающих проявление эффектов матричного копирования и особенностей синтеза в условиях, далеких от равновесных;
- высокая "полевая" (электрическая, магнитная) активность и "каталитическая" (химическая) избирательность поверхности ансамблей на основе наночастиц, включая интегрированные композиции неорганической и органической природы;
- особый характер протекания процессов передачи энергии, заряда и конформационных изменений, отличающихся низким энергопотреблением, высокой скоростью и носящих признаки кооперативного синергетического процесса.

Следует предположить, что причиной появления вышеуказанных особенностей в условиях "наномира" является:

- изменение отношения площади поверхности к объему при переходе к наноразмерным системам;
- энергетическая, полевая и "вещественная" неравновесность поверхности, охватывающая значительные объемы наночастиц;
- усиление роли различных видов размерных эффектов вследствие значительной площади границ раздела в условиях наноконпозиций;
- проявление в условиях больших коллективов энергетически активных наночастиц нетрадиционных механизмов упорядочения, переноса энергии и заряда;
- малые характеристические размеры частиц и особый характер их упорядочения, обеспечивающие энергетическую и пространственную доступность транспорта заряда, энергии и конформационных изменений.

Все ранее сказанное позволило предложить ряд постулатов, определяющих характерные признаки и направления развития наноматериалов, нанотехнологий и наносистем (табл. 2).

Таким образом, **фундаментальным базисом индустрии наносистем являются новые ранее неизвестные свойства материалов и композиций, возникающие при переходе к объектам, представляющим собой интеграцию искусственно или естественно упорядоченных наносистем.** Это обусловлено особым проявлением в наноконпозициях и ансамблях субмолекулярных комплексов кооперативно-синергетиче-

ских явлений и процессов, квантово-размерных и "гигантских" эффектов.

В настоящее время, по нашему мнению, в качестве фундаментальных проблем nanoиндустрии можно выделить следующие направления исследований:

- малые ансамбли молекул, межмолекулярные взаимодействия и молекулярная динамика;
- размерные и функциональные свойства наночастиц, конформации, межфазные границы;
- наномасштабирование и квантово-размерные эффекты;
- неравновесные процессы и синергетические явления в наноструктурированных материалах;
- теории матричного синтеза, сборки, самосборки и молекулярного узнавания для веществ органической и неорганической природы.

В качестве одного из возможных подходов к формированию концепции развития индустрии наносистем в России, с учетом приоритетных направлений развития науки, технологий и техники может быть предложена матричная модель, отражающая ключевые направления развития индустрии наносистем (наноматериалы, нанотехнологии, нанодиагностика, наносистемотехника) через детализацию и установление взаимовлияния уникальных специфических свойств и особенностей, проявляющихся при переходе к наномасштабам (см. рисунок).

Данная матричная форма может быть использована для прогнозирования критических направлений развития индустрии наносистем с целью повышения результативности исследований и разработок, а также интеграции и координации работ в научной и производственной сферах.

Научно-производственный базис индустрии наносистем

Индустрия наносистем — интегрированный комплекс, включающий: оборудование; материалы; программные средства; систему знаний; технологическую, метрологическую, информационную, организационно-экономическую культуру и кадровый потенциал, обеспечивающие производство наукоемкой продукции, основанной на использовании новых нетрадиционных свойств материалов и систем при переходе к наномасштабам.

В табл. 3 представлен перечень наиболее актуальных, по нашему мнению, научно-технических про-

Таблица 2

Основные постулаты "Индустрии наносистем"

Нanomатериалы <i>Макро- и микрообъекты — интеграция искусственно или естественно упорядоченных (самоупорядоченных) наносистем</i>	Нанотехнологии <i>Наноточность, наноизбирательность и самоорганизация в условиях синтеза макро- и микрообъектов</i>	Наносистемы <i>Макросистемные свойства — проявление кооперативного взаимодействия и избирательности границ раздела наносистем</i>
От макрокристаллов к композициям нанокристаллов и субмолекулярным комплексам От искусственно упорядоченных систем к самоупорядоченным От статического упорядочения к динамическому (неравновесному)	От микро- к наноточности (нанолокализации, нанопозиционированию, наноизбирательности) От организации к самоформированию, самосборке (самоорганизации) От квазиравновесных процессов к неравновесным	От микро- к наномасштабированию От классических размерных эффектов к квантовым От изолированных консервативных систем к открытым кооперативным

ектов, определяющих среднесрочные перспективы индустрии наносистем в рамках ранее рассмотренных направлений ее развития (см. табл. 1).

Реализация представленного в табл. 3 перечня базовых научно-технических проектов, по-видимому, не решит проблемы широкого промышленного развития индустрии наносистем, но обеспечит для России:

- сохранение и развитие отечественного научного и промышленного потенциалов высоких технологий;
- сохранение и развитие кадрового потенциала, интеграцию и эффективное использование высококвалифицированных специалистов;
- интенсификацию междисциплинарных исследований и разработок, обеспечивающих научно-технические прорывы по ключевым направлениям научно-технического прогресса;
- сохранение паритета российской научно-образовательной культуры в области высоких технологий с ведущими зарубежными странами.

Образовательный базис индустрии наносистем

При организации и реализации работ в области индустрии наносистем, наряду с постановкой чисто экономической задачи — повышения эффективности производства на основе опережающего развития высокотехнологичных отраслей, необходимо решать и социальную задачу. Это связано с особой ролью интеллектуального фактора в долгосрочной перспективе развития России как независимого государства.

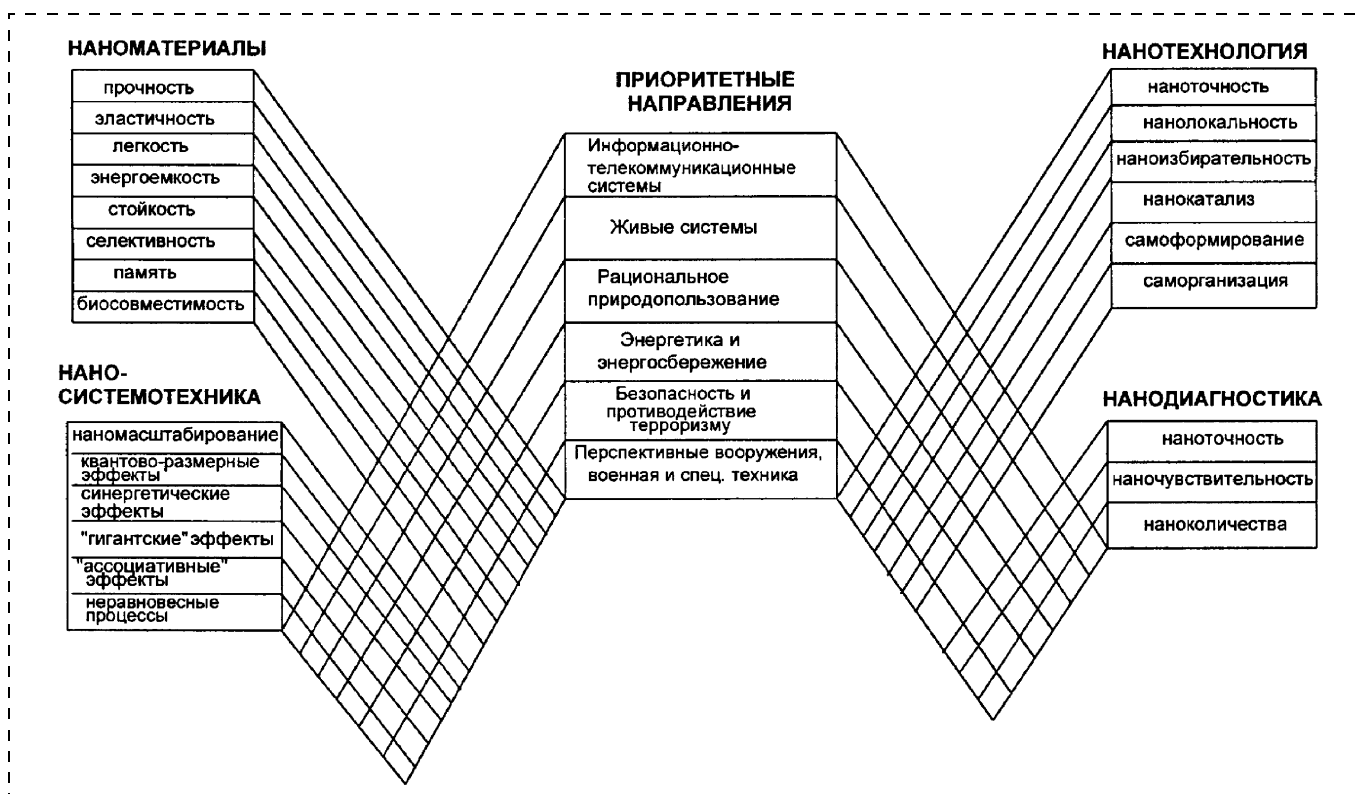
Представляется, что в программе работ должен быть специальный, хорошо продуманный, методически и реально экономически поддержанный блок,

направленный на сохранение и развитие "человеческого капитала", как одного из важнейших факторов обеспечения экономики страны квалифицированными специалистами. Только наличие кадров, способных поддерживать научно-производственный потенциал государства в высокотехнологичных отраслях, обеспечит безопасность государства и конкурентоспособность отечественной продукции военного и гражданского назначений.

В рамках развития образовательного базиса России 04.06.03 был издан приказ № 2398 "Об эксперименте по созданию новых направлений подготовки дипломированных специалистов "Нанотехнология" и специальностей "Нанотехнология в электронике" и "Наноматериалы"". Однако существуют определенные факторы, снижающие эффективность принятых решений с учетом динамики и особенностей развития направления **индустрия наносистем**:

- значительная протяженность временного интервала, требуемого для подготовки дипломированного специалиста;
- относительная "жесткость" принятых учебных программ, ограничивающих предметные области знаний в условиях широты индустрии наносистем как направления;
- неустойчивость в определении основных промышленно значимых направлений развития индустрии наносистем.

На этапе становления индустрии наносистем, как научно-технического направления, более рациональным подходом в отношении оперативности достижения конечного результата (в условиях многообразия возможных путей развития), является реали-



Интеграция приоритетных направлений развития науки, технологий и техники с направлением "Индустрия наносистем и материалы"

Перечень научно-технических проектов в области индустрии наносистем

Направление развития	Названия проектов
Нanomатериалы	• <i>Нанокomпозиционные материалы</i> со специальными механическими свойствами для сверхпрочных, сверхэластичных, сверхлегких конструкций • <i>Нанокomпозиционные и нанодисперсные материалы</i> для высокоэффективной сепарации и избирательного катализа • <i>Нанокomпозиционные материалы</i> с особой устойчивостью к экстремальным факторам для термически-, химически- и радиационностойких конструкций • <i>Нанокomпозиционные материалы</i>, обладающие "интеллектуальными" свойствами, включая: адаптивность, ассоциативность, память • <i>Наноструктуры и нанокomпозиции</i> для электронных и фотонных информационных систем • <i>Нанокomпозиционные биоорганические материалы</i> для медицины и биотехнологии • <i>Специальные нанокomпозиционные материалы</i> с низкой эффективной отражающей или сверхвысокой поглощающей способностью в СВЧ и оптическом диапазонах длин волн • <i>Специальные нанодисперсные материалы</i> с максимально эффективным энерговыделением, в том числе, импульсным
Нанотехнологии	• <i>Машиностроительные нанотехнологии</i> (механическая и корпускулярная обработка с наноточностью) • <i>Физико-химические нанотехнологии</i> (атомно-молекулярная химическая сборка неорганических и органических веществ) • <i>Атомно-зондовые нанотехнологии</i> (нанозондовый сверхлокальный синтез и модифицирование) • <i>Биомедицинские нанотехнологии</i> (биочипы и биокластеры; сверхлокальная и наноизбирательная диагностика, терапия, хирургия; геномная инженерия) • <i>Аппаратно-методическое обеспечение чистоты и микроклимата в индустрии наносистем</i>
Нанодиагностика	• <i>Экспресс-методы контроля химического состава и геометрии нанообъектов</i> • <i>Экспресс-методы регистрации электрических, магнитных и акустических полей нанообъектов, контроль их физических и химических свойств</i>
Наносистемы (наоустройства)	• <i>Нанохимические компоненты (сорбенты, катализаторы, насосы, реакторы) для высокоэффективной очистки, избирательного сверхскоростного высокопроизводительного синтеза, атомно-молекулярной инженерии</i> • <i>Нанoeлектронные компоненты (элементная база) для сверхинтегрированных сверхмощных сверхскоростных систем генерации, хранения, передачи и обработки информации</i> • <i>Нанооптические компоненты (элементная база — излучатели, фотоприемники, преобразователи) для энергетически эффективной светотехники, систем сверхскоростной "сверхплотной" высокопомехозащищенной передачи и обработки информации</i> • <i>Микро- и наноинструмент для процессов атомно-молекулярной инженерии</i>

зация образовательного процесса по двухуровневой системе "бакалавр—магистр".

В апреле 2004 г. Минобразования России (Приказ № 1922 от 23.04.2004) на основании документов, подготовленных УМО по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации, действующего на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, было принято решение о создании нового направления подготовки бакалавров и магистров — 554500 "Нанотехнология".

Целесообразность введения двухуровневой системы подготовки кадров по быстро прогрессирующему направлению обусловлена:

- необходимостью гармонизации структуры отечественного образовательного процесса по базовым направлениям научно-технического прогресса с концепцией, принятой большинством промышленно развитых стран в рамках Болонской декларации;
- объективной ситуацией в развитии данного высокотехнологичного направления, характеризующейся стадией накопления знаний, т. е., в первую очередь, становлением "нанонауки";
- отсутствием не только в России, но и за рубежом, окончательной концепции развития **"индустрии**

наносистем" как промышленного производства, ориентированного на вполне определенную номенклатуру наноматериалов и компонентов наносистемной техники.

Двухуровневая система подготовки по направлению "Нанотехнология", с учетом принятых на государственном уровне директивных решений, получила значительную поддержку в высших учебных заведениях России (к эксперименту подключилось более 20 вузов). В настоящее время подготовлены временные требования к минимуму содержания и уровню подготовки бакалавров и магистров по данному направлению, а также примерные учебные планы.

Существующие финансово-экономическое и кадровое обеспечения заставляют искать пути гармонизации образовательного процесса по направлению "Нанотехнология" в условиях подготовки специалистов (инженеров) и бакалавров. В то же время двухуровневая система подготовки позволяет осуществлять более целенаправленную ориентацию образовательного процесса в рамках специальных дисциплин с учетом проблемного поля направления подготовки, отраженного в магистерских программах.

Анализ возможных образовательных программ по направлению "Нанотехнология" при подготовке магистров, ориентированных на технические науки, позволил выделить следующие программы:

физика наносистем;
химия наносистем;
материаловедение наносистем;
процессы нанотехнологии;
методы нанодиагностики;
наноэлектроника;
нанооптика;
наномеханика;
микро- и наноэнергетика;
биомедицинские нанотехнологии.

Аннотации магистерских программ, представленные в работе [3], фактически характеризуют не только предметную область обучения, но и направления реальной научно-практической деятельности в указанных областях.

Важнейшими элементами обеспечения научно-образовательного процесса по данным программам являются имеющиеся или развивающиеся научно-педагогические школы и современная научно-технологическая база, которая должна концентрироваться в центрах коллективного пользования.

Заключение

Индустрия наносистем — интегрированный комплекс, включающий: оборудование; материалы; программные средства; систему знаний; технологическую, метрологическую, информационную, организационно-экономическую культуру и кадровый потенциал, которые обеспечивают производство наукоемкой продукции, основанной на использовании новых нетрадиционных свойств материалов и систем при переходе к наномасштабам.

Индустрия наносистем инициирует научно-технический прорыв в совокупности высокотехнологичных отраслей производства, науки, образования, военного дела и сферы обслуживания населения за счет широкого использования изделий с ранее недостижимыми массогабаритными, энергетическими показателями, технико-экономическими параметрами и функциональными возможностями.

Индустрия наносистем может быть отнесена к высокотехнологичным производствам с высокой добав-

ленной стоимостью, которые опираются в значительной степени на инвестиции в "человеческий капитал".

Список литературы

1. **Нанотехнология** в ближайшем десятилетии / Под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса и П. Аливисатоса. М.: Мир, 2002.
2. **Алферов Ж. И., Асеев А. Л., Гапонов С. В., Коптев П. С., Панов В. И., Полторацкий Э. А., Сибельдин Н. Н., Сурис Р. А.** Наноматериалы и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2003. № 8. С. 3—13.
3. **Лучинин В. В.** Наноиндустрия — базис новой экономики // Петербургский журнал электроники. 2003. № 3. С. 3—12.
4. **Лучинин В. В., Таиров Ю. М.** Научно-образовательный базис наноиндустрии в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2003. № 2. С. 15—20.
5. **Алфимов С. М., Быков В. А., Гребенников Е. П., Желудева С. И., Мальцев П. П., Петрунин В. Ф., Чаплыгин Ю. А.** Развитие в России работ в области нанотехнологий // Микросистемная техника. 2004. № 8. С. 2—8.
6. **Пул Ч., Оуэнс Ф.** Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2006. С. 317—323.
7. **Шевченко В. Я.** О терминологии: наночастицы, наносистемы, нанокомпозиты, нанотехнологии // Микросистемная техника. 2004. № 9. С. 2—4.

ОТ РЕДАКЦИИ

Статья Лучинина В. В. о классификации в области нанотехнологии, напечатанная в 2005 году в журнале "Нано- и микросистемная техника" (№ 5, с. 2—9) нашла широкий отклик среди читателей. Затем эта статья вошла приложением в книгу Ч. Пула-мл., Ф. Оуэнса "Нанотехнологии" (2-е доп. изд. М.: Техносфера, 2006. 336 с.) и в 2007 году переведена на немецкий язык и опубликована в журнале "Galvanotechnik" (№ 3, с. 742—749).

Учитывая актуальность проблемы развития нанотехнологии в наши дни по решению Президента РФ В. В. Путина в России создан государственный орган — Правительственный совет по нанотехнологиям под председательством первого вице-премьера С. Б. Иванова. И одна из задач редакционного совета, авторов научных публикаций — довести до сведения этого Совета научные и прикладные разработки в области наносистемной техники всех регионов Российской Федерации. Особое значение имеет Президентская инициатива "Стратегия развития наноиндустрии" (от 24 апреля 2007 г.), ориентированная на создание и закрепление научного приоритета Российской Федерации в области индустрии наносистем и наноматериалов.

Учитывая актуальность проблемы развития нанотехнологии и просьбы читателей, редакция журнала сочла возможным повторно опубликовать статью В. В. Лучинина.

УДК 681.586.5:621.395

А. А. Ветров, канд. техн. наук, **С. С. Комиссаров**,
А. В. Корляков, канд. физ.-мат. наук,
А. Н. Сергушичев*, канд. техн. наук
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет "ЛЭТИ"
Секция прикладных проблем
при Президиуме РАН, С.-Петербург

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ВИБРОДАТЧИК НА ОСНОВЕ МИКРООПТОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Рассмотрена схема построения волоконно-оптического вибродатчика, основанная на использовании микрооптомеханического струнного чувствительного элемента и волоконно-оптического интерференционного способа съема информации. Проведен теоретический анализ вибродатчика, описаны его конструкция и технология изготовления. Экспериментально получена пороговая чувствительность к ускорению $G_{\min} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ g}$ на частоте 3 кГц.

Введение

Регистрация слабых вибрационных сигналов различной природы была и остается достаточно актуальной задачей, поскольку сигналы вибраций обладают высокой информативностью. Вибродатчики необходимы для измерения малых колебаний грунта, фундаментов, инженерных сооружений (зданий, мостов, плотин, трубопроводов и других объектов). Они незаменимы в системах виброконтроля, диагностики и мониторинга различных машин и механизмов как источники наиболее полной диагностической информации.

При этом было и остается важным направление, связанное с уменьшением геометрических размеров первичных преобразователей при сохранении их высокой чувствительности. В этом отношении потенциальные преимущества по сравнению с традиционными вибродатчиками имеют устройства с первичными преобразователями, выполненными с использованием технологий микросистем.

В настоящее время на практике находят применение вибродатчики различных типов: емкостные, индукционные, резистивные, электромагнитные, пьезоэлектрические и др. [1]. Некоторые из них имеют высокую чувствительность и в то же время миниатюрные габаритные размеры и малую массу. Первичные преобразователи отдельных датчиков выполнены с применением современных технологий микросистемной техники [2].

Однако все отмеченные датчики предполагают преобразование входного воздействия в электриче-

ский сигнал непосредственно в первичном преобразователе, что требует подведения электрического питания и обеспечения необходимого усиления для передачи полезного электрического сигнала по проводным линиям к устройствам последующей регистрации и обработки. В связи с этим, такие датчики подвержены воздействию электромагнитных помех, что является существенным ограничивающим фактором, например, при вибродиагностике электрических машин, а также других механизмов и оборудования, находящихся в зоне воздействия сильных электромагнитных полей.

Для обеспечения помехоустойчивости вибродатчиков к воздействию электромагнитных помех необходимо создание микроразмерных первичных преобразователей и трассы передачи сигналов без применения металлических конструктивных элементов, а съем полезной информации с первичного преобразователя должен осуществляться без использования электрических сигналов. Такие датчики могут быть выполнены с использованием современных достижений в области волоконной оптики и микросистемной техники.

Целью данной работы является рассмотрение принципа действия волоконно-оптического вибродатчика с микрооптомеханическим первичным преобразователем, проведение расчетно-теоретической оценки основных параметров и разработка технологии изготовления микрооптомеханического преобразователя, а также экспериментальные исследования основных технических характеристик вибродатчика.

Принцип действия волоконно-оптического вибродатчика

Принцип действия оптического вибродатчика, обобщенная схема которого представлена на рис. 1, состоит в следующем. Измеряемое ускорение G воздействует на инерционную массу, подвешенную к корпусу первичного преобразователя с помощью упругих элементов, в результате чего происходит преобразование ускорения в соответствующее перемещение x инерционной массы относительно корпуса. В свою очередь, перемещение инерционной массы за счет отражения от нее подводимого оптического излучения преобразуется в изменение параметра

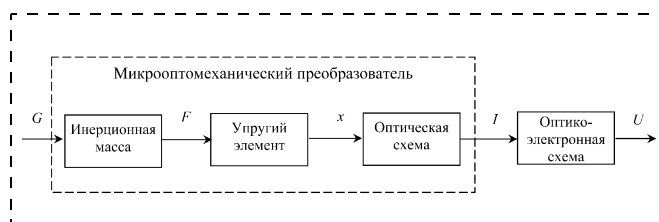


Рис. 1. Обобщенная схема оптического акселерометра

световой волны (амплитуды или фазы). Преобразование типа "ускорение — перемещение — параметр оптического излучения" должно происходить одновременно и требует конструктивного объединения микрооптических и микромеханических элементов. Такой преобразователь в дальнейшем будем называть микрооптомеханическим. Таким образом, на выходе микрооптомеханического преобразователя формируется оптическое излучение I , модулированное в соответствии с измеряемым ускорением, которое далее по оптоволоконному каналу доставляется к оптико-электронной схеме для преобразования в соответствующий выходной электрический сигнал U .

В рассматриваемом в данной работе волоконно-оптическом вибродатчике измерение перемещения инерционной массы в микрооптомеханическом преобразователе основано на использовании волоконно-оптического торцевого интерферометра, принцип действия которого поясняется структурной схемой, приведенной на рис. 2. Излучение лазерного диода 1 вводится в одномодовое оптическое волокно 2 и через волоконно-оптический ответвитель 3 передается на волокно 4, на конце которого конструктивно выполнен микрооптомеханический преобразователь 5. В этом преобразователе часть оптического излучения отражается от торца оптоволокна 4, а другая его часть высвечивается в воздух, отражается от поверхности инерционной массы 6 и возвращается обратно в оптоволокно 4.

В оптоволокне 4 излучение, отраженное от торца оптоволокна, интерферирует с излучением, отраженным от инерционной массы, в результате чего фотоприемник 7 регистрирует интенсивность излучения I , изменяющуюся в зависимости от расстояния x между торцом волокна и инерционной массой:

$$I = I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 I_2} \cos\left(4\pi \frac{x}{\lambda}\right),$$

где I_1 и I_2 — интенсивности излучения, отраженного от торца оптоволокна и возвращенного в волокно после отражения от инерционной массы соответственно; λ — длина волны излучения лазера.

Ток на выходе фотоприемника 7 пропорционален интенсивности регистрируемого оптического излучения I и имеет зависимость от перемещения инерционной массы, которая представлена на рис. 3.

Практическая реализация волоконно-оптического торцевого интерферометра на основе доступных промышленно выпускаемых элементов, приведенная на рис. 2, и экспериментальные исследования пока-

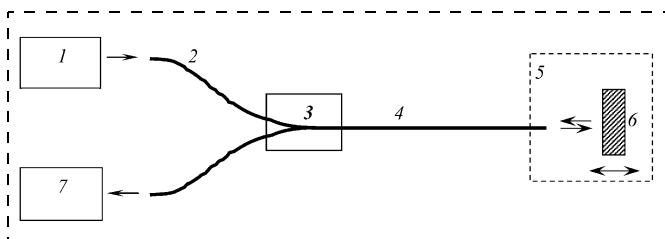


Рис. 2. Функциональная схема вибродатчика на основе волоконно-оптического торцевого интерферометра

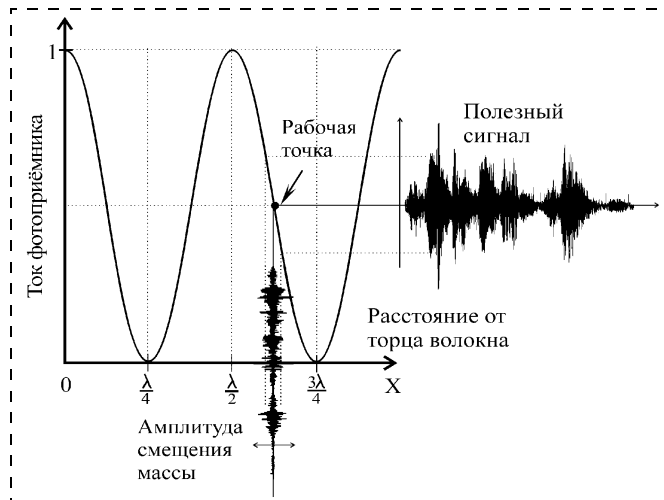


Рис. 3. Принцип действия вибродатчика на основе волоконно-оптического торцевого интерферометра

зали, что его чувствительность в режиме измерения перемещений инерционной массы в полосе частот до 10 кГц составляет порядка 10^{-2} нм [1—3].

Конструкция микрооптомеханического преобразователя

Основой микрооптомеханического преобразователя является подвижная инерционная масса, подвешенная к корпусу преобразователя с помощью упругих элементов. В результате воздействия на такую конструкцию ускорения должно происходить его преобразование в соответствующее перемещение инерционной массы относительно корпуса. При этом конструкция преобразователя должна учитывать большое число различных технических требований: высокая чувствительность, механическая прочность, воздушное демпфирование колебаний, технологические требования и т. д.

Для обеспечения высокой чувствительности может быть использована схема с консольным подвесом инерционной массы или симметричная схема с подвесом на двух и более балках. Однако такие схемы обладают существенной поперечной чувствительностью и невысокой прочностью. Сравнение конструкции первичного преобразователя, выполненной по симметричным схемам подвеса с использованием четырех и более упругих элементов, показало, что подвес на струнах с точки зрения соотношения между их прочностью и преобразованием действующего ускорения в перемещение инерционной массы предпочтительнее, чем подвес на балках.

Под термином "струна" в данном случае принимается протяженный упругий элемент, в котором деформации растяжения существенно превосходят деформации изгиба. Особенно это проявляется в тонких (менее 1 мкм) пленках с остаточными механическими напряжениями, возникающими при формировании этих пленок. Малая толщина и незначительная дефектность струн позволяют достигать высоких значений критических механических напряжений (до $2 \cdot 10^9$ Па).

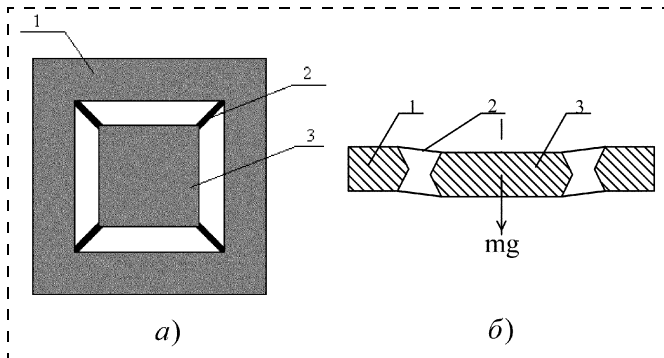


Рис. 4. Общий вид конструкции первичного преобразователя с подвесом инерционной массы на струнах:

а — топология первичного преобразователя; б — параллельное смещение инерционной массы под действием ускорения; 1 — жесткое основание; 2 — струна; 3 — инерционная масса

Струны и другие элементы конструкции преобразователя изготовлены стандартными методами микротехнологии объемного травления, при этом в качестве материала для струн применялись различные материалы (SiO_2 , Si_3N_4 , SiC) и их композиции. Это позволило задавать значение внутренних механических напряжений в струнах, которые, в свою очередь, определяют значения перемещения инерционной массы и прочность конструкции преобразователя.

Для минимизации поперечной чувствительности инерционная масса подвешена симметрично на струнах, сформированных на двух сторонах кремниевой пластины. Струны закреплены в углах инерционной массы, что обеспечивает технологичность их изготовления при анизотропном травлении подложки. Общий вид конструкции первичного преобразователя с подвесом инерционной массы на струнах представлен на рис. 4.

Расчет конструкции первичного преобразователя с подвесом инерционной массы на струнах

Для расчета конструктивных параметров и динамических характеристик первичного преобразователя с подвесом инерционной массы на струнах воспользуемся представлениями о деформации струны как упругого элемента. При этом будем считать, что на инерционную массу m действует сила mG (G — действующее ускорение), которая приводит к удлинению Δl струн за счет их растяжения (рис. 5).

В этом случае в каждой струне возникает сила натяжения

$$N = \sigma_{\Sigma} \cdot S, \quad (1)$$

где σ_{Σ} — суммарное внутреннее напряжение струны; $S = b \cdot h$ — площадь поперечного сечения струны; b и h — соответственно ее ширина и толщина. Дей-

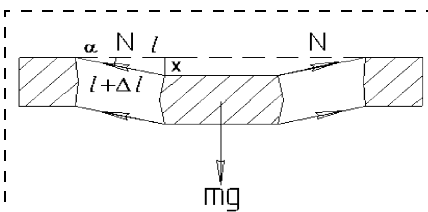


Рис. 5. Первичный преобразователь с подвесом инерционной массы на струнах

ствующая на инерционную массу сила mG определяется из уравнения

$$mG = nN \sin \alpha, \quad (2)$$

где n — число струн; α — угол, на который отклонилась струна относительно своего начального положения; N — сила натяжения каждой струны.

Внутреннее напряжение в поперечном сечении струны σ определяется различными факторами. В пределах малых удлинений справедлив закон Гука:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \quad (3)$$

где ε — относительная деформация струны; E — модуль Юнга для материала струны. Кроме того, в результате различных технологических операций в струнах возникают внутренние механические напряжения σ_0 , которые могут значительно превышать величину σ . В частности, экспериментально установлено, что для Si_3N_4 $\sigma_0 \approx 10^9$ Па.

С учетом этих замечаний, суммарное внутреннее напряжение, которое возникает в поперечном сечении струны, будет

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma + \sigma_0. \quad (4)$$

Из выражения для прямоугольного треугольника $l^2 + x^2 = (l + \Delta l)^2$, учитывая $\varepsilon = \Delta l / l$ и малые деформации Δl , получаем соотношение

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left(\frac{x}{l} \right)^2, \quad (5)$$

где l — длина струны; x — смещение инерционной массы.

Учитывая полученные выражения (1–5) и малые углы α ($\sin \alpha \approx x/l$), представим уравнение (2) в виде выражения

$$mG = n(\sigma_0 + \sigma)S \sin \alpha \approx n\sigma_0 b h \frac{x}{l} + nE \frac{b h}{2} \left(\frac{x}{l} \right)^3, \quad (6)$$

которое описывает связь между действующим ускорением G и перемещением x инерционной массы первичного преобразователя.

Оценочные расчеты по формуле (6) для конструктивных параметров первичного преобразователя, определяемых возможностями технологий микромеханики, показывают, что малые ускорения ($G \leq g$, где g — ускорение свободного падения) вызывают очень незначительные перемещения инерционной массы ($x^2/l^2 \ll \sigma_0/E$). В этом случае, пренебрегая вторым слагаемым в уравнении (6), перемещение инерционной массы под действием ускорения с хорошим приближением можно вычислять по формуле

$$x = \frac{mGl}{nhb\sigma_0}. \quad (7)$$

Следовательно, выполняется одно из важнейших требований, предъявляемых к устройству, — при малых значениях ускорения G сохраняется линейность его преобразования в перемещение инерционной массы.

Чувствительность такого микромеханического преобразователя определяется выражением

$$\text{Sens} = \frac{x}{G} = \frac{ml}{nhb\sigma_0}. \quad (8)$$

Резонансная частота собственных колебаний инерционной массы преобразователя рассчитывается по формуле

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{G}{x}}, \quad (9)$$

или, с учетом соотношения (8)

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{nh_2 b \sigma_0}{ml}}. \quad (10)$$

Таким образом, подбирая параметры системы (ширину, высоту и длину струны, инерционную массу, число струн и начальное внутреннее напряжение струны), можно задать необходимую резонансную частоту и чувствительность.

Для обеспечения работоспособности вибродатчика перемещение x инерционной массы, обусловленное измеряемым ускорением, должно превышать чувствительность $\Delta x_{\text{опт}}$ оптико-электронной схемы к перемещению, т. е. $x \geq \Delta x_{\text{опт}}$. Тогда с учетом соотношения (7) минимальное значение измеряемого ускорения

$$G_{\min} \geq \frac{nhb\sigma_0}{ml} \Delta x_{\text{опт}}. \quad (11)$$

Оценим основные характеристики первичного микрооптомеханического преобразователя со следующими параметрами:

габаритные размеры первичного преобразователя	5 × 5 × 0,4 мм
инерционная масса	3,5 мг
размеры инерционной массы	2 × 2 мм
число струн	8
длина струны	500 мкм
ширина струны	200 мкм
толщина струны	0,4 мкм

Для этих параметров чувствительность первичного преобразователя, рассчитанная по формуле (8), будет равна ~ 30 нм/г, а основная резонансная частота в соответствии с (10) будет составлять ~ 3 кГц. В этом случае для чувствительности оптико-электронной схемы $\Delta x_{\text{опт}} \approx 10^{-2}$ нм минимальное значение измеряемого ускорения в соответствии с соотношением (11) составит $G_{\min} \approx 3 \cdot 10^{-4}$ г.

Технология изготовления первичного преобразователя

Последовательность основных технологических операций изготовления струнного первичного преобразователя приведена на рис. 6. В качестве исходной структуры для создания однокоординатных первичных преобразователей использован кремний в виде стандартных пластин диаметром 76 мм ориентацией (100).

Фотографии изготовленных струнных преобразователей и их элементов представлены на рис. 7.

Для защиты механической системы от перегрузок и случайных ударных воздействий были разработаны специальные "крышки", выполненные из кремния, которые ограничивают свободное переме-

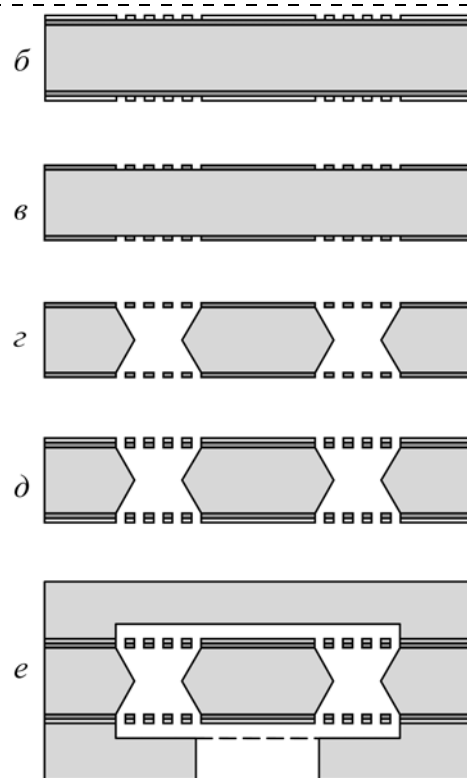


Рис. 6. Основные технологические операции изготовления струнного первичного преобразователя:

а — нанесение слоя Si_3N_4 с двух сторон пластины; б — двухсторонняя фотолитография; в — плазмохимическое травление Si_3N_4 ; г — двухстороннее анизотропное травление Si подложки; д — нанесение отражающего металлического слоя; е — сборка чувствительного элемента струнного акселерометра

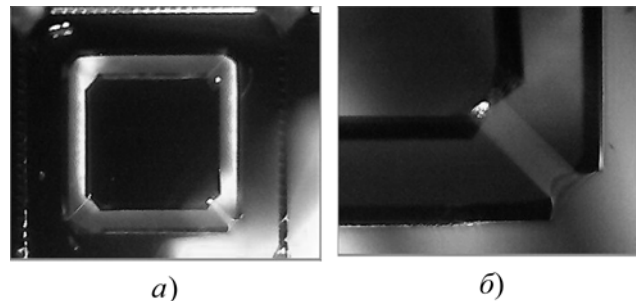


Рис. 7. Фотографии струнного первичного преобразователя (а) и его струны (б)

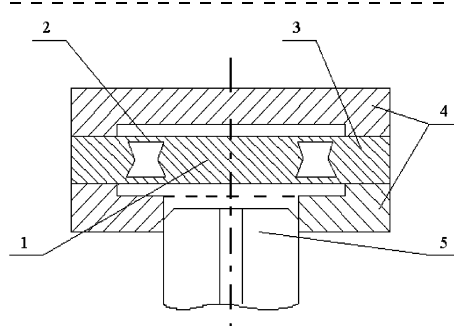


Рис. 8. Общий вид конструкции микрооптомеханического преобразователя:

1 — инерционная масса; 2 — упругие элементы; 3 — неподвижная рамка; 4 — крышки; 5 — капилляр с оптоволоком

шение инерционной массы. В нижней крышке сформировано отверстие для закрепления торца оптического волокна. Общий вид конструкции микрооптомеханического преобразователя вместе с крышками и подведенным к нему оптоволоком, представлен на рис. 8.

Экспериментальные результаты

Измерение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) чувствительности волоконно-оптических вибродатчиков проводилось с использованием экспериментальной установки, структурная схема которой представлена на рис. 9.

Низкочастотный генератор 1 вырабатывает переменный сигнал типа "белый шум", который через усилитель 2 поступает на вибростенд 3, воздействующий на измерительный и испытуемый вибродатчики с определенным ускорением в рабочем частотном диапазоне 250 Гц — 8 кГц. На рабочей поверхности вибростенда жестко закреплены микрооптомеханический первичный преобразователь 4 испытуемого волоконно-оптического вибродатчика и измерительный вибродатчик 5 (типа ADXL105AQC), предназначенный для определения ускорений, создаваемых вибростендом. Оптико-электронный модуль 6 испытуемого вибродатчика обеспечивает съем информации с микрооптомеханического первичного преобразователя с использованием оптоволокну. В качестве регистрирующей аппаратуры используется анализатор спектра 7 (типа CF-350), обеспечивающий одновременное измерение по двум каналам сигналов с вибродатчиков в третьоктавных полосах, входящих в номинальный диапазон частот испытуемого волоконно-оптического вибродатчика, с центральными частотами третьоктавного ряда.

Вначале при отсутствии вибраций рабочей поверхности вибростенда проводилось измерение АЧХ собственных шумов волоконно-оптического вибродатчика. Затем определялась АЧХ его чувствительности, для чего на вибростенд подавался "белый шум". Чувствительность (B/g) испытуемого вибродатчика определялась отношением его сигнала (B) к воздействию ускорению (g) в каждой третьоктавной полосе частот. Абсолютное значение создаваемого вибростендом ускорения в каждой третьоктавной полосе определялось отношением сигнала измерительного вибродатчика (B) к его номинальной чувствительности, известной из паспортных данных ($1,28 B/g$). Значение минимально измеряемого ускорения g , обусловленная собственным шумом волоконно-оптического вибродатчика, определялась путем вычисления отношения измеренных значений его собственных шумов (B) к его чувствительности (B/g) в каждой третьоктавной полосе.

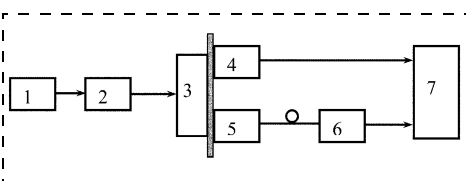


Рис. 9. Установка для измерений амплитудно-частотной характеристики чувствительности вибродатчиков

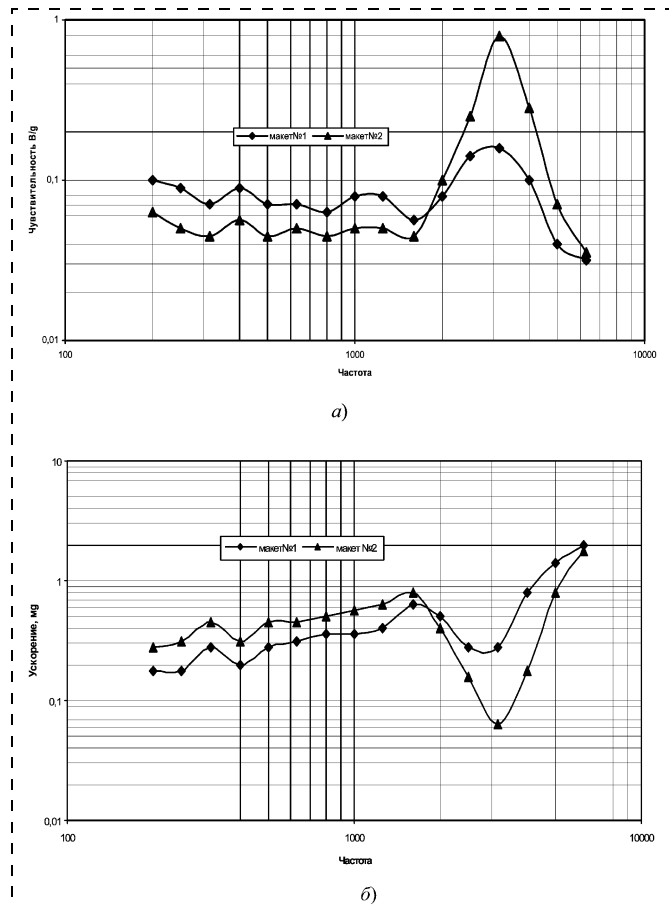


Рис. 10. Амплитудно-частотная характеристика чувствительности волоконно-оптического вибродатчика с микрооптомеханическим первичным преобразователем (а) и минимально измеряемое ускорение, обусловленное его собственным шумом (б)

Полученные экспериментальные данные измерений АЧХ чувствительности (B/g) волоконно-оптического вибродатчика и минимально измеряемого ускорения ($mg = 10^{-3} g$), обусловленного его собственным шумом, представлены на рис. 10. Их анализ показывает достаточно хорошее соответствие результатам теоретических расчетов ($G_{\min} \approx 3 \cdot 10^{-4} g$ и $f \approx 3$ кГц), что свидетельствует об адекватности принятой расчетной модели микрооптомеханического преобразователя и правильности выбранной технологии его изготовления.

Заключение

Экспериментальные исследования изготовленного волоконно-оптического вибродатчика с микрооптомеханическим первичным преобразователем показали его уверенную работоспособность и высокую чувствительность. Значения минимально измеряемого ускорения вибродатчика с первичным преобразователем размером $5 \times 5 \times 1,5$ мм составили менее $10^{-3} g$ в полосе частот до 5 кГц.

Полученные расчетно-теоретические и экспериментальные результаты подтверждают перспективность направления разработок волоконно-оптических вибродатчиков с микрооптомеханическими первичными преобразователями, поскольку его дальнейшее развитие может обеспечить создание высокочувстви-

тельных вибродатчиков при существенном уменьшении массы и габаритных размеров первичных преобразователей по сравнению с другими аналогами.

Кроме того, первичные преобразователи и волоконно-оптический канал съема информации в таких датчиках не подвержены влиянию электромагнитных излучений, что расширяет области их возможного использования.

Список литературы

1. **Фрайден Дж.** Современные датчики: Справочник. М.: Техносфера, 2005.

2. **Ветров А. А., Комиссаров С. С., Лучинин В. В., Сергушичев А. Н.** Волоконно-оптическая сенсорная система. Патент РФ № 2279112 G02F 1/00, G01B 9/00, 2006.

3. **Ветров А. А., Комиссаров С. С., Сергушичев А. Н.** Малогабаритный унифицированный интегрированный модуль "излучатель — оптоэлектронный преобразователь" для оптических интерференционных датчиков / Тез. док. Междунар. науч.-техн. конф. "Датчики и системы — 2005". Пенза, 6—10 июня 2005 г.

4. **Ветров А. А.** и др. Волоконно-оптический микроинтерферометр как основа построения высокочувствительных сенсоров // Тез. док. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. "Квантовая электроника—2006". Минск, 14—17 ноября 2006 г.

УДК 621.383.524:621.384.4

А. В. Афанасьев, канд. техн. наук,
В. А. Ильин, канд. физ.-мат. наук
Центр микротехнологии и диагностики
Санкт-Петербургского государственного
электротехнического университета "ЛЭТИ",

ФОТОДИОДНЫЕ И МДП-СЕНСОРЫ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО И ПОРИСТОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

Представлены варианты фотоприемников УФ-излучения на основе монокристаллического и пористого SiC, которые могут быть использованы в сенсорных микросистемах. Показано, что за счет использования фототранзисторного эффекта в МДП-структурах и применения пористых слоев SiC в фотодиодах эффективность фотопреобразования возрастает.

ВВЕДЕНИЕ

Высокий практический интерес к оптоэлектронным приборам ультрафиолетового диапазона, который проявлялся на протяжении многих десятилетий, к началу двадцать первого века сформировал направление "ультрафиолетовая фотоэлектроника" [1]. Причиной этому послужила острая необходимость в приборах данного класса для решения ряда прикладных задач в таких областях как медицина, экология, астрономия, а также ряд военных и аэрокосмических приложений. Поэтому в настоящее время активно развиваются технология и исследования полупроводниковых фотопреобразователей для ультрафиолетовой (УФ) области спектра.

Основными полупроводниковыми материалами для изготовления фотодетекторов являются кремний, фосфид галлия, нитриды алюминия и галлия и их твердые растворы, оксид цинка, карбид кремния, алмаз [2]. Очевидно, что фотоприемные устройства для УФ области спектра должны иметь малые темновые токи, высокие чувствительность и быстродей-

ствие, а также стабильность эксплуатационных параметров. Спектральная чувствительность таких фотодетекторов определяется многими факторами, главный их которых — ширина запрещенной зоны используемого полупроводника [3]. С этой точки зрения наиболее перспективны материалы с широкой запрещенной зоны более 3 эВ. Применение широкозонных полупроводников дает уникальную возможность детектирования УФ излучения на фоне интенсивного видимого и инфракрасного излучений. В настоящее время базовыми материалами УФ фотометрии являются карбид кремния, нитриды галлия, алюминия и их твердые растворы. На их основе разработаны и доступны на рынке изделий оптоэлектроники фотоприемники, работающие в диапазоне длин волн 180...400 нм. Несмотря на то, что на данный момент времени приоритетные позиции ультрафиолетовой фотоэлектроники занимают приборы на основе GaN, AlN—GaN, карбидокремниевые фотоприемные устройства имеют свою устойчивую нишу в этой области. Так SiC-фотодетекторы находят свое применение в следующих областях:

- высокотемпературная фотоэлектроника;
- контроль излучения мощных УФ эксимерных лазеров, УФ ламп и других источников (известно, что фотодетекторы на основе SiC и алмаза наиболее стабильны к длительной засветке УФ излучением);
- регистрация бактерицидного УФ излучения [1];
- контроль возгорания, детекторы пламени, датчики электрической искры.

Применение наноструктурированных полупроводниковых материалов для изготовления сенсоров оптического излучения является весьма перспективным направлением развития сенсорных фоточувствительных микросистем. К настоящему времени ведущими научными центрами продемонстрированы образцы высокочувствительных фотодетекторов видимого и ближнего инфракрасного диапазонов на основе пористого кремния, сформированного путем электрохимической обработки, и нанослоевых гетерокомпозиций на основе соединений $A^{III}B^V$, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии, которые по своим характеристикам существенно

превосходят аналоги, выполненные на монокристаллических полупроводниках. Поэтому особый интерес представляет рассмотрение возможности использования наноструктурированных полупроводниковых материалов в приборах УФ фотометрии и сравнение их характеристик с аналогами, выполненными на традиционных материалах.

В данной статье представлены результаты работ, являющихся продолжением исследований фотоприемных структур УФ диапазона [2]. Объектами анализа были выбраны фотодиоды и МДП-структуры на основе монокристаллического SiC и на основе пористых слоев карбида кремния, полученных путем модифицирования монокристаллической подложки карбида кремния методом электрохимической обработки [4].

Фотоприемники на основе монокристаллического карбида кремния

Фотоприемные структуры на основе монокристаллического SiC были выполнены в двух вариантах: диод с барьером Шоттки и МДП-структура с туннельно-прозрачным оксидом (рис. 1, а, б). С целью повышения эффективности фотопреобразования был реализован вариант фотодетектора с сетчатым полупрозрачным золотым электродом толщиной 15 нм (рис. 1, в). Оба типа фотоприемных структур были изготовлены на эпитаксиальных $n-n^+$ структурах (SiC-6H, Cree Inc). Уровень легирования n -слоев составлял $10^{16} \dots 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Фотоприемники с барьером Шоттки характеризовались высотой потенциального барьера 1,63...1,65 эВ. Обратные темновые токи при напряжении 1 В не превышали значения 10^{-12} А. Для МДП-структур при приложении напряжения, соответствующего режиму обеднения (при значениях U до 10 В), значения токов утечки были не более 10^{-13} А. Полученные образцы имели фоточувствительность в диапазоне 200...420 нм (рис. 2).

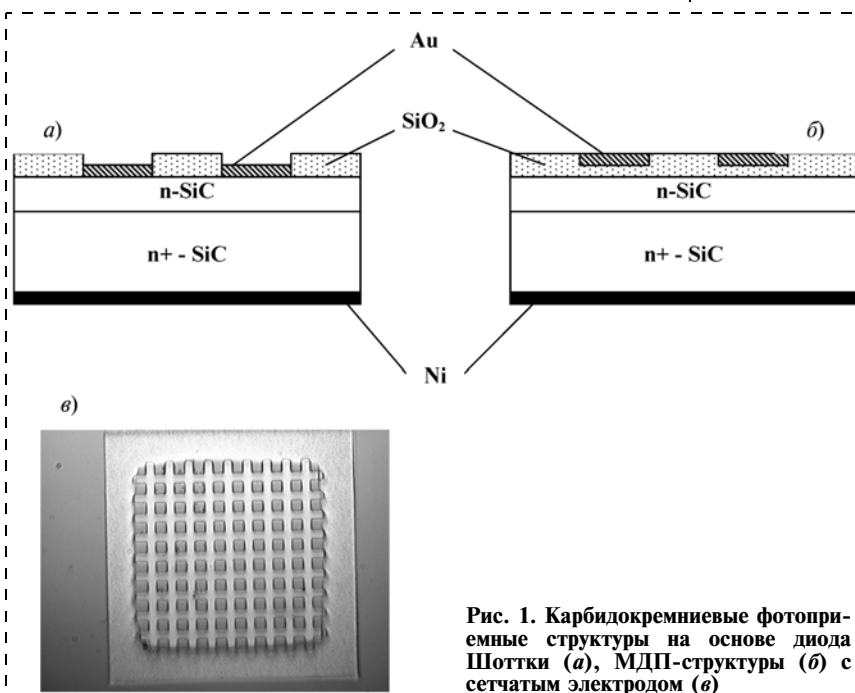


Рис. 1. Карбидкремниевые фотоприемные структуры на основе диода Шоттки (а), МДП-структуры (б) с сетчатым электродом (в)

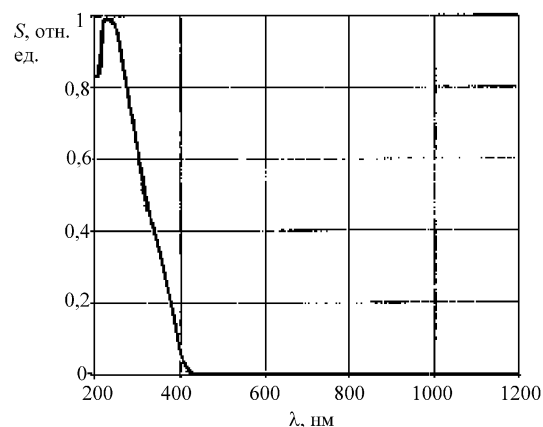


Рис.2. Спектральная характеристика фотоприемных структур на основе карбидкремниевых диода Шоттки и МДП-структур

Следует отметить, что измерения спектральных характеристик диодов с барьером Шоттки проведены в режиме короткого замыкания, а для МДП-фотоприемных структур — при напряжении смещения 5 В, поскольку в режиме короткого замыкания протекание фототока зарегистрировано не было. На рис. 3 представлены обратные ветви вольт-амперных характеристик в отсутствии освещения и при УФ засветке (длина волны 254 нм) для фотоприемников на основе диодов Шоттки и МДП-структур. Из рисунка видно, что фототок насыщения в МДП-структурах (в данном случае при напряжении смещения более 4 В) в 2...5 раз выше фототока диодов Шоттки. Данный факт говорит о возможности повышения эффективности фотопреобразования за счет фототранзисторного эффекта [5].

Фотоприемники УФ излучения на основе пористого карбида кремния

Рост научного и практического интереса к пористым полупроводниковым материалам приводит к тому, что опыт, накопленный при формировании приборных структур на основе пористого кремния, переносится на другие материалы, в том числе, на карбид кремния.

Пористый карбид кремния (ПКК), как и пористый кремний (ПК) привлекателен в микроэлектронике для создания оптоэлектронных приборов, таких как эффективные фотоприемники УФ диапазона [6], светоизлучающие диоды и лазеры на основе гетерокомпозиций "карбид кремния — нитрид алюминия". Интенсивность фото- и электролюминесценции на ПКК в десятки раз выше по сравнению с объемным материалом практически в том же спектральном диапазоне. Данное обстоятельство свидетельствует о незначительной трансформации зонной структуры кристаллитов ПКК. Проводя аналогию с фотоприемниками на основе ПК [7], можно предположить, что применение порис-

того карбида повысит эффективность фотопреобразования. Однако к настоящему времени информация об использовании ПКК в фотоприемниках УФ излучения практически отсутствует.

Технология изготовления ПКК аналогична технологии получения пористого кремния. Наиболее часто применяется метод анодирования пластин в электролитах, содержащих плавиковую кислоту. В зависимости от плотности протекающего тока возможно получение слоев с различной степенью пористости — от нанопористого до микропористого материала [8]. С целью формирования тонких пористых карбидокремниевых слоев был предложен режим кратковременной электрохимической обработки в 2 %-ном растворе HF. На рис. 4 представлено изображение разреза приповерхностной области SiC пластины, полученное на установке *Strata FIB205*, из которого видно, что в результате такой электрохимической обработки формируется слой пористого карбида кремния толщиной $d \approx 230...250$ нм.

Исследования проводились на структурах $n-n^+SiC$ (6H) (*Cree Inc*). Концентрация некомпенсированных доноров в эпитаксиальных слоях составляла $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Часть пластины была анодирована в электролите. При этом анодированная область пластины приобрела светло-серый оттенок, что явилось косвенным подтверждением образования слоя пористого карбида кремния. Далее по технологии, описанной в работе [4], были изготовлены образцы фотоприемников со сплошным полупрозрачным золотым электродом толщиной 15 нм (рис. 5).

Фотоэлектрические свойства образцов исследовались в спектральном диапазоне 200...1200 нм. Фотоприемники на основе ПКК имели чувствительность в диапазоне 200...430 нм. Следует отметить, что для этих образцов край поглощения смещен в длинноволновую область по сравнению с фотодетекторами Au—SiC, где край фоточувствительности находился при 420 нм. Подобные результаты были получены на свободных пленках ПКК толщиной около 150 мкм. По-видимому, существует влияние пористого слоя на спектральную характеристику даже при такой небольшой его протяженности.

Токовая чувствительность (S_I) на длине волны 254 нм, определенная в режиме короткого замыкания, для образцов с ПКК составляла 45...55 мА/Вт и превышала более чем в 1,5 раза значения чувствительности для структур на основе Au—SiC, где $S_I = 27...32$ мА/Вт. Отмеченные различия вероятно связаны с формированием в процессе анодирования микрорельефа на поверхности, что позволяет повысить S_I фотоприемника. Подтверждением этому предположению могут служить результаты исследования морфологии поверхности фотоприемных площадок, полученные методом атомно-силовой микроскопии. Как видно из рис. 5, при анодировании образуется развитая поверхность с характерным рельефом 60...80 нм (рис. 5, в), в

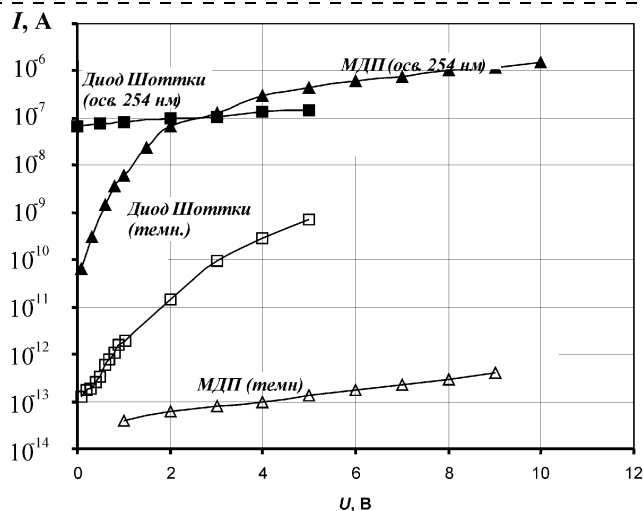


Рис. 3. Обратные ветви вольтамперных характеристик в отсутствии освещения и при УФ-засветке (длина волны 254 нм) для фотоприемников на основе диодов Шоттки и МДП-структур

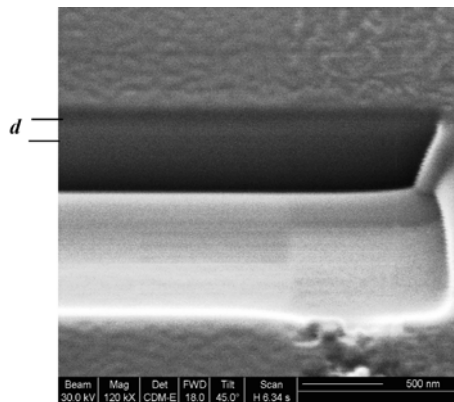


Рис. 4. Разрез приповерхностной области SiC-пластины после электрохимической обработки (толщина пористого слоя $d \approx 230...250$ нм)

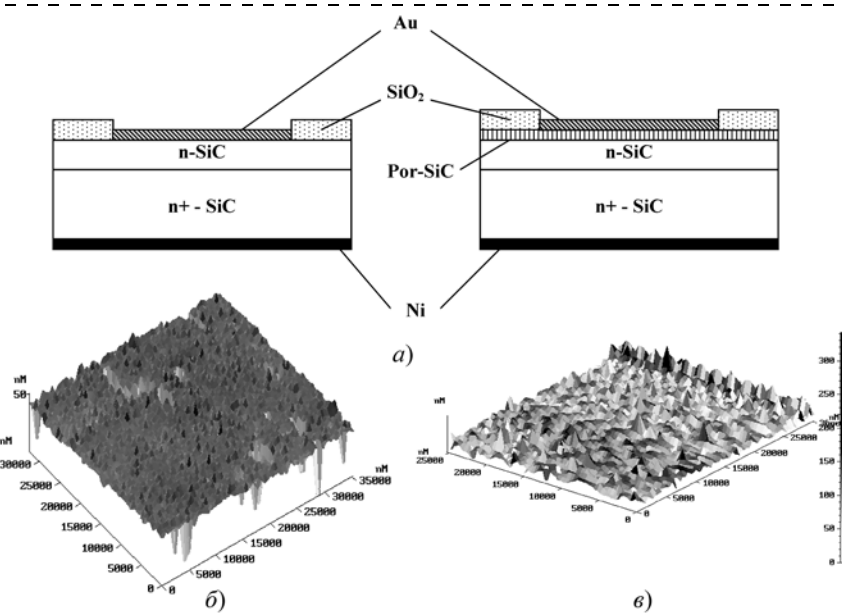


Рис. 5. Структуры фоточувствительных элементов на основе SiC и ПКК (а), а также морфология поверхности фотоприемных площадок Au—SiC (б) и Au—ПКК (в)

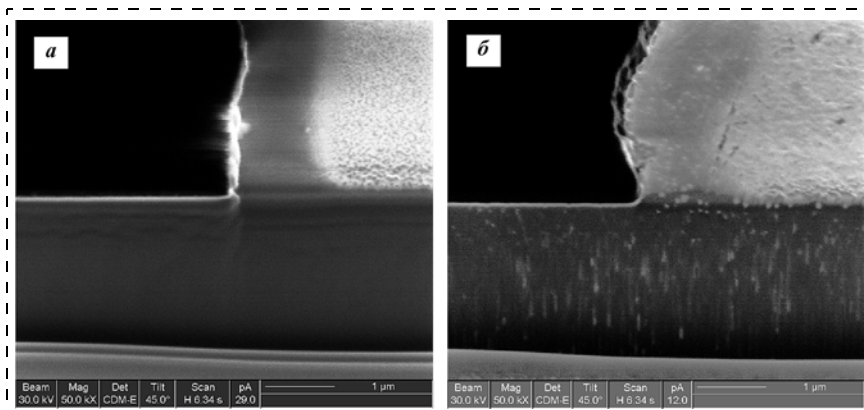


Рис. 6. Разрезы приповерхностных областей образцов фотодетекторов на основе структур Al—SiC (а) и Al—ПКК (б)

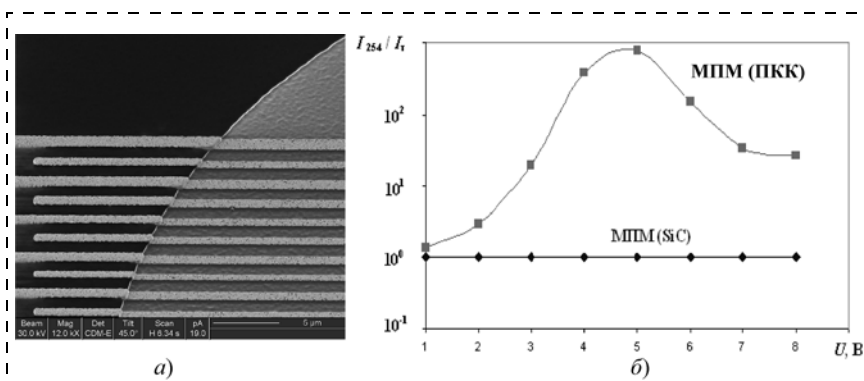


Рис. 7. Фрагмент МПМ-фотоприемника (а). Отношение тока при УФ-засветке (длина волны 254 нм) к темновому току для МПМ структур на основе SiC и ПКК (б)

то время как рельеф поверхности фотоприемной площадки структуры для Au—SiC — 6...8 нм (рис. 5, б). Вследствие этого происходит увеличение эффективной площади фотоприемной области, а также снижаются потери на отражение, что приводит к повышению эффективности фотопреобразования.

Для формирования композиции ПКК — карбид кремния с протяженностью пористого слоя более 1 мкм было увеличено время анодирования. При этом основные параметры процесса (состав электролита и плотность тока) были идентичны предыдущему процессу. В данной серии экспериментов использовались пластины 4Н—SiC, изготовленные в СПБГЭТУ "ЛЭТИ". Как видно из рис. 6, в результате электрохимической обработки сформировался пористый слой протяженностью 1,5...2 мкм.

Изготовлены планарные фотоприемные структуры (рис. 7, а) "металл — полупроводник — металл" (МПМ), представляющие собой встречно включенные диоды Шоттки, где в качестве электродов был использован алюминий. Следует отметить, что в данном эксперименте межэлектродное расстояние было выбрано заведомо большим, чем диффузионная длина носителя заряда λ в исходном карбиде кремния (при концентрации некомпенсированных доноров 10^{18} см^{-3} — λ менее 1 мкм). Поэтому фоточувствительность образцов на основе монокристаллического карбида кремния практически отсут-

ствовала (рис. 7, б). В то же время фотоприемные структуры на основе нанопористого SiC обладали чувствительностью к УФ излучению. Так, при напряжении смещения 5 В отношение тока при УФ засветке на длине волны 254 нм к темновому току составляло 10^3 (рис. 7, б).

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Впервые экспериментально показана возможность создания фотоприемных устройств УФ диапазона на основе пористого карбида кремния.

2. Предложен вариант повышения эффективности SiC-фотоприемников УФ излучения путем кратковременного анодирования подложки с образованием тонкого пористого слоя. Данный метод получения развитой поверхности карбида кремния по-видимому является единственным, так как химическое травление карбида кремния в отличие от кремния и соединений А^{III}В^V практически невозможно.

3. Относительно простой способ модификации приповерхностной области карбида кремния позволяет упростить технологию изготовления УФ сенсоров, не используя дорогостоящие эпитаксиальные структуры.

Список литературы

- Бланк Т. В., Гольдберг Ю. А. Полупроводниковые фотоэлектропреобразователи для ультрафиолетовой области спектра // ФТП. 2003. Т. 37. № 9. С. 1025—1054.
- Корляков А. В., Лучинин В. В., Четвергов М. В. Датчики "жесткого" ультрафиолетового излучения на основе широкозонных материалов // Микросистемная техника. 2000. № 2. С. 9—15.
- Полупроводниковые фотоприемники: ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра / И. Д. Анисимова, И. М. Викулин, Ф. А. Заитов, Ш. Д. Курмашев; Под ред. В. И. Стафеева. М.: Радио и связь, 1984. 216 с.
- Афанасьев А. В., Ильин В. А., Коровкина Н. М. и др. Особенности технологии и свойств фотодетекторов на основе структур "металл—пористый карбид кремния" // ПЖТФ. 2005. Т. 31. № 15. С. 1—6.
- Грехов И. В., Векслер М. И., Иванов П. А. и др. Эффект усиления фототока в МОП-структурах Au/SiO₂/n—6H—SiC с туннельно-тонким диэлектриком // ФТП. 1998. Т. 32. № 9. С. 1145—1148.
- Shor J. S., Kurtz A. D. Porous silicon carbide (SiC) semiconductor devices // US patent 5.569.932 from 29.10.1996.
- Беляков Л. В., Горячев Д. Н., Срессели О. М. Фотоотчет и электролюминесценция структур "кремний — пористый кремний — химически осажденный металл" // ФТП. 2000. Т. 34. № 11. С. 1386—1390.
- Афанасьев А. В., Ильин В. А., Петров А. А. и др. Поверхностно-барьерные структуры на основе пористого карбида кремния для УФ-фотометрии // Тез. док. IV Междунар. науч. конф. "Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии" (Кисловодск, 19—24 сентября 2004 г.). Кисловодск; Ставрополь: Изд-во СевКавГТУ, 2004. С. 254.

А. В. Корляков, канд. физ.-мат. наук,
 Центр микротехнологии и диагностики
 Санкт-Петербургского государственного
 электротехнического университета "ЛЭТИ"

СВЕРХТОНКИЕ МЕМБРАНЫ В МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ

Сверхтонкие мембраны различной формы являются основой многих высокочувствительных преобразователей, работающих на разных физических эффектах. При их разработке и проектировании необходимо учитывать не только остаточные механические напряжения, но и размерные эффекты, связанные с влиянием параметров окружающей воздушной среды на механические, акустические, тепловые характеристики сверхтонких мембран. Разработанные конструкции топологически модифицированных мембран эффективны для обеспечения заданных параметров мембранных преобразователей.

Введение

Сверхтонкие микроразмерные мембраны являются основой многих высокочувствительных микро-механических, микротеплофизических преобразователей, активных, управляемых микроустройств и сложных аналитических микросистем. Физико-механические свойства таких мембран в сильной степени зависят от их состава, структуры, свойств поверхности и технологии изготовления. Проектирование различных преобразователей на основе сверхтонких мембран требует учета размерных факторов, а их изготовление предполагает использование специальных технологических операций.

Материалы и композиции для мембран

Важнейшими критериями при выборе материалов для реализации конструкций мембранных преобразователей являются, кроме необходимых механических свойств, технологичность и эффективность работы в композиции с другими конструкционными материалами.

При создании приборов микросистемной техники часто используют мембраны и композиции на основе различных материалов:

- Si — мембрана, образованная травлением материала подложки до тонкого (2—5 мкм), высоколегированного слоя;
- SiO_2 , Si_3N_4 , SiC, C, AlN, BN, полученные как из газовой фазы, так и ионно-химическими методами осаждения;
- композиции материалов в различных сочетаниях в целях получения заданных свойств.

В качестве базового материала сверхтонких мембран часто используют нитрид кремния (Si_3N_4) — один из основных материалов микроэлектроники с хорошо отработанной технологией получения и известными свойствами. Пленки нитрида кремния обычно получают амонизацией силана в атмосфере аммиака при температурах около 850 °С. Важнейши-

ми качествами данного материала, определяющими его применение в мембранных технологиях, является механическая и химическая устойчивость, низкая пористость. Это позволяет формировать на его основе сверхтонкие, в том числе наноразмерные, пленки.

Карбид кремния (SiC) — высокотемпературный полупроводниковый материал с сильной ковалентной связью также характеризуется низкой скоростью окисления даже при высоких температурах и высокой химической стойкостью в кислотах и щелочах. Карбид кремния обладает высокой механической прочностью (близкой к алмазу), высокой радиационной стойкостью и теплопроводностью. Пленки карбида кремния получены методом магнетронного распыления в атмосфере аргона при температуре подложки 600—900 °С.

Пленки нитрида алюминия (AlN) и нитрида бора (BN) получают методом реактивного ВЧ магнетронного распыления в атмосфере азота и аргона при температурах подложки 500 °С. Пленки алмазоподобного углерода (C) синтезировали ионным разложением ароматических углеводородов. Вариации физико-химических свойств пленок определялись изменением технологических параметров синтеза: температуры подложки, скорости газового потока, соотношения компонентов и скорости осаждения.

Технология формирования сверхтонких мембран

Мембраны могут быть изготовлены по технологии объемной и поверхностной микромеханики (рис. 1, 2) в зависимости от конструкции мембранных преобразователей.

Качество исполнения механической части преобразователя во многом определяет его основные метрологические параметры:

- чувствительность к полезному сигналу;
- селективность по отношению к паразитным воздействиям;
- линейность преобразования в заданном диапазоне.

Точность исполнения механической части определяет воспроизводимость требуемых номинальных значений параметров. Основные требования, предъявляемые к процессу формирования механической части преобразователя:

- гладкость поверхности или равномерная шероховатость дна мембраны (балок);

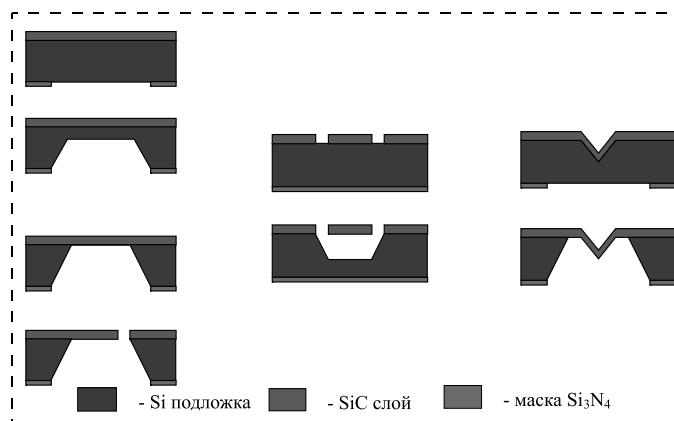


Рис. 1. Варианты изготовления мембран на основе SiC в технологии объемной микромеханики

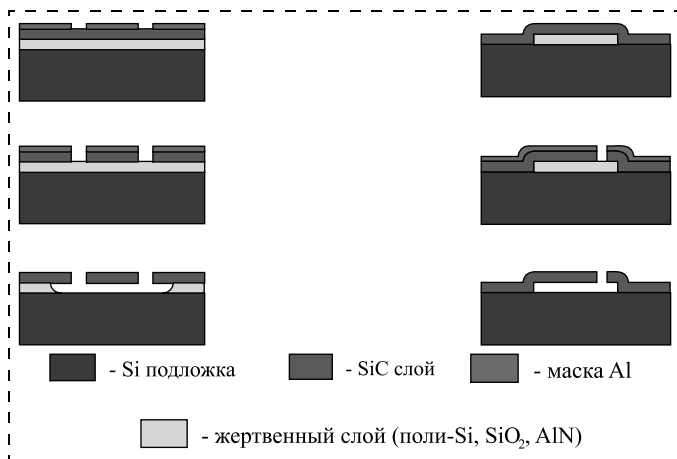


Рис. 2. Варианты изготовления мембран на основе SiC в технологии поверхностной микромеханики

- равномерность, равнотолщинность элементов (балок);
- воспроизводимость форм и размеров элементов;
- возможность контроля процесса и его окончания.

Мембранные преобразователи с толщинами мембран менее микрометра, как правило, предназначены для измерения низких уровней механических воздействий.

Композиционные мембраны формировали с помощью жидкостного анизотропного травления кремниевой подложки до поверхности пленки, предварительно нанесенной на подложку. При этом пленки играли роль "стоп-слоя". В качестве базовых мембран были использованы мембраны на основе Si_3N_4 . Пленки, менее устойчивые к травителям, осаждались на поверхности уже готовых мембран. Таким образом были сформированы композиции пленок $\text{SiC}/\text{Si}_3\text{N}_4$, $\text{AlN}/\text{Si}_3\text{N}_4$, $\text{BN}/\text{Si}_3\text{N}_4$ и $\text{C}/\text{Si}_3\text{N}_4$ в виде многослойных мембран с различными толщинами составляющих их слоев [1].

Технология формирования композиционной мембранной структуры $\text{SiC}/\text{Si}_3\text{N}_4$ включает следующие основные этапы:

- формирование композиционной пленки оксида кремния (SiO_2) толщиной до 100 нм и нитрида кремния (Si_3N_4) толщиной до 250 нм с двух сторон пластины Si (рис. 3, а);
- нанесение слоя карбида кремния (SiC) необходимой толщины на лицевую сторону подложки (рис. 3, б);
- фотолитографию на обратной стороне пластины для формирования рисунка маски мембраны (рис. 3, в);

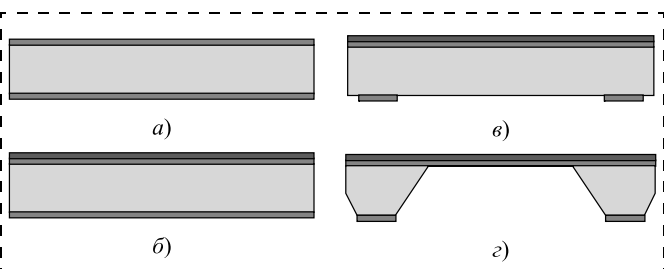


Рис. 3. Последовательность технологических операций при формировании композиционных $\text{SiC}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ мембран

- жидкостное анизотропное травление кремния в растворе KOH с обратной стороны пластины до слоя $\text{SiC}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ (рис. 3, г).

Пленки, устойчивые к щелочным травителям, могут служить в качестве "стоп-слоя" при анизотропном травлении Si. В то же время пленки, устойчивые к плазмохимическому процессу (AlN), работают как "стоп-слой" при данном "сухом" методе формирования мембран.

Как показывает практика, основным параметром, определяющим не только механические характеристики мембран, но и качество исполнения механического элемента преобразователя, являются остаточные механические напряжения в пленке (рис. 4).

При положительных значениях (растягивающих) внутренних остаточных напряжений в пленке мембрана формируется плоской (рис. 5), сохраняя исходные механические напряжения пленки, но при отрицательных значениях (стягивающих) внутренних механических напряжений "релаксирует" с образованием объемной самоформирующейся структуры (рис. 6), как правило, не пригодной к использованию.

Причины возникновения остаточных механических напряжений в пленках:

- рассогласование параметров кристаллической решетки при эпитаксии;

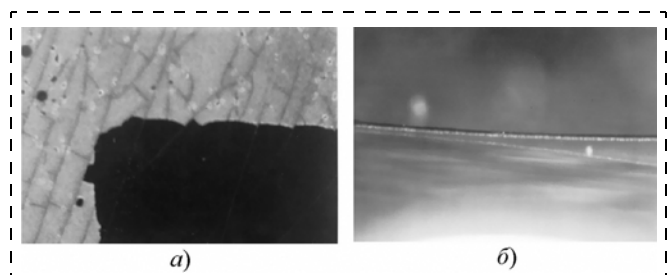


Рис. 4. Дефекты при формировании мембран:

а — растрескивание пленки AlN при значительных механических напряжениях; б — изгиб SiC мембраны при внутренних механических напряжениях в пленке

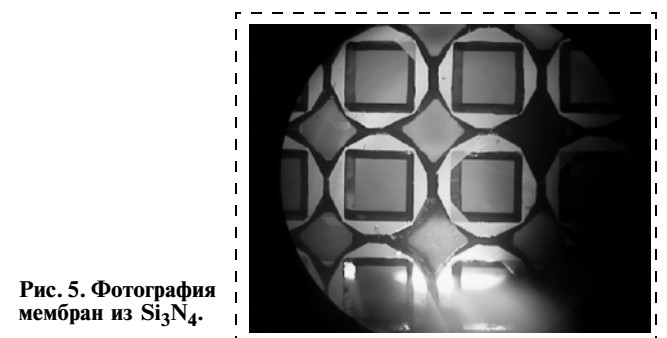


Рис. 5. Фотография мембран из Si_3N_4 .

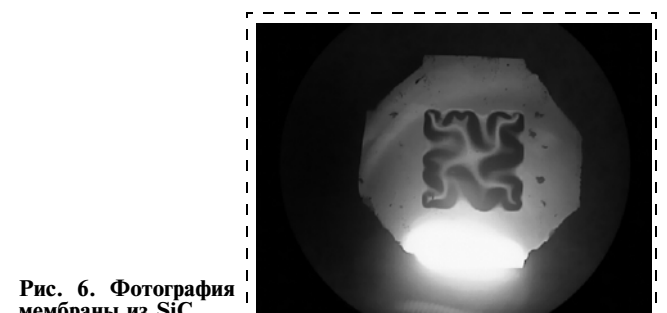


Рис. 6. Фотография мембраны из SiC

- различие коэффициентов линейного расширения пленки и подложки при высоких температурах получения пленки;
- различие молярных объемов исходных компонентов и продуктов при твердофазных превращениях в пленке;
- внедрение и твердофазная диффузия примесей (компонентов) в пленку из окружающей среды или подложки;
- релаксация протяженных дефектов в пленке.

Измерение механических свойств мембран

Для контроля механических, тепловых, электрических свойств мембран требуются специальные методики [2]. Методика измерения механических характеристик мембран основана на оптическом способе определения прогиба сверхтонких мембран в зависимости от приложенного к ним статического давления.

Расчет механических характеристик мембран проводится путем аппроксимации полученных зависимостей к приближенному решению дифференциального уравнения фон Кармана для большого прогиба жесткозакрепленных пластин с начальными внутренними напряжениями (рис. 7):

$$P = C_0 \frac{Eh^3}{a^4(1-\nu^2)} w_0 + C_1 \frac{\sigma_0 h}{a^2} w_0 + C_2 \frac{Eh}{a^4(1-\nu^2)} w_0^3, \quad (1)$$

где a — радиус круглой мембраны или половина стороны квадратной мембраны; w_0 — смещение центра мембраны; h — толщина мембраны; P — приложенное давление; σ_0 — начальное внутреннее напряжение мембраны; E — модуль Юнга материала мембраны; ν — коэффициент Пуассона. Значения коэффициентов C_0 , C_1 , C_2 зависят от формы мембраны и приближенно равны $C_0 = 5,3$; $C_1 = 4,4$; $C_2 = 2,6...3,4$.

Суммарное значение внутреннего напряжения композиционной мембраны определяется из соотношения

$$\sigma_\Sigma = \frac{\sigma_1 h_1 + \sigma_2 h_2}{h_1 + h_2},$$

где σ_Σ — эффективное значение внутреннего напряжения композиционной мембраны; σ_1 , h_1 , σ_2 , h_2 — значения внутреннего механического напряжения и толщины первого и второго слоев соответственно.

Измерение внутреннего напряжения и предела прочности мембран проводилось на автоматизированной установке (рис. 8), разработанной в Центре микротехнологии и диагностики Санкт-Петербург-

ского государственного электротехнического университета. С помощью датчика давления создается избыточное давление на мембрану. Для измерения статического прогиба мембраны, создаваемого приложенным давлением, использовался интерферометрический датчик. Чувствительным элементом датчика является интерферометр Фабри-Перо, образованный частично отражающим торцом оптоволоконна и металлизированной поверхностью мембраны.

Принцип действия торцевого волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо состоит в следующем: излучение лазера с длиной волны 1,55 мкм вводится в оптоволоконно и через ответвитель передается на оптоволоконно, ведущее к мембране. При этом часть излучения отражается от торца оптоволоконна, а другая его часть, отражаясь от поверхности мембраны, возвращается обратно в оптоволоконно. Излучение, отраженное от оптоволоконна, интерферирует с излучением, отраженным от мембраны, и на фотоприемнике регистрируется интенсивность излучения, изменяющаяся в зависимости от расстояния между торцом волокна и поверхностью мембраны. Результирующий сигнал регистрируется фотоприемником, усиливается и попадает на вход устройства сопряжения с ЭВМ. В табл. 1 представлены отдельные результаты исследований начальных внутренних напряжений в мембранах [3].

Для обеспечения управления жесткостью мембран из нитрида кремния толщиной 130 нм были исследованы различные "разгружающие" пленки, наносимые на поверхность мембраны. При этом учитывалась стойкость пленок к длительному воздействию щелочи КОН при температуре около 100 °С. Такие пленки, как SiC, BN, алмазоподобный углерод, наносились перед травлением мембран, а поли-

Таблица 1

Характеристика начальных внутренних механических напряжений в различных мембранах

Исследуемый слой	Толщина слоя, нм	Внутренние напряжения	Напряжение
SiC	250	Стягивающее	Чрезвычайно высокое (более 1 ГПа)
AlN	130	Стягивающее	0,05 ГПа
BN	130	Растягивающее	0,05 ГПа
C	130	Стягивающее	Менее 0,5 ГПа
Si ₃ N ₄	250	Растягивающее	Чрезвычайно высокое (более 1 ГПа)

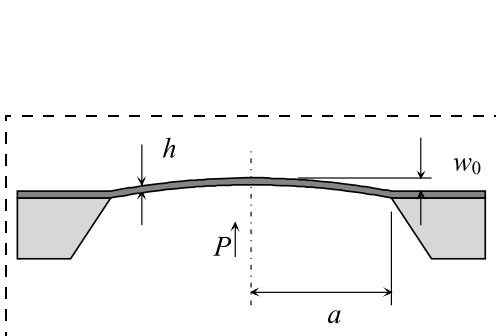


Рис. 7. Схематическое изображение плоской мембраны под нагрузкой

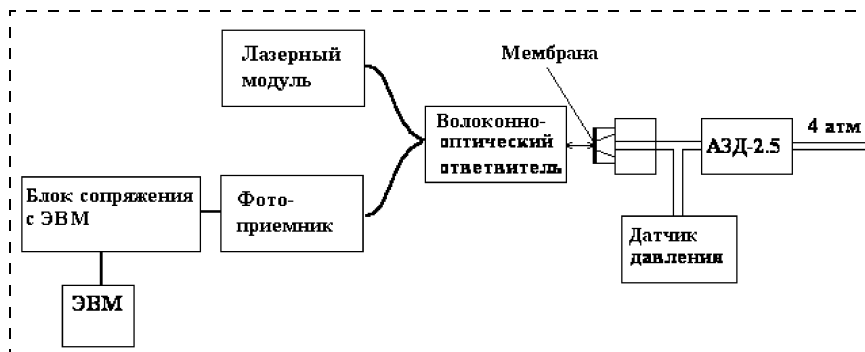


Рис. 8. Схема установки для измерения статического прогиба мембран

Результаты "разгружающего" воздействия слоев различных веществ на мембраны из нитрида кремния

Параметры пленок	Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄ /ПИ			Si ₃ N ₄ /BN (нагрев)	Si ₃ N ₄ /BN (без нагрева)	Si ₃ N ₄ /AlN
Толщины, нм	130	130/25	130/50	130/10	130/110	130/110	130/80
Внутренние напряжения материала мембраны, ГПа	0,93	0,95	0,77	0,56	0,55	0,54	0,55
Модуль Юнга материала мембраны, ГПа	320	250	200	200	125	140	300
Предел прочности, ГПа	1,5	1,2	1,1	1,3	0,8	0,9	1,1
Внутренние напряжения пленок, ГПа		1,0	0,35	0,08	0,10	0,08	-0,07

имид (ПИ) и AlN — после травления на готовые мембраны Si₃N₄. Результаты проведенных измерений представлены в табл. 2.

По алмазоподобным пленкам получены оценочные значения внутренних механических напряжений — не менее 0,5 ГПа. Из приведенных данных можно выделить класс материалов, которые могут быть использованы для "грубой" разгрузки исходной Si₃N₄ мембраны (SiC, алмазоподобный углерод) и материалы для тонкой регулировки чувствительности мембран (полиимид, AlN). Использование бислойных композиционных мембран на основе органических материалов дает возможность целенаправленно уменьшать их внутреннее напряжение путем прецизионного изменения толщины полимерной пленки. Применение полиимида, обладающего высокими защитными и пассивирующими свойствами,

позволяет повысить эксплуатационные характеристики мембранных преобразователей [4].

Установлены зависимости начальных внутренних напряжений в тонких пленках SiC, созданных неравновесным методом магнетронного распыления, от технологических факторов их получения. Полученные зависимости свидетельствуют о первостепенном влиянии процесса структурного и химического упорядочения, зависящего от температуры подложки, на формирование внутренних напряжений в пленках. На рис. 9 показана зависимость внутренних механических напряжений в пленках SiC от температуры их получения.

В бислойных композиционных мембранах на основе различных пленок достаточно часто образуются значительные изгибные механические напряжения, что приводит к формированию микро-

трубок в процессе разрушения мембран (рис. 10).

Измерение теплофизических свойств мембран

Изучение теплофизических характеристик мембран имеет важное значение для проектирования и разработки микросистем, учитывая изменения данных параметров в тонких слоях и критическое снижение латеральной теплоотдачи через сечение сверхтонкой мембраны.

Для контроля теплофизических характеристик мембран разработана специальная топология (рис. 11) расположения пленочных SiC терморезисторов на плоскости мембраны, позволяющая определять не только теплопроводность материала мембраны, но и тепловую инерционность мембранной конструкции.

Измерение в статическом режиме при нагреве центрального терморезистора позволяет оценить теплопроводность материала мембраны. Для исключения фактора теплоотдачи в воздушную среду измерения следует проводить в вакууме при незначительных перегревах терморезисторов. Импульсный нагрев позволяет определить теплоемкость мембранной конструкции. Результаты измерений параметров SiC мембран представлены на рис. 12 и 13.

Полученные значения существенно отличаются от параметров объемного моно-

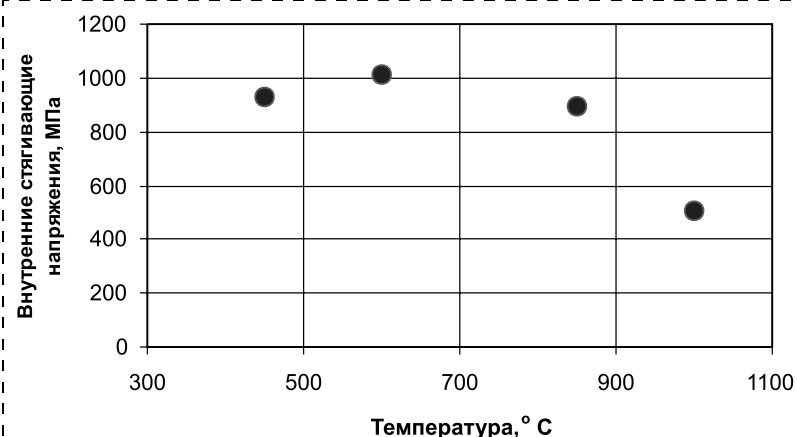


Рис. 9. Зависимость внутренних механических напряжений в пленках SiC от температуры их получения

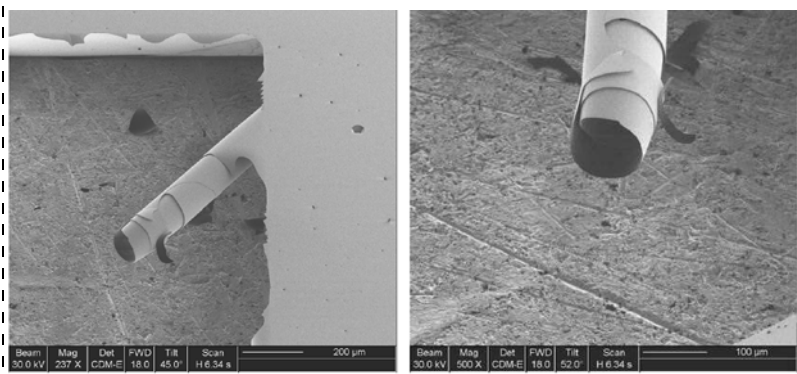


Рис. 10. Образование микроотверстий при препарировании бислойной мембраны на основе композиции Si₃N₄/SiC

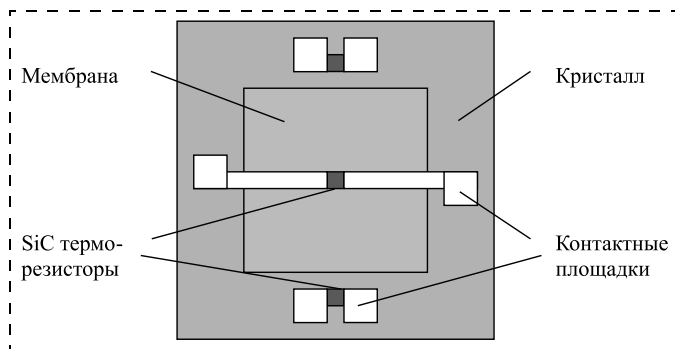


Рис. 11. Расположение терморезисторов на тонкой мембране

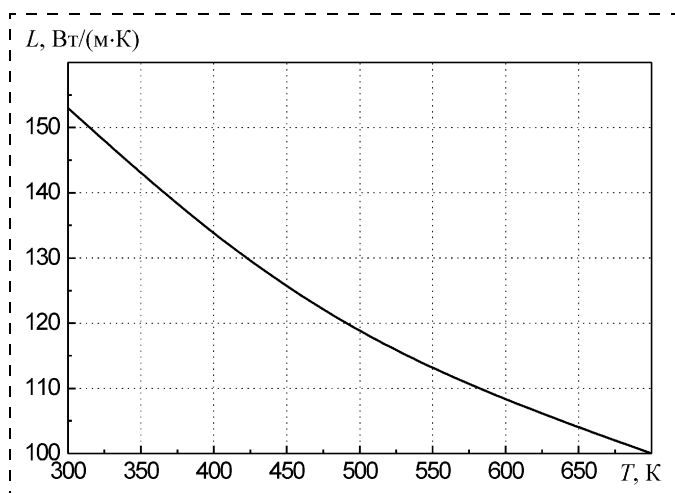


Рис. 12. Зависимость удельной теплопроводности SiC мембраны (0,8 мкм) от температуры

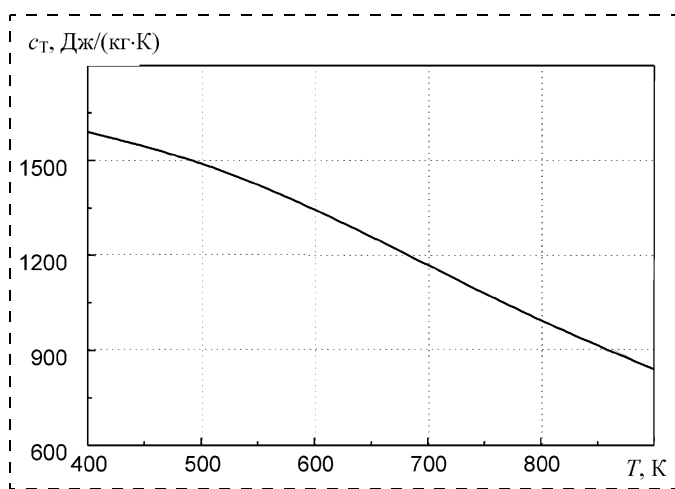


Рис. 13. Зависимость удельной теплоемкости слоя SiC от температуры

кристаллического материала и близки к значениям спеченного SiC [5].

Меняя давление воздуха и толщину мембранного элемента, можно также оценить влияние воздушной теплоотдачи. Для тонких (менее 1 мкм) мембран теплоотдача в воздух превышает в несколько раз теплоотвод через мембрану. Экспериментально показано, что при небольших размерах теплоизлучающих элементов (менее 0,3 мм) при отсутствии свободной конвекции теплоотдача в окружающую среду происходит посредством радиальной теплопередачи через

воздух [6]. При этом тепловое сопротивление R_{T_v} окружающей воздушной среды определяется формулой [7]

$$R_{T_v} = 1/4\lambda_v L,$$

где λ_v — теплопроводность воздуха; L — характерные размеры нагреваемой области мембраны. Следует отметить, что теплоотдача оказывается пропорциональна характерному размеру L нагреваемой поверхности, а не его площади.

Тепловая инерционность мембранных элементов определяется по постоянной времени τ запаздывания изменения температуры относительно изменения мощности нагрева:

$$\tau = R_T C_T,$$

где R_T — общее тепловое сопротивление конструкции; C_T — общая тепловая емкость. При снижении теплоемкости мембраны за счет уменьшения ее толщины и практически постоянном значении R_T , определяемом теплоотдачей в воздушную среду, верхний диапазон рабочих частот тепловых мембранных систем может составить несколько кГц. Практически достигнуто значение $\tau = 2$ мс.

Конструкции мембран

Функциональное назначение мембран определяет их конструкцию, геометрические и топологические параметры. Табл. 3 отражает многообразие технических решений при создании мембран для приборов микромеханики. Основной интерес представляют мембраны, в которых механические напряжения снимаются за счет введения 3D (трехмерных) разгружающих элементов.

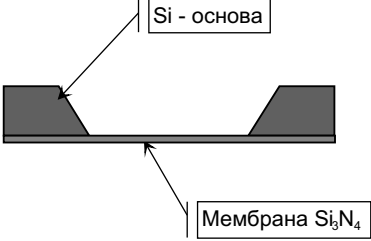
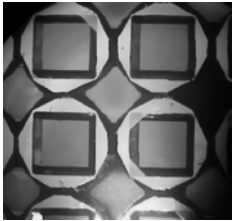
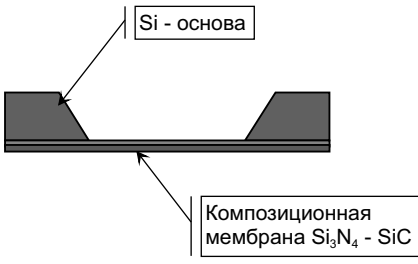
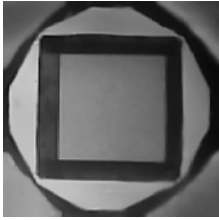
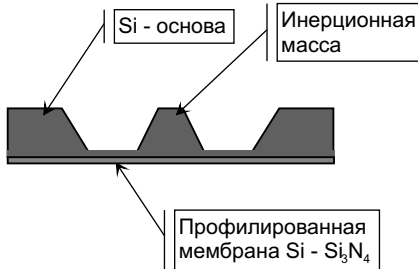
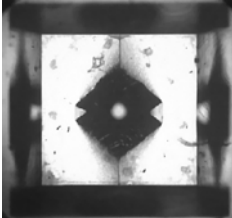
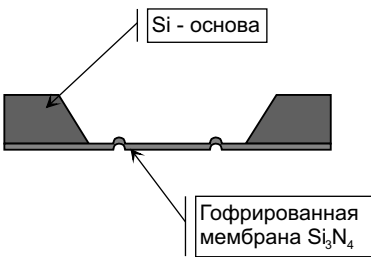
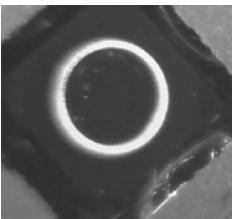
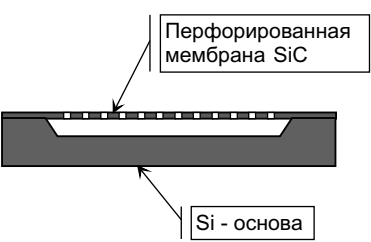
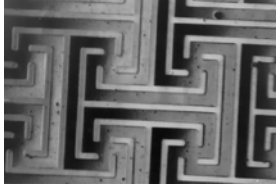
Гофрированные мембраны. Конструкция гофрированной мембраны позволяет существенно снизить уровень остаточных напряжений в центральной области мембраны за счет изгибной деформации в области гофра, при этом значительно возрастает и чувствительность мембраны.

Технология изготовления таких мембран основывается на формировании профиля гофра путем предварительного локального травления кремния, нанесения на профилированную поверхность слоя Si_3N_4 с последующим глубоким травлением кремния до профилированной мембраны. Глубина гофра определяется глубиной предварительного травления кремния, а ширина — формой маски и величиной подтрав под маску. Установлена связь между выбором условий травления и геометрическими характеристиками гофра.

Травление гофра изотропным жидкостным травителем формирует гладкие округлые стенки. Тип гофра — U-образные, полусферические канавки с подтравом под маску порядка глубины гофра (рис. 14).

Травление гофра анизотропным жидкостным травителем формирует гладкие наклонные стенки в соответствии с кристаллографическим направлением кремниевой подложки. Тип гофра — V-образные канавки, при этом глубина гофра и подтрав под маску зависит от длительности процесса и кристаллографического направления.

Конструкции мембран и их техническая реализация

Вид мембран	Сечение	Фото (вид сверху)
Монослоевая (матрица)	 Si - основа Мембрана Si_3N_4	
Композиционная (разгруженная)	 Si - основа Композиционная мембрана Si_3N_4 - SiC	
Профилированная (инерционная масса)	 Si - основа Инерционная масса Профилированная мембрана Si - Si_3N_4	
Гофрированная (гибкая)	 Si - основа Гофрированная мембрана Si_3N_4	
Перфорированная (специальная топология)	 Перфорированная мембрана SiC Si - основа	

Травление гофра плазмохимическим травлением формирует более отвесные стенки (без подтравы) и шероховатое дно. Тип гофра — П-образные канавки, глубина гофра может быть более значительна (до 100 мкм), так как отсутствует заметное увеличение ширины гофра.

Варианты конструкции гофрированных мембран могут включать разное число гофров для повышения степени разгрузки центральной области, а свойства локальной области в центре мембраны определяют частотные характеристики преобразователей.

Изменяя параметры гофрированных мембран (число, форму, ширину и глубину гофров, толщину пленки), можно не только изменять в широких пределах чувствительность, которая существенно выше, чем в разгруженных мембранах, но и независимо корректировать частотные характеристики преобразователя, изменяя массу центральной области мембраны.

Перфорированные мембраны. Для значительного снижения уровня остаточных механических напряжений разработаны [8] и изготовлены специальные

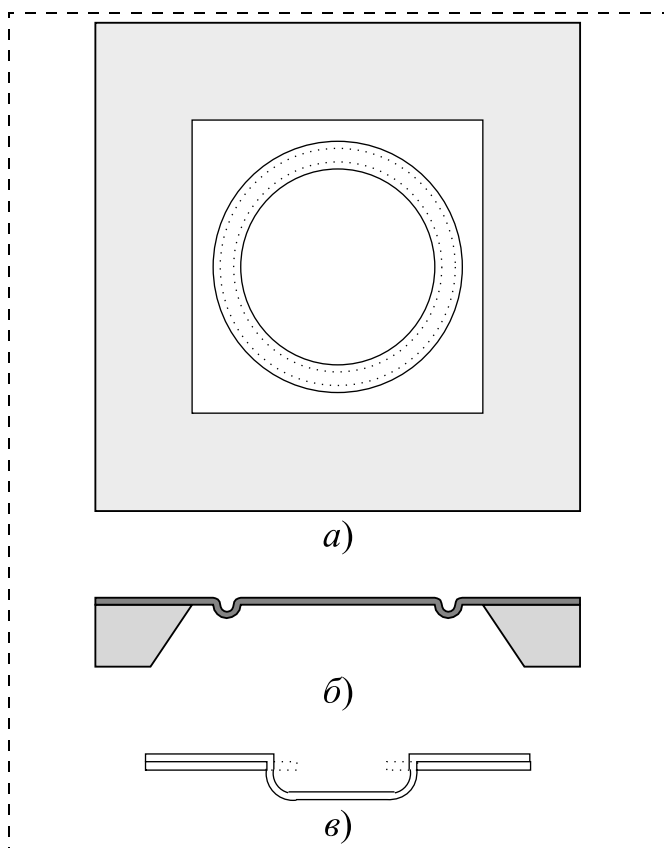


Рис. 14. Гофрированная мембрана, сформированная изотропным травителем:
a — вид сверху; *б* — сечение мембраны; *в* — подтрав под маску (штриховой линией показаны границы маски)

перфорированные мембраны. Перфорация мембраны выполнена специальным образом, так чтобы при деформации локальных областей перфорации обеспечить максимальную компенсацию исходных механических напряжений в мембране. С этой целью в мембране перфорация выполнена сквозными отверстиями с образованием тригональных или тетрагональных фигур (рис. 15), расположенных из расчета пересечения элементами перфорации линий, соединяющих центры смежных фигур. Таким образом, при механических нагрузках, действующих в плоскости мембраны, происходят поворот симметричных элементов, образованных областями перфорации, и изгиб соединяющих их линейных элементов вне плоскости мембраны. Преобладание изгибных деформаций элементов на микроуровне обеспечивает значительно большую макроскопическую упругость плоскости мембраны. Это способствует снижению исходных механических напряжений в мембране и повышению чувствительности мембранных преобразователей. Интересной особенностью перфорированных таким образом мембран является значительная и одинаковая по направлениям (в плоскости мембраны) положительная деформация при приложении усилия по одному направлению, что равнозначно макроскопическому значению коэффициента Пуассона $\nu = -1$. Это является характерным примером модификации макроскопических свойств "материала" вследствие формирования в нем упорядоченной микроструктуры.

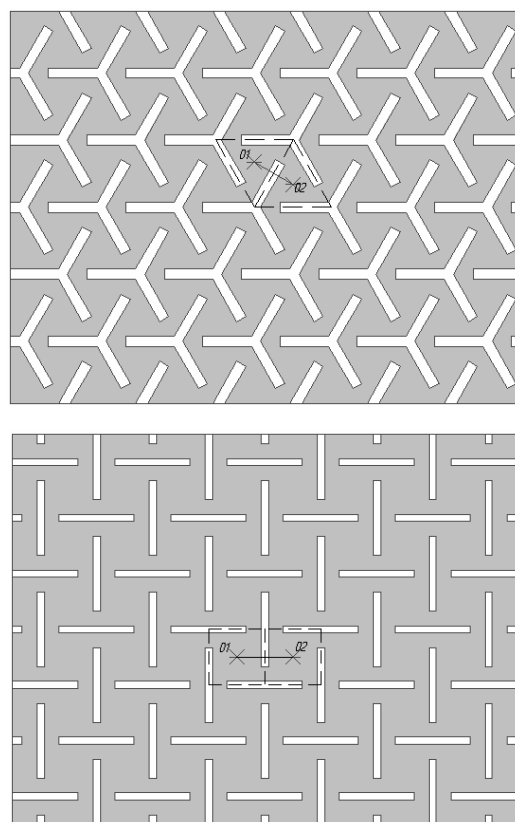


Рис. 15. Примеры перфорации мембран с эффектом сверхупругости за счет возникновения изгибных деформаций на микроуровне

Для возможности проведения операции анизотропного травления кремния через сетку перфорированной мембраны выбираются размеры, форма и ориентация линий перфорации для максимального подтравливания под маску, образованную перфорированной мембраной.

Таким образом, специальная перфорация мембраны обеспечивает:

- "разгрузку" механических напряжений пленки (Si_3N_4);
- воздушное демпфирование колебаний мембраны (сопротивление прохождению воздуха через области перфорации);
- полноту проведения операции анизотропного травления кремния через сетку перфорированной мембраны.

На основе "разгруженных" сверхтонких мембран реализованы высокочувствительные маятниковые микромеханические акселерометры, виброакустические преобразователи.

Размерные эффекты в мембранах

Проведено изучение размерных эффектов в сверхтонких мембранах. Получены критерии для оценки механических, акустических, тепловых свойств мембран в зависимости от их размеров, свойств, условий функционирования [9].

На основании анализа представленного выше уравнения (1), акустомеханических расчетов и экспериментальных результатов могут быть оценены

характерные особенности функционирования мембран (пластин) по следующим критериям:

1. Критерий "мембрана—пластина":

$$k_1 = \sigma_0 a^2 / (E h^2),$$

при $k_1 \gg 1$ — в большей степени "напряженная мембрана";

при $k_1 \ll 1$ — в большей степени "жесткозакрепленная пластина";

при $k_1 \approx 1$ — учитываются изгибные и продольные напряжения в соответствии с выражением (1).

2. Критерий линейности прогиба мембран:

$$k_2 = E \omega^2 / (\sigma_0 a^2),$$

при $k_2 \ll 1$ — практически линейная зависимость прогиба мембраны от давления;

при $k_2 \gg 1$ — сильная нелинейность прогиба мембраны.

Сравнительные критерии, учитывающие влияние параметров окружающей воздушной среды на механические характеристики мембранных преобразователей:

3. Критерий влияния упругости подмембранного воздушного объема:

$$k_3 = p_v a^2 / (\sigma_0 h h_v),$$

где p_v — давление воздуха; h_v — толщина подмембранного воздушного зазора;

при $k_3 \ll 1$ — учитывается лишь упругость мембраны;

при $k_3 > 1$ — необходимо учитывать влияние упругости воздушного подмембранного объема.

4. Критерий влияния "присоединенной" массы воздуха (при линейных размерах мембраны меньше длины звуковых волн):

$$k_4 = \rho_v a / (\rho_m h),$$

где ρ_v — плотность окружающего воздуха; ρ_m — средняя плотность материала мембраны;

при $k_4 \ll 1$ — учитывается лишь масса мембраны;

при $k_4 > 1$ — необходимо учитывать влияние "присоединенной" массы окружающего воздуха.

Сравнительные критерии, учитывающие влияние параметров окружающей газовой среды на характеристики мембранных термопреобразователей:

5. Критерий влияния воздушной теплоотдачи:

$$k_5 = \lambda_v a / (\lambda_m h),$$

где λ_v — теплопроводность воздуха; λ_m — теплопроводность материала мембраны;

при $k_5 \ll 1$ — учитывается лишь теплопроводность через мембрану;

при $k_5 > 1$ — необходимо учитывать теплоотдачу в воздушную среду.

6. Критерий влияния "присоединенной" теплоемкости воздуха:

$$k_6 = c_v \rho_v a / (c_m \rho_m h),$$

где c_v — теплоемкость воздуха; c_m — средняя теплоемкость материала мембраны;

при $k_6 \ll 1$ — учитывается лишь теплоемкость мембраны;

при $k_6 > 1$ — необходимо учитывать влияние теплоемкости окружающего воздуха.

Из приведенных сравнительных критериев выделим важный размерный параметр a/h , определяющий необходимость учета взаимодействующих подсистем при полном анализе мембранных микросистем.

Моделирование мембран

До настоящего времени сохраняются проблемы моделирования сверхтонких, особенно топологически сложных, трехмерных мембран и мембранных композиций, что определяется, в том числе, соотношениями их линейных размеров и толщин. Это приводит к большому объему "сетки" при моделировании методом конечных элементов. В целях снижения вычислительной сложности задачи моделирование деформаций плоской мембраны часто проводится в осесимметричной постановке, при

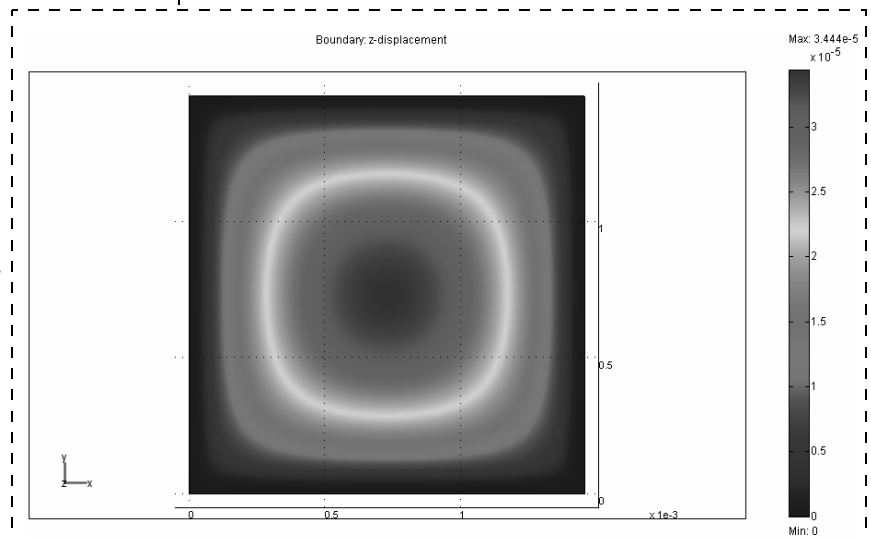


Рис. 16. Деформация тонкой прямоугольной мембраны при $p = 80$ кПа

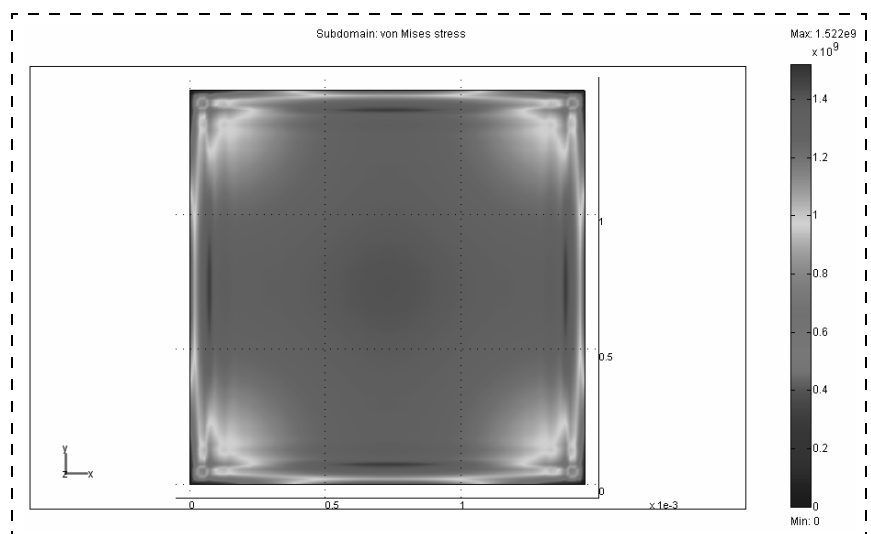


Рис. 17. Напряжения в тонкой прямоугольной мембране при $p = 80$ кПа

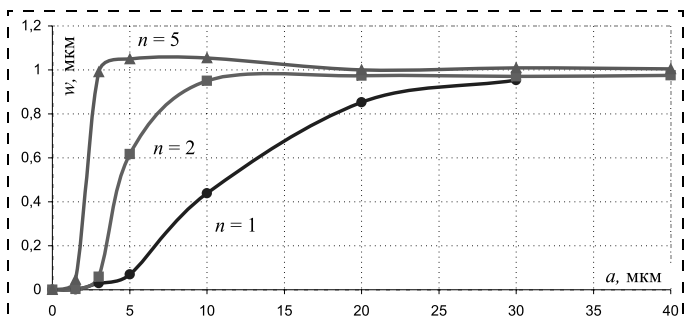


Рис. 18. Расчет зависимости прогиба w центральной части гофрированной мембраны толщиной 0,2 мкм ($p = 1$ Па) от глубины a и числа гофров n

этом трехмерная задача сводится к двумерной. Начальное напряжение моделируется как возникающее в результате термического сжатия мембраны при жесткой заделке по периметру, т. е. перемещения периметра мембраны равны нулю по двум координатам.

Результаты расчета трехмерной модели прямоугольной мембраны (в системе Femlab 3.1) при давлении 80 кПа приведены на рис. 16, 17. Модель разбита на 400 элементов, два слоя по толщине, время счета около 10 мин.

Расчет трехмерной модели приводит к увеличению вычислительных затрат в несколько раз по сравнению с двумерной при достаточно близких результатах. Кроме того, на рис. 17 видно, что для получения точного распределения напряжений в мембране в области крепления необходимо уменьшать размер сетки и таким образом еще более увеличивать вычислительную сложность задачи. Следовательно, представляется целесообразным в первом приближении моделирование мембран, особенно простой формы, в двумерной осесимметричной геометрии. Использование симметрии позволяет упростить задачу и для трехмерного случая, так как достаточно рассчитывать одну четверть объема квадратной мембраны. При этом повышается плотность сетки и увеличивается точность решения.

Моделирование прогиба тонких гофрированных мембран (Ansys) показало (рис. 18), что при выполнении критерия "мембрана — пластина" $k_1 < 1$ для центральной части мембраны ее прогиб уже не зависит от параметров разгружающих элементов (гофров) и определяется изгибной деформацией центральной части по типу "пластина".

Мембраны для микромеханических преобразователей

В рамках практической реализации мембранных преобразователей были получены композиционные мембраны с различным уровнем механических напряжений, а также гофрированные высокочувствительные мембраны и специальные перфорированные мембраны.

Различные варианты мембранных преобразователей были представлены в табл. 3.

Плоские разгруженные мембраны (рис. 19) реализовывались [10] на основе композиций Si_3N_4 , SiC, AlN, BN, алмазоподобного углерода, жесткоцепных

полиимидов и имели чувствительность акустомеханического преобразования до 5 нм/Па (размеры мембран $1,5 \times 1,5$ мм).

Гофрированные мембраны на основе пленок Si_3N_4 с одним и двумя гофрами (радиусы гофров до 0,9 мм, глубиной до 40 мкм) с чувствительностью до 100 нм/Па представлены на рис. 20.

Для использования наряду с механическими характеристиками оптических свойств мембран были разработаны и реализованы:

- мембраны с дифракционным отражающим покрытием (рис. 21, а) на основе металлизированной пленки Si_3N_4 с топологическим микрорельефом (размер мембраны $1,5 \times 1,5$ мм, фокусное расстояние 0,5 мм, глубина рельефа 0,75 мкм);
- мембраны со сферической отражающей поверхностью (рис. 21, б) на основе биморфной пленки Si_3N_4 — Si p^+ (фокусное расстояние 2...4 мм);

Тестирование различных конструкций гофрированных мембран показало заметную концентрацию механических напряжений в области крепе-

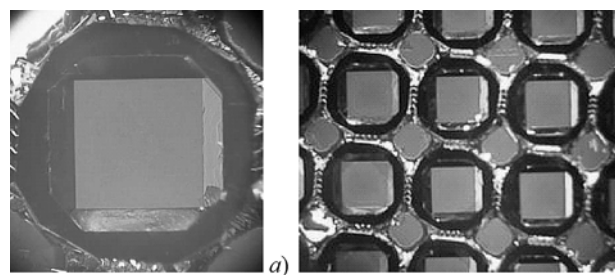


Рис. 19. Плоские композиционные $\text{SiC}/\text{Si}_3\text{N}_4$ разгруженные мембраны:

а — дискретная мембрана; б — матрица мембран

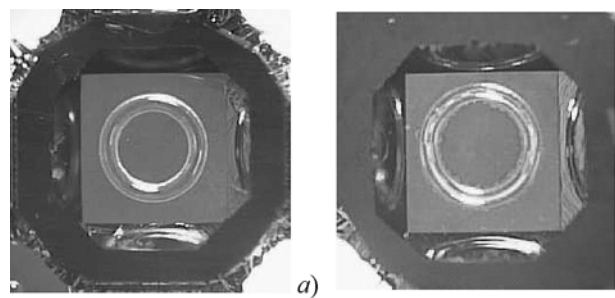


Рис. 20. Гофрированные мембраны на основе пленки Si_3N_4 :

а — мембрана с одним гофром; б — мембрана с двумя гофрами

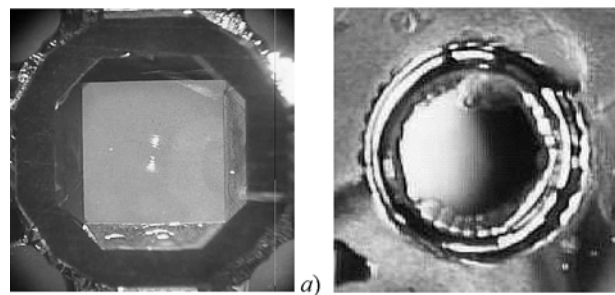
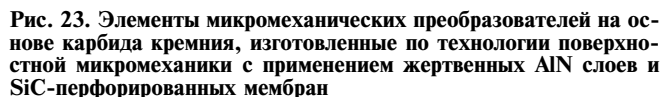
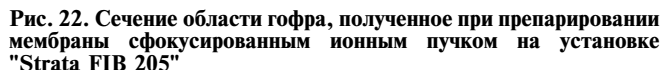


Рис. 21. Мембраны Si_3N_4 с активной отражающей поверхностью:

а — с дифракционной линзой; б — сферическое отражающее зеркало



ния мембраны и существенное снижение механических напряжений в центральной области (внутри гофров). Сечение области гофра, полученное с помощью ионно-лучевого препарирования мембраны, иллюстрирует рис. 22. Реальное соотношение между толщиной мембраны и высотой гофра обычно находится на уровне $1/200$ при толщине мембраны около 130 нм.

Для формирования подвижных элементов поверхностной микромеханики реализованы конструкции перфорированных (сетчатых) мембран (рис. 23). Перфорация таких мембран служит как для удаления лежащего ниже жертвенного слоя, так и для "разгрузки" мембраны.

Заключение

Полученные результаты по исследованию, технологии, моделированию и практической реализации микросистем мембранного типа свидетельствуют о необходимости учета сопутствующих взаимодействий механической, тепловой, акустической природы для расчета и проектирования микропреобразователей на основе сверхтонких мембран.

Совокупность представленных результатов по созданию и применению топологически модифицированных сверхтонких мембран показывает их чрезвычайно высокую эффективность в отношении обеспечения требуемых акустических, механических, теплофизических и других свойств активных элементов микросистемной техники.

Список литературы

1. **Белых С. В., Ефременко А. М., Казарин И. Г., Корляков А. В., Субботин О. В.** Исследование механических характеристик слоевых субмикронных композиций широкозонных материалов // Сб. матер. V Междунар. семинара "Карбид кремния и родственные материалы". Новгород, 2005. С. 95—96.
2. **Белых С. В., Ефременко А. М., Казарин И. Г., Корляков А. В., Лучинин В. В., Субботин О. В.** Исследование механических свойств сверхтонких нанослоевых мембран // Матер. IV Междунар. науч. конф. "Химия твердого тела и современных микро- и нанотехнологии", 19—24 сентября 2004 г., г. Кисловодск. Ставрополь: Северокавказский ГТУ, 2004. С. 341—343.
3. **Белых С. В., Корляков А. В., Лучинин В. В., Субботин О. В.** Механические характеристики мембран // Матер. III Междунар. науч. конф. "Химия твердого тела и современных микро- и нанотехнологии", 14—19 сентября 2003 г., Кисловодск. Ставрополь: СевКавГТУ, 2003. С. 214—215.
4. **Голоудина С. И., Лучинин В. В., Пасюта В. М., Белых С. В., Корляков А. В., Гофман И. В., Склизов В. П., Кудрявцев В. В.** Новые направления применения полиимидных пленок Ленгмюра-Блоджетт: создание матриц полимерных мембран и модификация свойств мембран микромеханических виброакустических преобразователей // Тр. IX Междунар. науч.-техн. конф. "Актуальные проблемы твердотельной электроники", 12—17 сентября 2004 г., Дивноморское, Россия. Ч. 1. Ставрополь: Ставропольский гос. радиотехн. ун-т. С. 181—182.
5. **Справочник по электротехническим материалам.** В 3-х т. / Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. Л.: Энергия, 1976. Т. 3.
6. **Корляков А. В., Лучинин В. В., Никитин И. В.** Размерные эффекты и эффекты масштабирования в теплофизических микросистемах // Петербургский журнал электроники. 2001. № 4. С. 54—59.
7. **Кутателадзе С. С.** Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справ. пос. М.: Энергоатомиздат, 1990.
8. **Патент** на изобретение № 2265913 Российской Федерации МПК Н 01 L 29/84 от 20.05.2005. Перфорированная мембрана для чувствительного элемента микромеханического прибора // В. В. Лучинин, А. В. Корляков, С. В. Белых. Заявка № 2003136308/28 от 15.12.2003, бюл. № 34. Приоритет 15.12.2003.
9. **Лучинин В. В., Корляков А. В., Белых С. В., Ефременко А. М., Пасюта В. М., Руцов С. А.** Физико-технологические основы формирования сверхтонких мембран датчиков // Междунар. науч.-техн. конф. "Датчики и системы—2005", Пенза 6—10 июня 2005 г. Программа и тез. док. Пенза: НИФИ, 2005. С. 88—89.
10. **Патент** на изобретение № 2247443 Российской Федерации МПК Н 01 L 29/84 от 27.02.2005. Чувствительный элемент мембранного типа // В. В. Лучинин, А. В. Корляков, С. В. Белых, В. К. Ильков, А. А. Ширшов. Заявка № 2003119853/28 от 30.06.2003, бюл. № 6. Приоритет 30.06.2003.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.3.049.7.002

Т. М. Зимина, канд. физ.-мат. наук,
Центр микротехнологии и диагностики,
Санкт-Петербургского государственного
электротехнического университета "ЛЭТИ"

МИКРО- И НАНОСИСТЕМЫ В ЗАДАЧАХ ЖИДКОСТНОГО И ГАЗОВОГО АНАЛИЗА

Обсуждаются результаты физико-технологических исследований и конструирования микроаналитических систем (микрочипов, биочипов, микрофлюидных чипов) и портативных аналитических приборов для работы с микрочипами (ридеров). Представлены примеры макетной реализации таких приборов, предназначенных для проведения биомедицинского анализа методом капиллярного электрофореза, электрохроматографии, латекс-агглютинации.

ВВЕДЕНИЕ

Технологии микроэлектроники открыли возможности развития нового направления инструментальной аналитической химии — микро- и наноаналитических систем [1–4]. Предназначение таких систем — повышение скорости и автоматизация аналитического процесса для осуществления массового скрининга параметров среды обитания, технологических процессов и живых организмов. Переход инструментальной аналитической химии к применению разработок микросистемной техники превратили ее в индустрию генерирования и классификации аналитических данных. Переход к аналитическим микросистемам можно классифицировать как научно-техническую революцию, так как период этого перехода характеризуется скачкообразным увеличением производительности аналитического процесса [3–10].

ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ И БАЗОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Две основные функции микро- и наноаналитических систем (ввод пробы и ее анализ) можно представить как совокупность более простых операций (табл. 1).

Техническая реализация таких операций привела к двум основным классам микроаналитических систем: микрофлюидные (1) и матричные (2) чипы, краткая характеристика которых приведена в табл. 2 [5–8]. В литературе появились термины: μ -TAS, лаборатория на чипе (lab-on-chip), аналитический

микрочип, биологический микрочип, микрофлюидный чип, геночип и другие, которые все относятся к миниатюрным устройствам, предназначенным для проведения различного рода биомедицинских и химических анализов.

Миниатюризация аналитических систем обеспечивает как повышение чувствительности анализа по количеству вещества, т. е. обеспечивает сокращение объема анализируемой пробы, так и резкое повышение скорости анализа. При этом микро- и нанотехнологии позволяют реализовывать автоматическое регулирование в микромасштабе прохождения стадий аналитического процесса в интегрированных функциональных модулях аналитических микросис-

Таблица 1

Основные функции микро- и наноаналитических систем

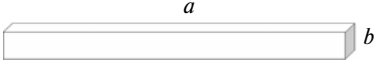
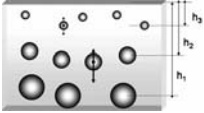
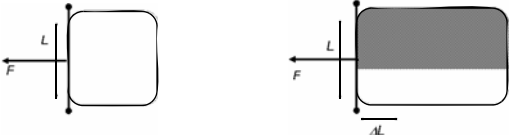
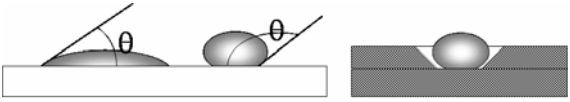
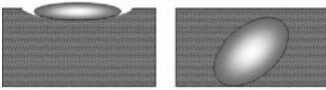
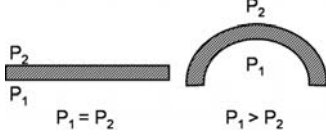
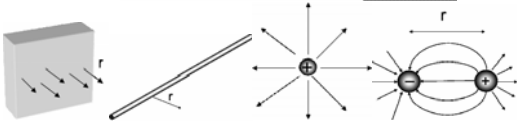
Функция	Элементарные операции
Ввод пробы	Забор представительной пробы Пробоподготовка Физическая обработка Химическая обработка Системы дозирования Управляемый транспорт пробы Дискретизация Инжекция
Анализ	Разделение на компоненты Осуществление специфических реакций Детектирование Биораспознавание и гибридизация

Таблица 2

Основные классы микроаналитических систем

Тип	Класс	Основные принципы
1	Матричные микрофлюидные чипы (генные, гибридные чипы) [9–12]	1. Топологически кодированный синтез цепных молекул-зондов с помощью многостадийной фото-литографии, микропозиционирование, микродозирование 2. Фотоиницирование реакций 3. Молекулярное биораспознавание 4. Видеоцифровая регистрация данных, компьютерное распознавание образов
2	Капиллярные микрофлюидные чипы (в том числе, с функциональными элементами, например, ПЦР реакторами, химическими реакторами) [1–4] [13–16]	1. Капиллярный электроосмотический транспорт 2. Микрогидравлика 3. Микромеханика 4. Оптоэлектроника

Эффекты масштабирования при миниатюризации аналитической системы

Параметр	Размерность	Графическое представление
Линейный размер, площадь, объем	L, L^2, L^3	
Фактор формы, $y = a/b$	L^y	
Масса, m	$\sim L^3$	
Сила тяжести (седиментация)	$\sim L^3$	
Поверхностное натяжение, σ Сила на единицу длины контура, $F \cdot L^{-1}$	$\sim L^2$	
Смачивание, $\cos\theta > 0$ — смачивание $\cos\theta < 0$ — не смачивание	$\sim L^2$	
Когезия (слипание частиц внутри фазы), $W_a = 2\sigma_{(жидкость-газ)}$	$\sim L^2$	
Адгезия (прилипание частиц, находящихся в разных фазах), $W_a = \sigma_{(жидкость-газ)}(1 + \cos\theta)$ — уравнение Дюпре	$\sim L^2$	
Флотация, $f = \sigma_{(жидкость-газ)}(1 - \cos\theta) > mg$	$\sim L^2$	
Капиллярное давление $2\sigma/L$, L — радиус капилляра, уравнение Лапласа—Юнга	$\sim L^{-1}$	
Капиллярное поднятие $h = 2\sigma/Lg\rho$ — уравнение Жюрена для полного смачивания	L^{-1}	
Давление пара у искривленных поверхностей p^r $RT \ln(p^r/p^0) = 2\sigma v_i/L$ — уравнение Томсона	L^2	
Электрическое поле $E(r)$: плоскость, тонкий проводник, точечный заряд, диполь	$const$ $\sim L^{-1}$ $\sim L^{-2}$ $\sim L^{-3}$	

тем, гибкое моделирование топологии и конструкции таких систем под конкретный анализ и создание многоканальных систем для параллельного анализа нескольких образцов.

Микрофлюидные аналитические системы основаны на принципах проточного анализа и являются гибридно-интегральной формой хроматографии и капиллярного электрофореза.

Матричные аналитические системы содержат топологически-кодированные площадки с тем или иным способом иммобилизованными комплементарными группировками, избирательно связывающими целевые компоненты анализа (мишени). Такие системы можно было бы сравнить с принципом работы "носа". Матрицы изготавливают методом фотолитографии в сочетании с биосинтезом на подложке (например, олигопептидов и/или олигонуклеотидов) [9], либо иммобилизацией комплементарных мишеням биофрагментов с помощью фотополимеризующихся связующих [10], либо позиционированием в матрицах микролунок на поверхности подложки носителей (микрофер) биоспецифических соединений [11], либо их растворов или суспензий в виде капелек [12].

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ

Поскольку миниатюрные гибридно-интегральные и, в большей степени, интегральные аналитические системы являются сложными объектами, они имеют мультифрактальные свойства, т. е. могут содержать ряд подмножеств со своими собственными фрактальными размерностями, которые описывают распределения свойств, присущих мультифрактальному объекту [12, 17]. Соответствующие таким системам фрактальные множества, как геометрические, так и энергетические, механические, оптические, химические, характеризуя один и тот же объект, могут иметь свою характерную фрактальную размерность пространственного распределения в объекте.

Например, в хроматографии упакованная пористым сферическим сорбентом колонка может рассматриваться как геометрически самоподобный объект. Если рассмотреть изменение перколяционных свойств вследствие миниатюризации хроматографической колонки (т. е. рассмотреть ее как перколяционный фрактал), то обнаруживаются самостоятельные фрактальные характеристики, зависящие от реального размера самоподобного геометрического объекта [18, 19].

Рассмотрим некоторые физико-химические величины, для которых важен эффект масштабирования при миниатюризации аналитической системы (табл. 3).

Из табл. 3 видно, что при уменьшении размеров объектов, выходят на первый план поверхностные явления — влияние кривизны поверхности на давление насыщенных паров, капиллярные эффекты, капсулирование за счет когезии [20]. Все эти эффекты участвуют и составляют основу функционирования микроаналитической системы.

В соответствии с формулой $\beta = \alpha^m$ размерности соответствует степенное представление, таким обра-

зом, формула размерности должна быть степенного вида относительно всех основных физических величин. Основным размерный параметр масштабирования трехмерной аналитической системы это протяженность L , площадь поверхности L^2 и объем L^3 . К поверхностным эффектам ($\sim L^2$) в аналитической системе относятся, прежде всего, межфазное распределение, химическое и биологическое распознавание, т. е. именно те явления, которые часто определяют селективность аналитической системы. Вместе с тем, масса реагента или ресурс работы, количество теплоты, энергии пропорциональны L^3 . Зависимость отношения этих величин (L^{-1} от линейного размера системы L) не является линейной величиной, что проявляется в возрастании роли поверхностных явлений при миниатюризации. На рис. 1 приведены зависимости некоторых величин, характеризующих проявление поверхностных сил при уменьшении масштаба. Зависимости иллюстрируют, что при уменьшении размеров для достаточно малых объектов поверхностные и объемные силы становятся сопоставимыми.

При масштабировании планарных объектов, таких как мембраны, слои проводников и диэлектриков, пленки поверхностно-активных веществ, которые можно считать бесконечно тонкими, практически двумерными, могут иметь место случаи, когда размерным фактором является отношение длины к площади, т. е. L^{-1} . Примером могут служить поверхностное натяжение, электрическое поле бесконечного планарного проводника (слоя металлизации в микроаналитических системах).

В случае линейных (одномерных) объектов отношение площади и объема стремится к единице и размерных (физико-химических) эффектов нет до тех пор, пока не появляется второе измерение. Эта закономерность проявляется при электрофоретической миграции линейных молекул, например ДНК, которые имеют одинаковую электрофоретическую подвижность независимо от молекулярной массы [2].

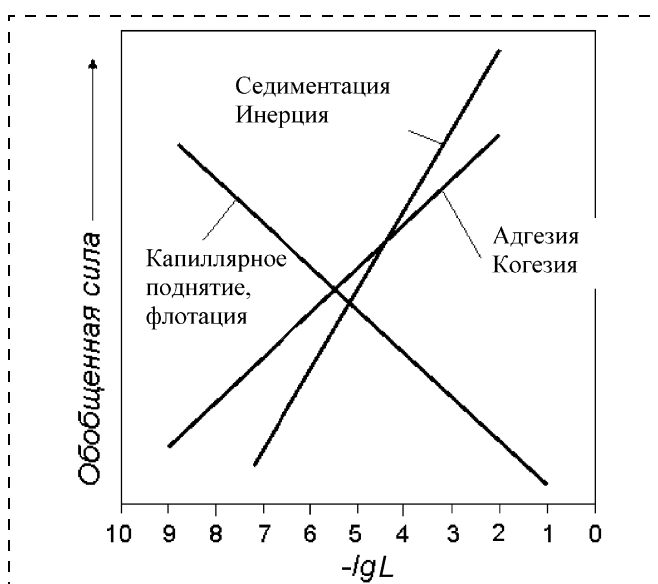


Рис. 1. Представление тенденций изменения величин, характеризующих проявление поверхностных и массовых сил от характерного размера системы L

Проявление новых свойств системы при ее миниатюризации это повышение скорости функционирования без дополнительных затрат интенсивных факторов — энергии, вещества, при этом существенно влияют на процессы фрактальные подмножества: скорость адсорбции на искривленной поверхности, геометрическая комплементарность объектов, системы двойных электрических слоев и многие другие.

Учитывая основные физические принципы и эффекты масштабирования, проявляющиеся при миниатюризации, можно сформулировать **основные задачи построения микроаналитических систем** следующим образом.

1. Изучение физико-химических закономерностей, проявляющихся при манипулировании системой в области малых и сверхмалых размеров, перемещений, чисел Рейнольдса, энергий и т. д. (см. рис. 1).

2. Разработка новых принципов организации, архитектуры и функционирования аналитических микросистем на основе модульности, комплементарности и возможности модификации для решения разнообразных аналитических задач.

3. Освоение новых принципов конструирования аналитических микросистем с учетом эффектов масштабирования технологических процессов и аналитических модулей, физических процессов, таких как явления тепло-, массопереноса и массообмена, межфазного распределения.

4. Освоение новых материалов с повышенной устойчивостью к внешним воздействиям при создании функциональных подсистем, работающих в условиях высокой концентрации энергии при контакте с химически и биологически активной средой.

5. Разработка инженерных методов микромеханики и микрогидравлики для манипулирования, препарирования и адресной доставки (например, к распознающему элементу) объектов анализа, вплоть до единичных клеток и молекул.

6. Использование принципов и элементной базы микроэлектроники, оптоэлектроники, интегральной и градиентной микрооптики.

РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИЙ

1. Транспорт

Одной из основных функций микро- и наноаналитических систем является транспорт компонентов анализа. Задача доставки компонентов оказалась настолько сложной, что породила новую дисциплину — микрофлюидику (или микрогидравлику), т. е. изучение законов течения в капиллярах [21–23]. В данной статье рассматриваются только некоторые аспекты проблемы транспорта в микро- и наноаналитических системах. Современный количественный анализ с помощью микроаналитических систем требует осуществления прецизионного переноса жидкости (или газа). В капилляре течение жидкости можно организовать обычным гидравлическим (или гидростатическим) накачиванием. При этом объемная скорость жидкости, как правило, составляет от 0,01 до 5 мкл/мин. При использовании микромеханических актюаторных гибридно-интегральных на-

сосов скорость может быть снижена до нанолитров в минуту. Сжимаемость жидкости приводит к проблеме плохой воспроизводимости значения объемной подачи. Эта проблема решается путем уменьшения ударного объема в клапанных насосах или уменьшения камеры в шприцевых насосах. Возможно и применение немеханических насосных эффектов, таких как электроосмос [21].

Сравним ряд принципов переноса [24] с точки зрения целесообразности их применения в микроаналитических системах по параметру эффективности β , в соответствие с приведенным критерием:

$$\beta = Q/Lv,$$

где Q — объемная подача жидкости; L — характерный размер насоса; v — кинематическая вязкость воды.

Из рис. 2 видно, что из приведенных примеров наиболее эффективными по параметру β , который включает как значение КПД, так и характерный линейный размер для реализованных насосов, являются магнетогидродинамический и ультразвуковой насосы, а наименее эффективными — перистальтический и электрогидродинамический [21, 24]. Тем не менее, достаточно долго в микроаналитических системах доминировало применение именно электроосмотического принципа транспорта вещества, что обусловлено рядом свойств этого явления, а именно:

- малой дисперсией распределения линейных скоростей в плоскости поперечного сечения капилляра [21];
- проявлением электроосмотического феномена в большинстве капиллярных систем;
- возможностью использования единого источника энергии для обеспечения питания всех топологических подсистем аналитической системы без применения механических ключей, что удобно для осуществления операций микрогидравличе-

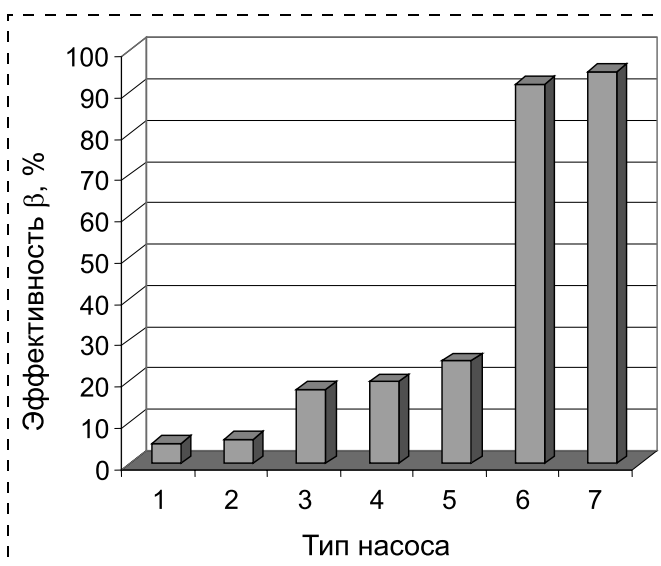


Рис. 2. Приведенная эффективность β микронасосов различного типа:

1 — перистальтический (ПСТ); 2 — электрогидродинамический (ЭГ); 3 — электрохимический (ЭХ); 4 — электрокинетический (ЭК); 5 — магнетогидродинамический (МГД); 6 — клапанный актюаторного типа (КАТ); 7 — ультразвуковой (УЗ)

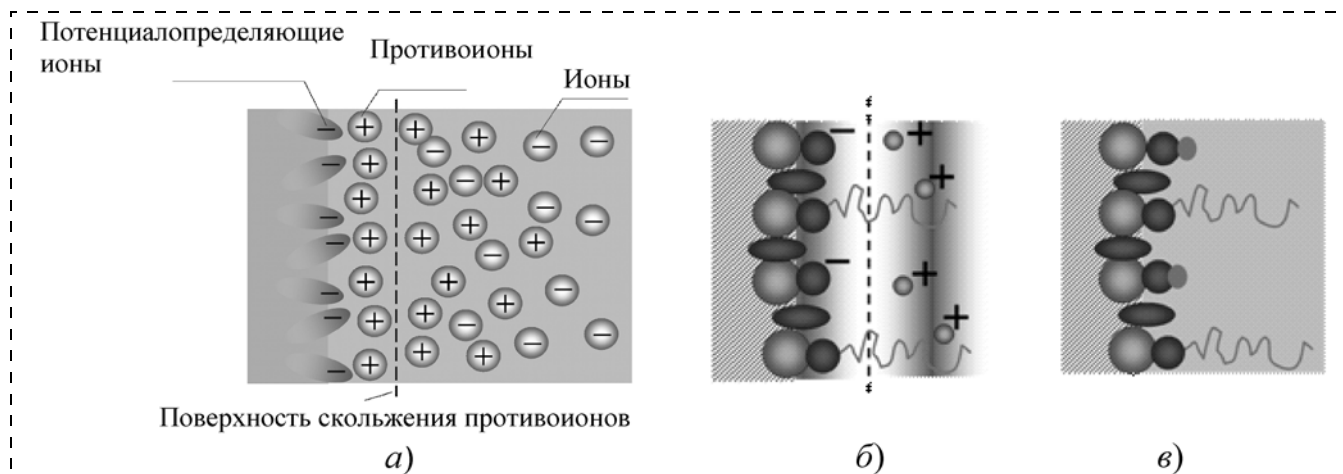


Рис. 3. Схематическое представление электрокинетических эффектов на поверхности SiO_2 :

а — двойной электрический слой на границе раздела поверхность-электролит, б — поверхность SiO_2 , химически модифицированная октадецилсиланом, в — нейтрализация гидроксильных групп триметилсиланом (end-capping), приводящая к невозможности электрокинетических эффектов, штриховая линия — поверхность скольжения противоионов

ской логики в сложном микроаналитическом устройстве.

Следует также учесть традицию применения электроосмотического феномена в капиллярном электрофорезе и электрокинетической хроматографии (в кварцевых капиллярах с внутренним диаметром 10...100 мкм) [2, 4, 18].

Поэтому рассмотрим более подробно возможности электрокинетического капиллярного транспорта. Это явление связано с распределением зарядов на границе раздела твердое тело (стенка капилляра, неподвижная фаза) — жидкость, размером и формой капилляра (рис. 3, а). Производительность процесса коррелирует со значением поверхностного заряда, которое, в свою очередь, связано с концентрацией ионогенных групп на поверхности капилляра, перераспределением объемного заряда или наличием полярных групп. В случае аморфного SiO_2 влияние оказывают диссоциированные гидроксильные группы (рис. 3, б). При их полном экранировании путем химической обработки поверхности (рис. 3, в) электрокинетические эффекты исчезают. Экспериментальное сравнение стандартных дисперсных систем на основе SiO_2 , таких, как хроматографические сорбенты, показывает, что электроосмотическая подвижность μ_{eo} достаточно хорошо коррелирует с удельной площадью поверхности S в такой системе (рис. 4).

Фрагмент пористой среды может выступать в качестве внешнего насоса, передающего импульс жидкости в сопряженном капилляре. В этом случае внешний относительно насоса поток будет иметь обычный параболический профиль скоростей. В качестве насоса может применяться микрофльтрационная мембрана, например из ацетат целлюлозы, марки MFS C020A013A (Advantec MFS, Inc., США), электроосмотические свойства которой измеряли с помощью модуля, представленного на рис. 5, а, б. В табл. 4 приведены полученные значения электроосмотической подвижности в пористой среде ацетатцеллюлозной мембраны и, для сравнения, ранее полученные данные для кварцевых капилляров.

Из табл. 4 видно, что в ацетатцеллюлозной мембране (рис. 5, в) наблюдаются высокие значения электроосмотической подвижности. Интегрирование фрагмента такой мембраны в микрочип, как показано на рис. 5, б, позволяет создать микронасос вне капилляра, который необходим в тех случаях, когда нежелательно приложить к аналиту электрического поля высокой напряженности, в частности, при вводе пробы в капиллярном электрофорезе.

Данные измерения скорости электроосмотического потока в капиллярах, изготовленных из различного материала, представлены в табл. 4.

Одним из применений электроосмотического насосного принципа может быть система охлаждения циклического нагревательного элемента для проведения полимеразной цепной реакции в биохимическом анализе. Проблемой таких реакторов является медленное охлаждение, что приводит к удлинению температурного цикла. С помощью электроосмотического насоса, представляющего собой капиллярный змеевик, соединенный с бассейнами охлажден-

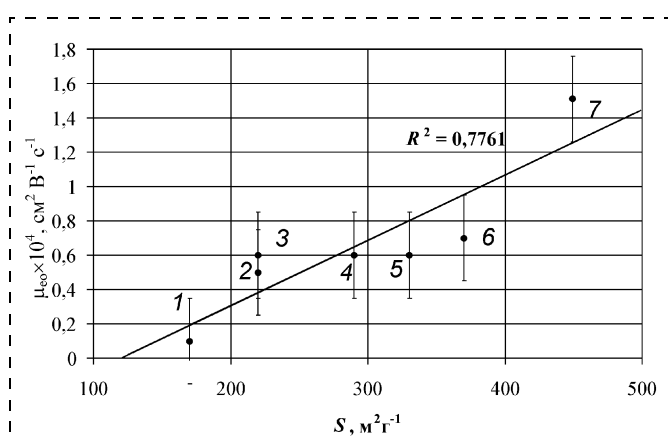


Рис. 4. Зависимость электроосмотической подвижности μ_{eo} в пористой среде хроматографических колонок диаметром 50 мкм из плавленого кварца, заполненных сферическими силикагелями различных марок с диаметром частиц 3 мкм и размером пор 10–25 нм, от значения удельной площади поверхности S [23]:

1 — Hypersil; 2 — Spherisorb ODS; 3 — Spherisorb Diol; 4 — Di-aspher; 5 — Zorbax; 6 — Nucleosil; 7 — LiChrosphere

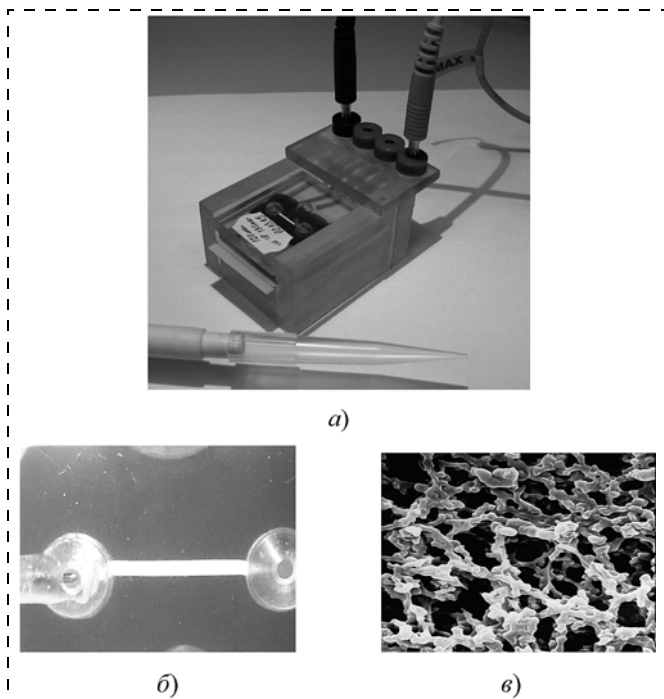


Рис. 5. Измерительная высоковольтная ячейка (а) и модель электроосмотического насосного модуля с размером канала $0,2 \times 15 \times 0,08$ мм (б), материал мембраны: ацетат целлюлозы ($\langle R_n \rangle = 0,2$ мкм, $\psi = 0,8$) (в) [22]

ной жидкости, можно синхронизировать подачу этой охлаждающей жидкости из удаленного инерционного резервуара приложением напряжения, синхронизированного с циклами нагрева-охлаждения (рис. 6).

Тем не менее, в последние годы значительный интерес проявляется и к миниатюрным интегрированным микромеханическим насосам различного типа, роль которых начала возрастать благодаря развитию технологий микросистемной техники. Такие насосы могут обеспечить большую гибкость аналитической системы, функционируют при низких напряжениях и имеют более высокое значение КПД — до 90 %. Электрокинетический транспорт при этом сохраняет свое значение в сепарационных системах: капиллярный электрофорез, хроматография, поскольку он обеспечивает более высокое разрешение компонентов [18].

В последние годы разработан ряд моделей микромеханических насосов, которые различаются конструкцией, производительностью, технологией изготовления [25—27]. Среди них высокую производительность имеют актюаторные клапанные насосы,

обеспечивающие объемную подачу порций жидкости. Их микрореализации характеризует большое разнообразие конструкций и технологий. Перспективным решением, в том числе и для создания одноразовых микроаналитических систем, являются микронасосы с динамическими пассивными клапанами с использованием пьезоэлектрического принципа актюации, реализуемого, в частности, на основе пленочных технологий.

Динамические пассивные клапаны представляют собой систему диффузор/конфузор, т. е. уширение (или сужение) жидкостного канала, которое изменяет динамику жидкости так, что сопротивление жидкости в одном направлении выше, чем в другом, а это вызывает разные скорости потока в этих двух направлениях для одного и того же приложенного давления. На рис. 7 представлены геометрические параметры отдельного элемента — конфузора (диффузора). Если жидкость в представленном на рис. 7 элементе движется слева направо, то элемент действует как диффузор, в противоположном направлении — как конфузор.

Изготовлена модель насоса, в которой вход диффузора имеет закругленные углы (радиус кривизны $r = 100$ мкм) и ширину $w_1 = 100$ мкм, а выход — острые углы и ширину $w_2 = 500$ мкм. Длина диффузора $L = 2,3$ мм, что определяет угол $2\theta \approx 10^\circ$.

Высота элемента $h = 50 \dots 80$ мкм, определяется толщиной фоторезистивного слоя. Поперечное сечение входной и выходной областей диффузора задается как: $A_1 = w_1 \cdot h = (0,5 \dots 1) \cdot 10^{-8}$ м², $A_2 = w_2 \cdot h = (2,5 \dots 5) \cdot 10^{-8}$ м², соответственно. Диаметр насосной камеры 7 и 5 мм (в двух вариантах), и ее глубина в слое подложки ПММА увеличивалась с помощью горячего прессования до $H \approx 100$ мкм. Использование пьезоэлектрического актюатора совместно с пленочной мембраной с высокой способностью отклонения позволяет получать высокий коэффициент сжатия ε между ударным объемом и мертвым объемом насосной камеры. Как правило, для мембранного отклонения 10 мкм, степень сжатия $\varepsilon = 0,1 \dots 0,17$. Такое высокое ε делает насос самозаполняющимся и толерантным к пузырькам.

Моделирование потока жидкости в диффузоре и конфузоре было выполнено в Центре микротехнологии и диагностики Б. Н. Цветковым с помощью программы "FLUENT 6.2".

Геометрия диффузорного клапана задавалась в соответствии с рис. 7: глубину клапана при расчете полагали равной $D = 250$ мкм. На вход системы (конфузора или диффузора) подавали постоянное давление $P = 1000$ Па. Полученный результат рас-

Таблица 4

Сравнительная эффективность электроосмотического транспорта

Материал насосного тела	Ацетат целлюлозы		Силикагель	Полиметилметакрилат (капилляр 30×10 мкм)	Стекло Крон-8
Электролит	Солевой буферный раствор*	Деионизованная вода	0,01 НЕРЕС, pH 8	Солевой буферный раствор*	Деионизованная вода
$\mu_{eo} \cdot 10^8, \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	1,67	1,2	1,6	1,0—1,2	0,03

* 0,01 моль/л раствор Трис-HCl, pH 8

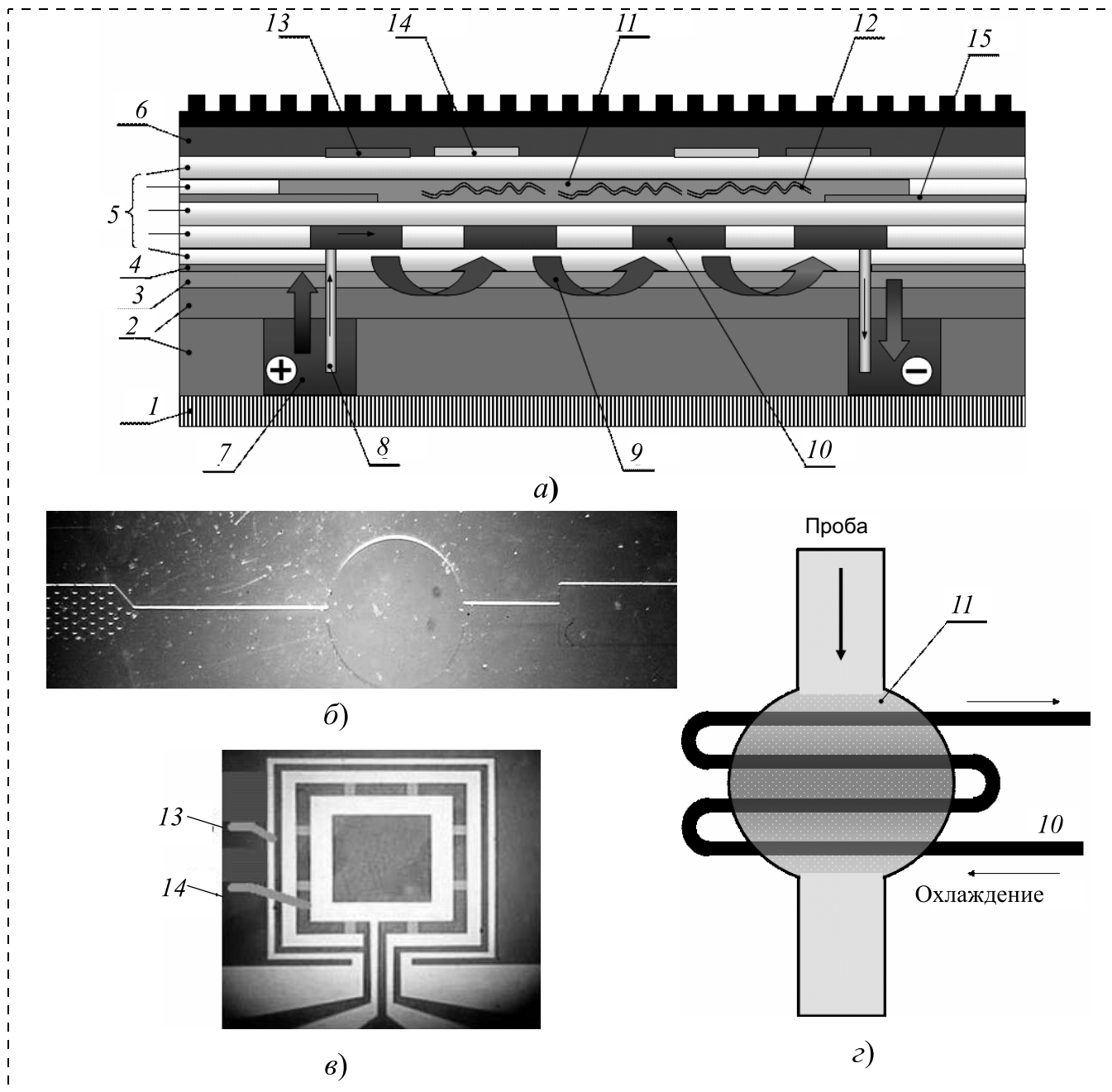
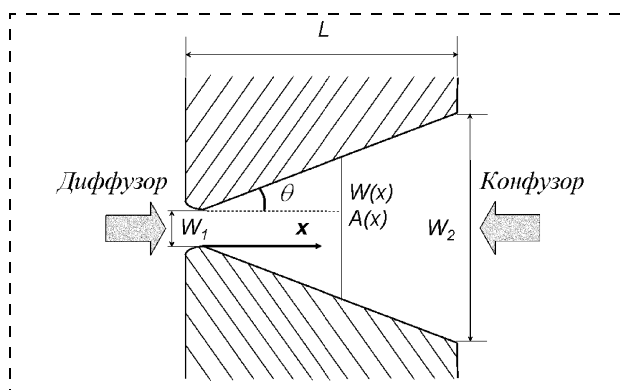


Рис. 6. Модуль для генного анализа с термоциклером и системой водяного охлаждения:

a — схематическое представление сечения модуля; *б* — вид капиллярной системы аналитического чипа; *в* — фотография реактора; *г* — схема расположения охлаждающего змеевика; 1 — элемент Пельтье; 2 — термоизолирующий материал; 3 — кремниевая или полимерная подложка; 4, 15 — тоководные ламели; 5 — многослойный капиллярный микрочип, материал SU-8; 6 — кремниевая подложка реактора; 7 — охлажденная жидкость; 8 — капилляр для подачи жидкости и электрод высокого напряжения; 9 — направление движения охлаждающей жидкости; 10 — поперечное сечение охлаждающего змеевика; 11 — камера генного реактора; 12 — фрагмент ДНК; 13 — нагревательный элемент; 14 — температурный датчик

Рис. 7. Определение геометрических размеров диффузорного элемента микронасоса



чета распределения давления и модуля скорости в канале представлен на рис. 8. Из рис. 8, а видно, что на входе диффузора возникает спад давления, которое затем остается практически постоянным (цветная шкала значений давления задается в паскалях). Скорость потока (рис. 8, в) также падает (направлена слева направо) по мере удаления от входа. Цветовая шкала модуля скорости потока представлена в метрах в секунду. На рис. 8, б представлено распределение давления при подаче давления на вход конфузора (движение жидкости справа налево). Изменение давления (рис. 8, г) происходит более равномерно, а скорость увеличивается по мере приближения к выходу конфузора.

Расчеты проведены для воды ($\rho = 1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$; кинематическая вязкость $\nu = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$). Число Рейнольдса Re для диффузора определяется как $Re = \frac{\bar{u}_1 \cdot w_1}{\nu} \leq 100$ для характерной скорости потока через узкую область диффузора $u_1 = 1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, что свидетельствует о развитии ламинарного режима течения. Собственная частота клапана составляет $f_{\text{кл}} = 284 \text{ Гц}$. Зависимость расхода жидкости от длительности импульса мембраны на выходах диффузора и конфузора позволяет определить расчетный КПД микронасоса на основе динамических пассив-

ных клапанов, который составил для приведенной геометрии в оптимальном режиме 23 %. Такое значение КПД соответствует эффективности электроосмотического и эжекционного насоса, однако оно ниже, чем эффективность насоса с активными клапанами. Тем не менее, следует учитывать технологичность, низкую стоимость и простоту изготовления динамических пассивных клапанов, в частности, с помощью технологий печатных плат. Так, позитивные фотошаблоны построены в программе "P-CAD 2002" (рис. 9), а макетные образцы изготовлены на основе полимерных подложек с микрорельефом, полученным путем фотохимикофизической обработки в слое двухкомпонентной фотополимерной композиции на эпоксидной основе XV501T ("Koytc", Англия), содержащей резист "GAWN 1096 Resist" и отвердитель "GAWN 1097 Hardener" в соотношении 2:1.

Использовали пьезоэлементы на базе порошка ЦТС-19 фирмы "Аврора-ЭЛМА" (г. Волгоград). Проводящий материал электрода — монель-металл и серебро (сплав Ni с Cu (27–29 %), Fe (2–3 %) и Mn (1,2–1,8 %)). Резонансные частоты для пластинок размером $5 \times 5 \text{ мм}$ и толщиной от 0,16 до 0,4 мм находятся в диапазоне 2...10 кГц. Получены скорости объемной подачи до $1 \text{ мкл} \cdot \text{мин}^{-1}$.

Приведенные данные показывают, что изготовление интегрированных насосных модулей возмож-

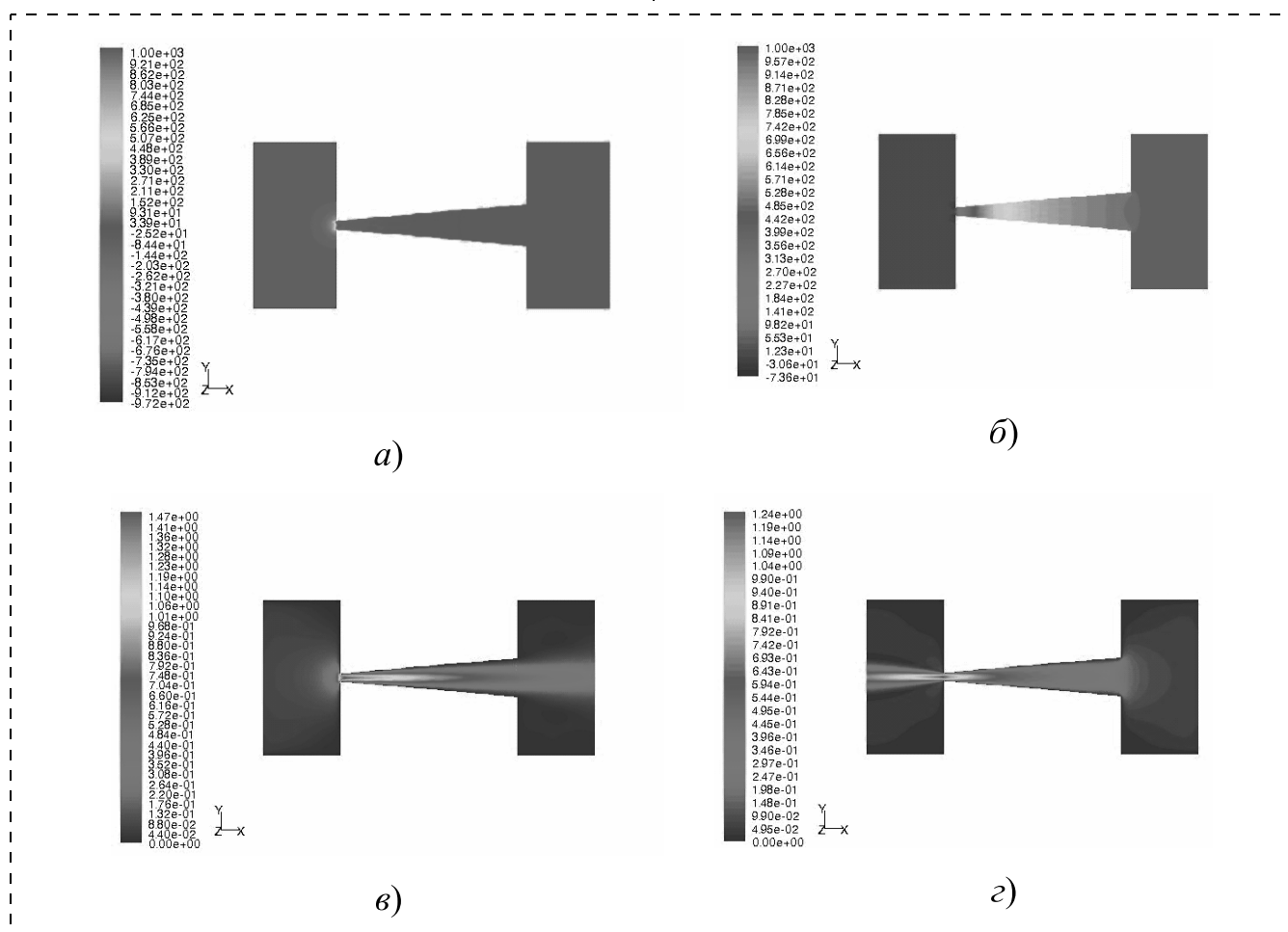


Рис. 8. Распределение давления при подаче 1000 Па на вход диффузора (а) и конфузора (б); распределение модуля скорости при тех же условиях в диффузоре (в) и конфузоре (г)

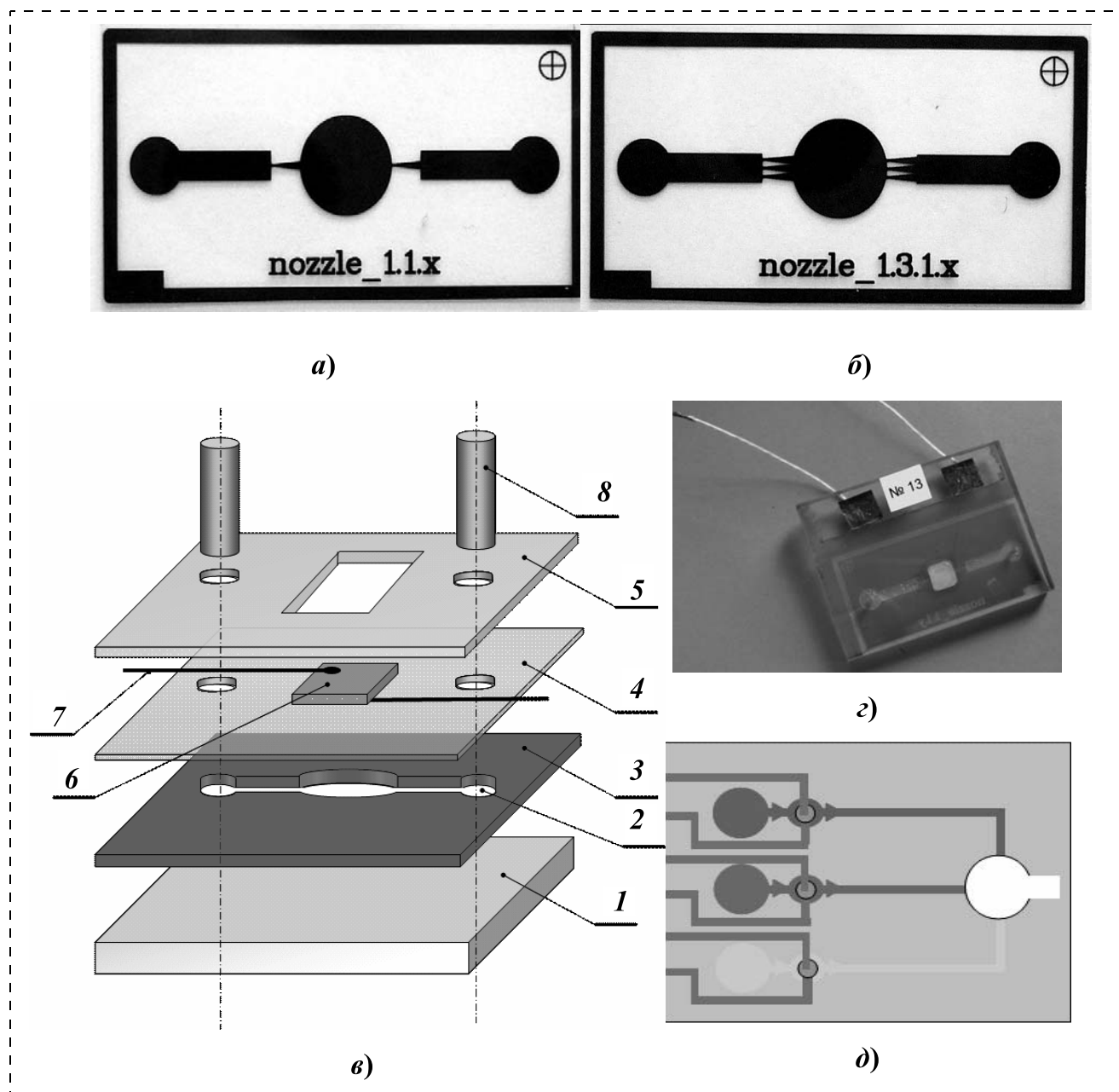


Рис. 9. Фотошаблоны модели насоса с динамическими пассивными клапанами: одинарный (а) и тройной (б) диффузор/конфузор; эскиз сборки (в), фотография лабораторной модели на основе полимерных материалов и пьезоэлектрического актюатора (г); схема аналитической системы с тремя насосами (д);

1 — полимерная подложка; 2 — рельеф из фоторезиста; 3 — бассейн; 4 — герметизирующая пленка; 5 — жесткая крышка; 6 — пьезокерамическая пластина; 7 — электропроводные ламели; 8 — входной резервуар для загрузки вещества

но на одноразовых аналитических микрочипах на полимерной основе, например, в микрофлюидном чипе, приведенном на рис. 9, д.

2. Сепарация и разделение на компоненты

Современный химический анализ трудно представить без разделения пробы на компоненты, например, с помощью хроматографии или электрофореза.

Рассмотрим интегрированный на микрофлюидном чипе вариант хроматографии. Основным средством разделения пробы на составляющие является хроматографическая колонка — пористая среда с перфузионными свойствами, ограниченная, как правило, цилиндрической или, в случае планарного ва-

рианта, плоскопараллельной поверхностью (рис. 10). Пространственная структура и свойства поверхности пористой среды (сорбента) определяют ее способность разделять вещества. Колонка может представлять собой плотно упакованную сферическими пористыми частицами среду, а может являться "монокристаллической" пористой структурой. В первом случае очень важна плотность упаковки частиц, поскольку наличие пустот в перфузионных каналах приводит к ухудшению эффективности разделения, количественно оцениваемой так называемым числом теоретических тарелок $N = (t_r/\sigma)^2$ и соответствующей высотой эквивалентной теоретической тарелки $H = L/N$, где L — длина колонки; t_r — время удерживания.

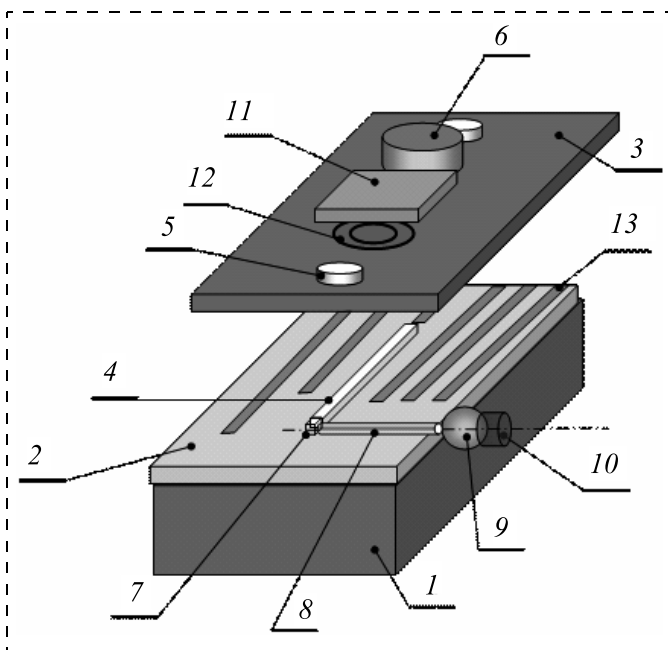


Рис. 10. Схема хроматографического микрофлюидного чипа:

1 — база; 2 — слой с рельефом топологии микрофлюидной системы; 3 — крышка, являющаяся светофильтром и содержащая микрооптический элемент; 4 — колонка; 5 — порт жидкостного доступа; 6 — реактор; 7 — детекторный объем; 8 — оптоволокно; 9 — шаровая линза; 10 — светодиод; 11 — фотодиод; 12 — киноформ; 13 — тоководные ламели

живания зоны вещества; σ — стандартное отклонение зоны вещества.

Получение плотных упаковок дисперсных сред и порошков, является самостоятельной физико-химической и технологической задачей, имеющей важное прикладное значение. Учитывая характерный размер пор сорбентов (10...50 нм) и участие пор в процессе упаковки можно отнести его к разделу нанотехнологий [14 — 16]. При использовании метода прокачки суспензии сорбента, плотная упаковка получается в том случае, когда на частицу действует достаточная сила Стокса при ее приближении и соударении с растущим слоем упакованной среды. При уменьшении размера частиц, массовые силы, отвечающие за инерционное движение частицы, становятся соизмеримыми с поверхностными силами — трением, адгезией. В результате скорость частиц снижается, за счет отклонения их траектории. Найденное решение этой проблемы (путем снижения сил трения между частицами и жидкостью) иллюстрируется на рис. 11.

Из рис. 11, а видно, что при термодинамически оптимальном подборе суспензионной среды и при

наличии в ее составе поверхностно-активных веществ, частица приобретает промежуточный слой, сглаживающий шероховатость поверхности и снижающий трение частицы при вращении и поступательном движении. В случае высокого термодинамического сродства среды и частицы ее поверхность "оголена" и имеет более высокую шероховатость. При термодинамически невыгодном взаимодействии частицы и среды образуются агрегаты за счет капиллярных связей через остаточные количества термодинамического антагониста среде, имеющего сродство к частицам. Эти агрегаты обычно рыхлые и устойчивые. Их присутствие делает получение плотной упаковки трудно достижимой. Качество суспензии проявляется при измерении ее кинематической вязкости. При наблюдении низких значений относительной вязкости (ниже теоретического предела для гладких идеальных сфер, полученного Эйнштейном) можно говорить об эффекте "подшипника", как показано на рис. 11, б [19]. Плотная упаковка колонки дает возможность повысить число разделяемых компонентов, снизить время анализа и размеры колонки. На рис. 12 представлена хроматограмма ароматических углеводородов, полученная на колонке, изготовленной на основе данной технологии из полимерной трубки диаметром 500 мкм, упакованной сферическим силикагелем с размером частиц 5 мкм и размером пор 10 нм. Эффективность разделения — 10^5 т. т/м (т. т — теоретические тарелки) [19].

Изготовление колоночных модулей с помощью микротехнологий позволяет применять принцип снижения вязкости суспензии в едином технологическом цикле изготовления хроматографического модуля, как представлено на рис. 13.

В данном случае уплотнение упаковки происходит в оптимизированной с точки зрения трения частиц среде с помощью вибрационного воздействия заданной энергии и частоты (рис. 13, а). После уплотнения суспензия осушается (рис. 13, б) и дополнительно уплотняется путем термокомпрессионного воздействия (рис. 13, в). Применение термопласта позволяет дополнительно повысить плотность упаковки за счет минимизации пристеночных эффектов (рис. 13, в).

Принимая во внимание данные о корреляции приведенному значению сопротивления колонки и ее эффективности, сравним различные колонки (описание в подписи к рис. 14), упакованные суспензионными методами, и планарные колонки, приготовленные описанным выше методом. Из рис. 14 видно, что планарные колонки, изготовленные из

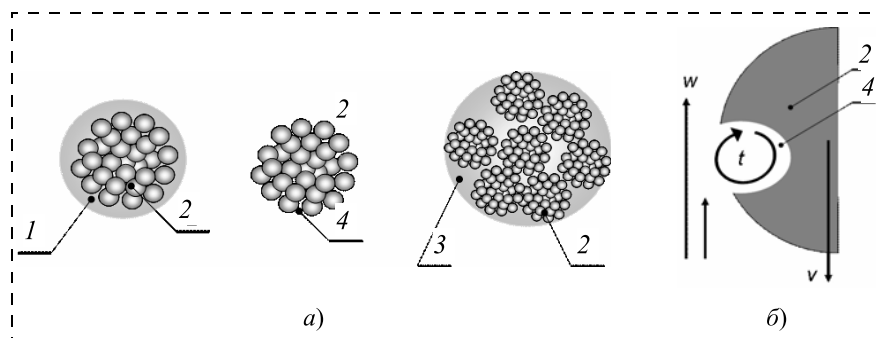
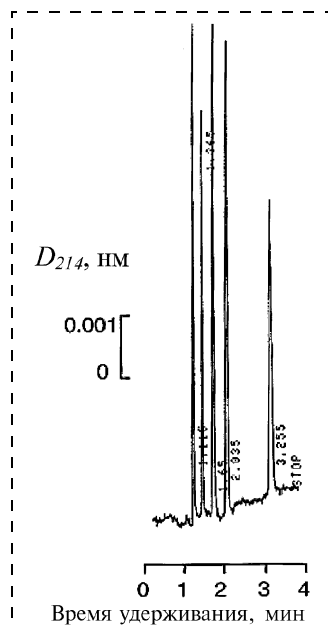


Рис. 11. Схематическое представление состояния силикатных сферических пористых сорбентов в суспензии при изменении состава суспензионной среды (а) — слева направо: единичная частица, покрытая подвижным слоем; частица с "оголенной поверхностью" в результате влияния сильного растворителя; 1 — связанный слой дисперсной среды; 2 — частица SiO_2 ; 3 — агрегат из частиц SiO_2 , связанных капиллярными силами; 4 — пора; агрегат частиц, связанный капиллярными силами; эффект гидродинамического подшипника при движении пористой сферы в жидкой среде (б) (v — направление движения частицы SiO_2 ; w — направление набегающего потока; t — направление вихревого движения в поре



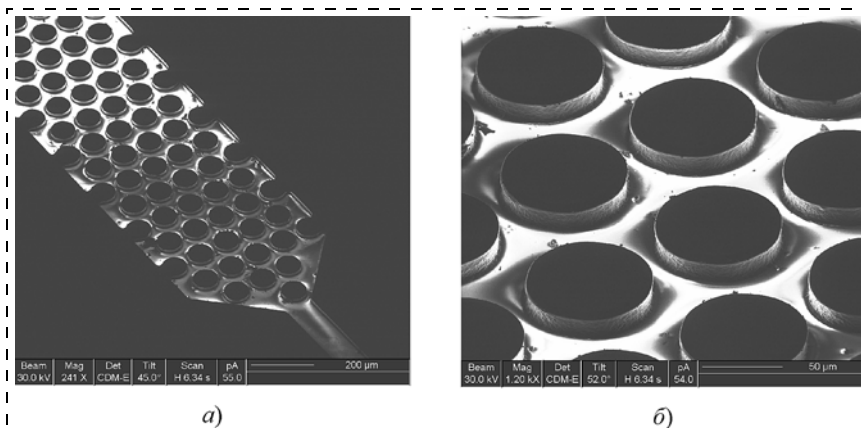


Рис. 15. Сепарационные дорожки, выполненные методом фотолитографии. Канал для разделения фрагментов ДНК, выполненный из фоторезиста SU-8 на стекле (а) и кремнии (б)

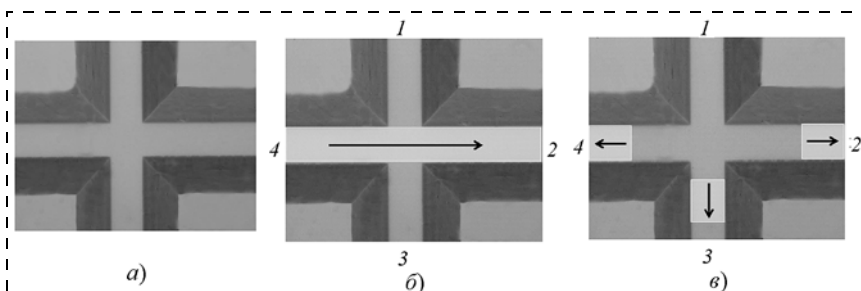


Рис. 16. Схематическое представление инжекционного креста как элементарного звена системы микрогидравлической логики в интегрированной лаборатории-на-чипе и точечного ввода пробы в сепарационный канал:

а — инжекционный крест, выполненный в стекле Крон-8; б — заполнение дозирующего объема; в — впрыск анализируемой зоны в сепарационную систему ($1 - U_1$; $2 - U_2$; $3 - \text{"земля"}; 4 - U_3$)

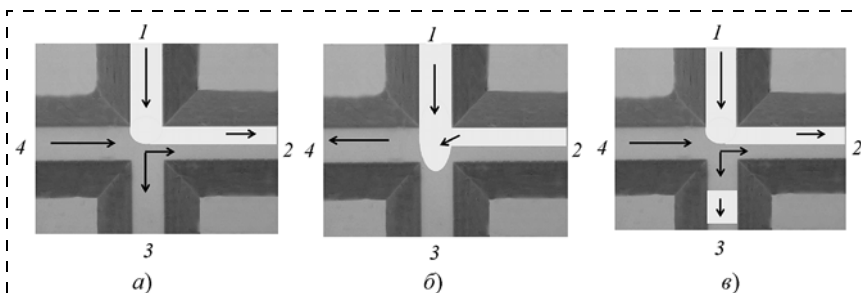


Рис. 17. Ввод узкой зоны в разделительный канал методом "плавающей земли":

а — стационарное течение сопутствующих струй образца и растворителя из перекрестья в 2; б — мгновенное прерывание соединения с "землей"; в — восстановление стационарного течения ($1 - U_1$; $2 - U_2$; $3 - U_3$; $4 - \text{"земля"}$)

на рис. 17. В этом варианте инъекции не нужно останавливать потоки, что является преимуществом для применения в микроаналитических системах непрерывного действия. На первой ступени процесса (позиция 1 ключа) (рис. 17, а) формируются стационарные несмешивающиеся струи от 1 к 2 и от 4 к 3. Заметим, что в приведенном ранее примере движение жидкости организовано в результате электроосмотического эффекта, когда при электроотрицательном ζ -потенциале поверхности каналов, при приложении электрического поля к электролиту, заполняющему канал вдоль канала, движение жидкости происходит в направлении отрицательного электрода. Тогда на второй ступени процесса мгновен-

ное размыкание контакта в позиции 4 ("земля") приводит к выбросу вещества в канал 3 (рис. 17, б). После восстановления условий ступени 1, на третьей ступени процесса (рис. 17, в), зона вещества мигрирует в направлении 3 к сепарационному каналу аналитической системы. Соотношение значений приложенного напряжения для реализации данной схемы: $|U_1| > |U_2|$; $|U_3| > |U_2|$.

Применение инжекционного креста имеет серьезный недостаток — это размытие границы пробы вследствие диффузии и конвекции. Дополнительное применение несмешивающейся жидкости (жидкой заглушки), например жидкого углеводорода, позволяет устранить смешивание жидкостей. Регулирование заглушки осуществляется с помощью управляемого электроосмотического или гидростатического давления.

Представляют интерес и другие подходы, например, на основе капельной инъекции с помощью пьезоэлектрических клапанов [29], или применение ключей, содержащих клапаны актюаторного типа (рис. 18).

4. Детектирование

В микроаналитических системах реализуются практически все физические принципы детектирования, традиционно используемые в аналитических приборах [5, 13]. Следует отметить, что особое место здесь занимает принцип биораспознавания [30]. Перечень основных принципов детектирования приведен в табл. 5.

Биораспознавание. Молекулярное распознавание и связывание является основой биологического явления иммунитета, проявляющегося в способности организма к распознаванию и связыванию всех чужеродных веществ (антигенов) с помощью вырабатываемых им специфических веществ (антител) [30]. Этот молекулярный меха-

низм, основанный комплементарности пептидных участков антигена и антитела заложен в основу иммунных методов анализа, широко применяющихся в медицинской диагностике. Одним из способов учета реакции связывания антиген-антитело является наблюдение за флокуляцией (агглютинацией) латексных частиц, несущих на своей поверхности соответствующие биораспознающие компоненты, как схематически представлено на рис. 19 для двух типов латексных препаратов: антигенного (рис. 19, а) и антительного (рис. 19, б) [12].

При сопряжении микрочиповых платформ с видеоцифровыми сенсорами и источниками излучения, возможна регистрация изображений, связанных с агг-

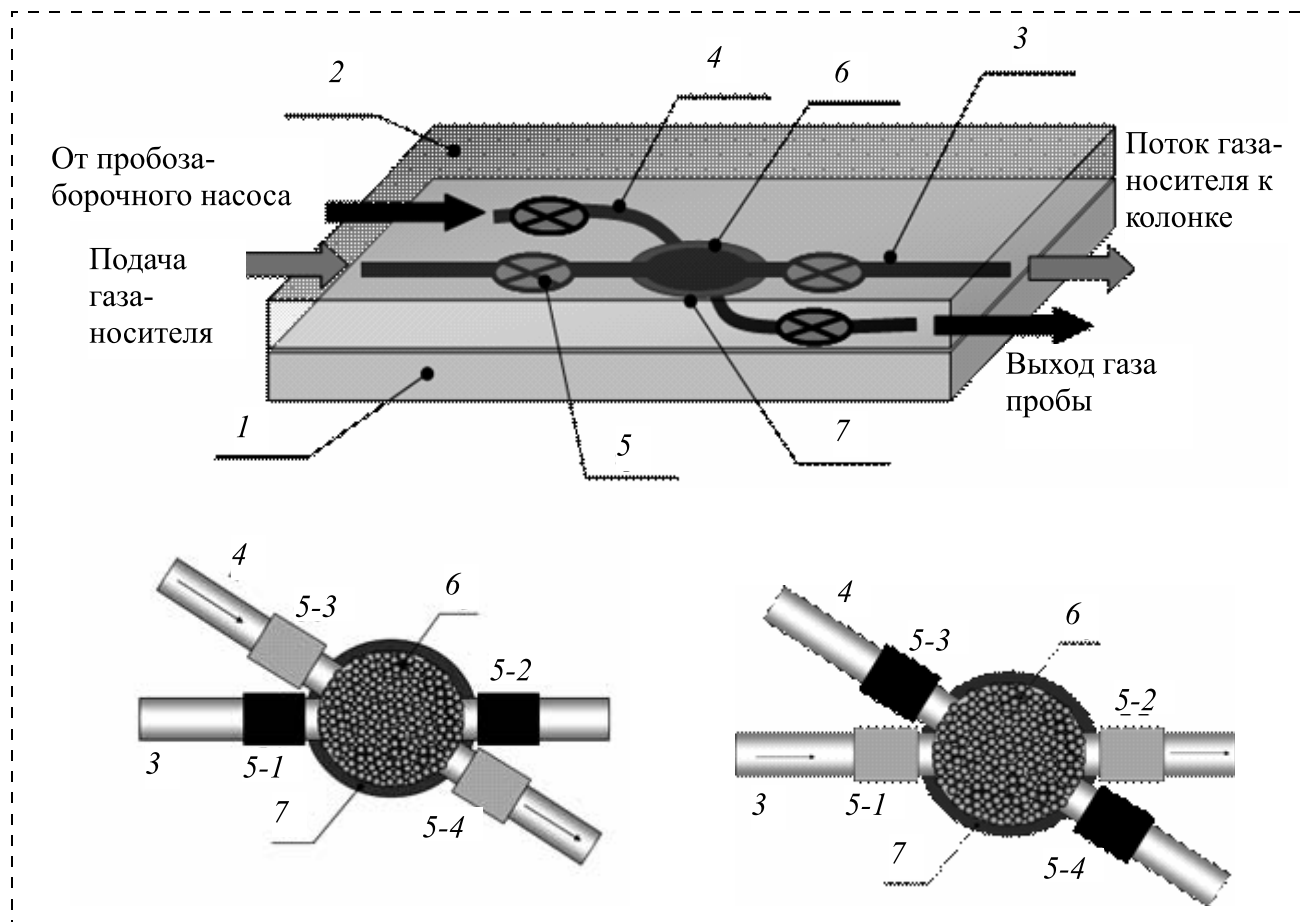


Рис. 18. Схема дозирования пробы с имитацией четырехходового крана, ключей и адсорбционного концентратора (а) и схема направления потоков при заполнении концентратора (б) и при вводе пробы (в)

лютинацией латексных частиц в результате антиген-антительного связывания патологического фактора в матрице. Оптическая схема представлена на рис. 20.

Флюориметрическое детектирование. Развитие элементной базы микроэлектроники открывает возможности разработки многоканальных микроплат-

форм для массового биомедицинского анализа. В данном случае представляет интерес флюориметрическое детектирование как метод, обладающий высоким квантовым выходом излучения и позволяющий детектировать вплоть до нескольких десятков молекул флюорофора [31].

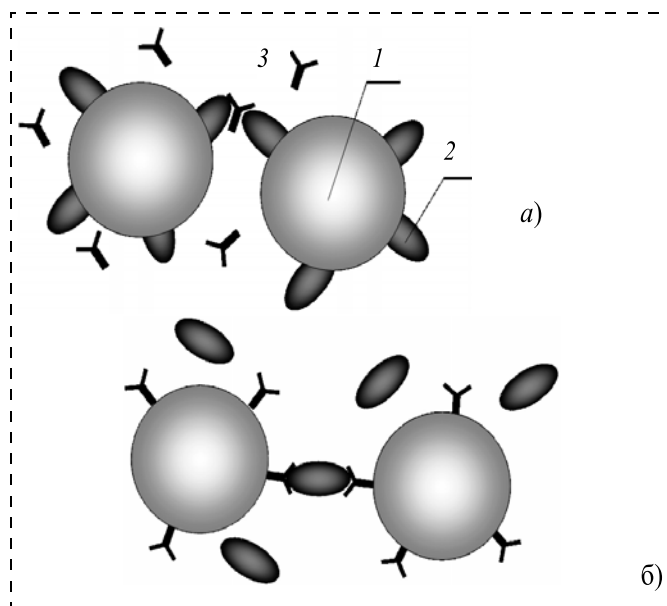


Рис. 19. Принцип латексной диагностики:
1 — латексная частица; 2 — антитело; 3 — антиген

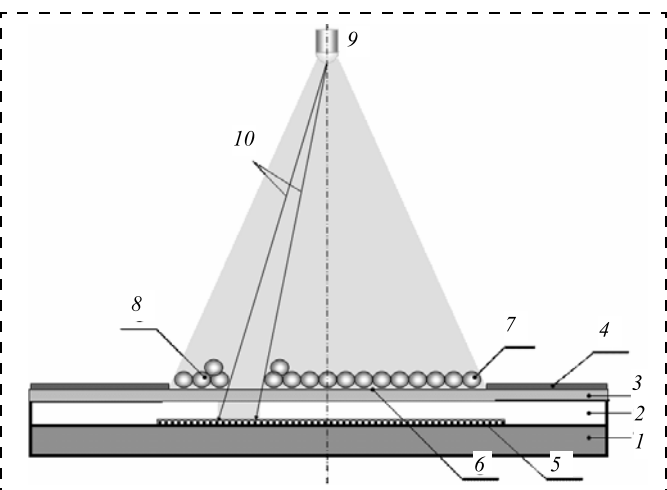


Рис. 20. Схема датчика для оптической регистрации реакции иммунной латекс-агглютинации в проходящем свете с помощью микроплатшета, сопряженного с видеосенсором:

1 — база; 2 — воздушный зазор; 3 — подложка микрочипа; 4 — рельеф микрочипа; 5 — КМОП-сенсор; 6 — лунка; 7 — частица латекса; 8 — агрегат латексных частиц; 9 — источник излучения; 10 — проходящий свет

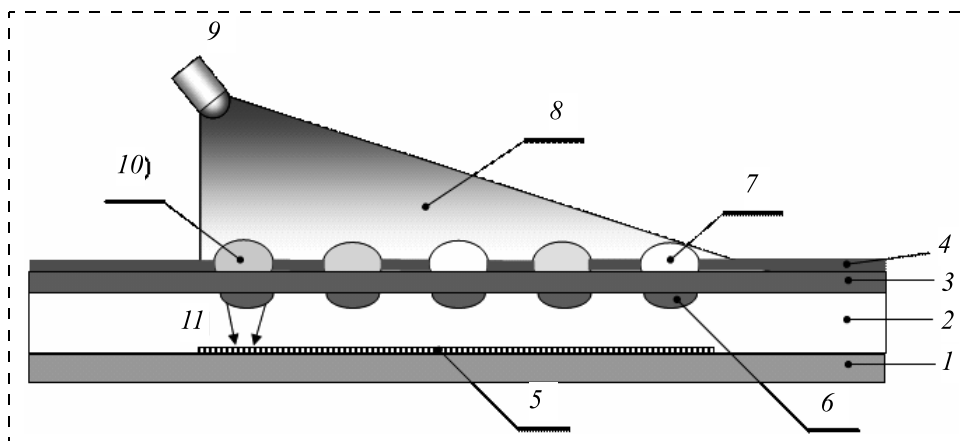


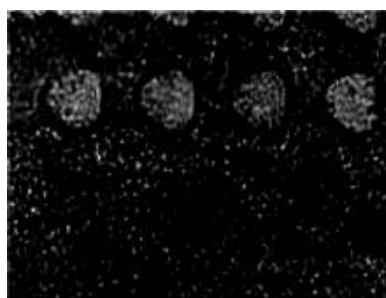
Рис. 21. Схема датчика для оптической регистрации реакций иммунофлюоресцентного, генного и других видов анализа, включающих вторичное излучение в видимой области с помощью микропланшета, сопряженного с видеосенсором:

1 — база; 2 — воздушный зазор; 3 — подложка микрочипа; 4 — рельеф микрочипа; 5 — КМОП-сенсор; 6 — микролинза; 7 — капсула с контрольным раствором; 8 — поток первичного излучения; 9 — источник излучения; 10 — капсула с аналитом; 11 — направление потока флуоресценции к видеосенсору

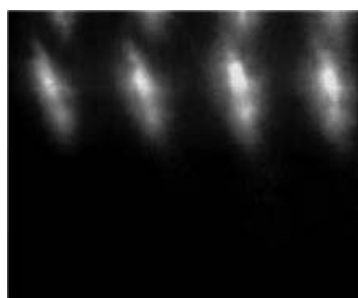
Детектирование сверхмалых количеств флюорофора, таких как 10^{-18} моля и менее, требует оптимизации оптической схемы. Одним из приемов, позволяющим поднять уровень сигнала на один-два порядка, является повышение светосилы оптической схемы, т. е. повышение апертуры приема сигнала светочувствительным элементом (рис. 21). На рис. 22, а представлен вид записи с помощью КМОП-матрицы сигнала флуоресценции микролунок планшета, содержащих каждая по 200 нл раствора флуоресцеина концентрации 10^{-8} моль $\cdot$ л $^{-1}$. На рис. 22, б представлены такие же, как на рис. 22, а, образцы, но на платформе с сопряженными с микролинзами, выполненными в термопласте.

Очевидно существенное повышение отношения сигнал/шум в результате выполнения рельефа в едином технологическом цикле с термокомпрессионной обработкой микроплатформы. На рис. 22, д представлены данные измерения светового потока флуоресценции для случаев, показанных на рис. 22, а, б, по рибофлавины.

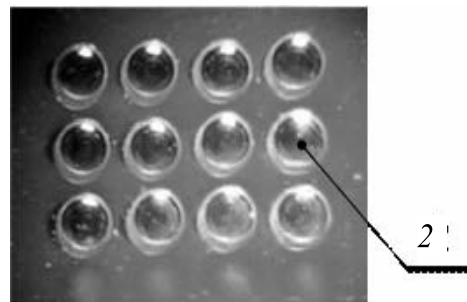
Схема флуориметрического детектора для точечного анализа в капилляре представлена на рис. 23, а. С появлением на рынке сверхярких светодиодных источников излучения (СД) такие схемы могут создаваться на их основе без использования дорогостоящих лазеров. В представленной схеме применен оптоволоконный световод (рис. 23 б, в) для на-



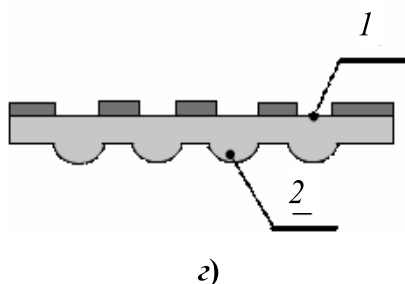
а)



б)



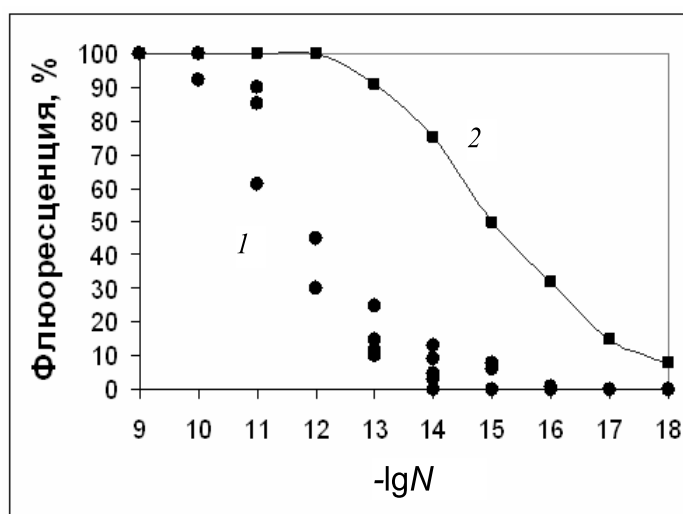
в)



г)

Рис. 22. Измерение предела обнаружения флюорофора в лунках различного объема, сопряженных с КМОП-матрицей:

а — флуоресценция флуоресцеина, 10^{-8} моль $\cdot$ л $^{-1}$, в лунке объемом 0,2 мкл; б — то же на платформе с микролинзами; в, г — фотография и схема поперечного разреза микроплатформы с лунками для образцов, сопряженными с микролинзами (1 — лунка; 2 — микролинза); д — экспериментальные данные по регистрации флуоресценции на обычной (1) и усовершенствованной (2) платформе



д)

Принципы детектирования

Принцип	Конструктивно-технологическое решение
Биораспознавание, гибридизация	Иммобилизация активных биомолекул, синтез на поверхности
Химическая реакция	Иммобилизация ионов, реагентов
Поглощение света	Источник излучения малой апертуры. Фотоприемник
Преломление света	Источник излучения малой апертуры. Фотоприемник
Флуоресценция	Источник первичного излучения. Система сбора вторичного излучения
Светорассеяние	Лазерный источник излучения, приемник сверхмалой апертуры

правления светового потока в заданную точку канала [13,15].

Детектирование сигнала лазерного квазиупругого рассеяния. Показано, что макромолекулярные процессы в капилляре можно регистрировать с помощью лазерного Доплеровского светорассеяния [32]. Оптическая схема представлена на рис. 24. Реализация такой схемы позволяет достигать высоких электрофоретических скоростей макромолекул, например белков, за счет высоких значений напряженности поля в капилляре при токах до 1 мкА и эффекту стабилизации потока стенками, наподобие капиллярного электрофореза. При этом планарное исполнение дает возможность достичь оптического качества окон, не искажающих волновой фронт, что существенно для получения сигнала Доплеровского светорассеяния [32].

Детектор на основе поверхностных акустических волн (ПАВ). Химический твердотельный сенсор поверхностных акустических волн (ПАВ) представляет собой микронное устройство, преобразующее изменение свойств среды в электрический сигнал. Химический микросенсор ПАВ содержит миниатюрную подложку из отполированного пьезоэлектрического материала (например, ниобата ли-

тия) и сформированные на ее поверхности встречно-штыревые преобразователи (ВШП), как показано на рис. 25. Если на одну из систем ВШП подается высокочастотное напряжение, то на поверхности пластинки за счет обратного пьезоэффекта генерируется поверхностно-акустическая волна. Эта волна затем распространяется вдоль поверхности пластинки до тех пор, пока не попадет на другую систему ВШП, где она преобразуется в высокочастотное напряжение. Подложка имеет контакт со средой, содержащей аналит, при адсорбции с подложкой которого происходит изменение характеристик поверхностно-акустической волны, таких как фазовая скорость, амплитуда и частота.

ПАВ характеризуются высокой чувствительностью изменения скорости распространения поверхностно-акустической волны к любым изменениям свойств поверхности, так как их чувствительность растет пропорционально квадрату рабочей частоты прибора, а охватываемый диапазон рабочих частот изменяется от десятков мегагерц до нескольких гигагерц.

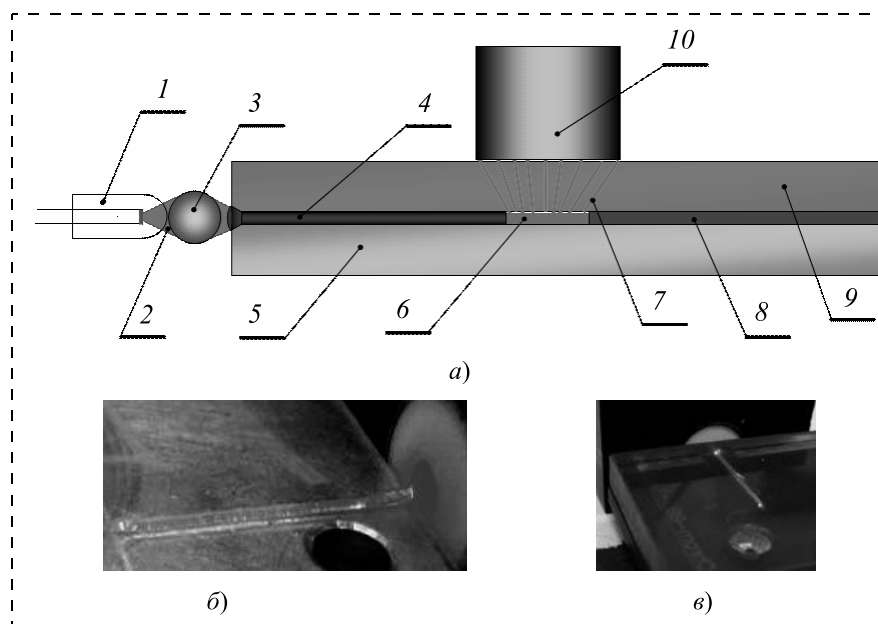
Область распространения ПАВ между системами ВШП используется в сенсорных устройствах в качестве чувствительной области. Любое изменение физических параметров среды (температуры, давления) оказывает влияние на рабочую частоту ПАВ прибора. Это явление используется в данном типе датчиков в качестве сенсорного эффекта. В общем случае для определения концентрации газов можно измерять изменение амплитуды, скорости или частоты поверхностно-акустической волны. Наиболее простым, надежным и точным методом является измерение сдвига частоты. То есть в качестве сенсорного эффекта в данном типе датчиков используется различие рабочих частот поверхностно-акустической волны прибора в различных средах.

5. Пробоподготовка

Рассмотрим более подробно операцию предварительной подготовки пробы с помощью пористой мембраны.

Рис. 23. Сечение электрофоретического микрочипа в области детектора флуоресценции пространственно выделенной зоны флуорофора в капилляре:

1 — светодиод; 2 — направление первичного излучения; 3 — шаровая фокусирующая линза; 4 — световодный канал с входной микролинзой; 5 — база; 6 — капилляр с флуорофором; 7 — вторичное флуоресцентное излучение; 8 — фоторезистивный материал, формирующий рельеф; 9 — крышка из прозрачного диэлектрика оптического качества, служащая светофильтром; 10 — фотоприемное устройство (фотодиод с предусилителем)



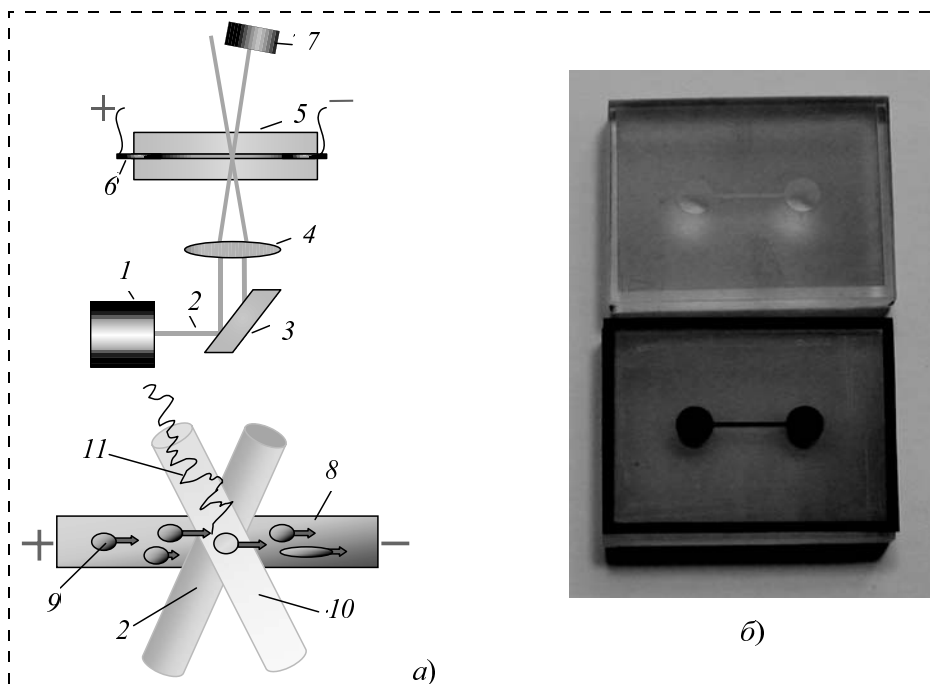


Рис. 24. Схема приема сигнала рассеянного света при капиллярном электрофорезе:

1 — лазер; 2 — направление луча лазера; 3 — светоделительная пластинка; 4 — фокусирующая линза; 5 — микрочип с капилляром; 6 — электроды для электрофореза; 7 — фотоприемный модуль; 8 — объем измерительного капилляра; 9 — частицы, мигрирующие в поле; 10 — гетеродинамирующий луч; 11 — сигнал (биения мощности потока рассеянного пучка)

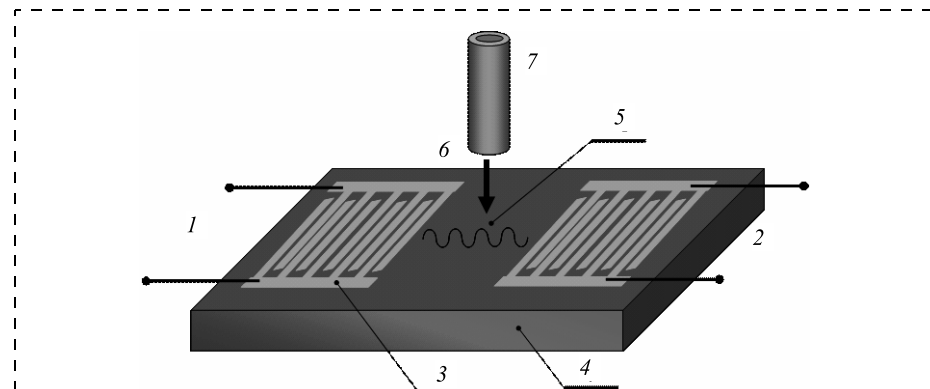


Рис. 25. Схематическое представление ПАВ микросенсора:

1 — входной сигнал; 2 — выходной сигнал; 3 — встречно-штыревые преобразователи; 4 — пьезоэлектрическая подложка ($128^\circ - Y - X \text{ LiNbO}_3$); 5 — область детектирования; 6 — направление газообразной пробы; 7 — выходной капилляр пробоотборника

Мембранная фильтрация. На рис. 26, а представлена наномембрана на базе анодного оксида алюминия, выполненная в ИЭ АНБ, на рис. 26, б представлена мембрана из лавсана, полученная методом бомбардировки тяжелыми ионами (Трейдпор, Москва). Представляется очевидным преимущество наномембран, полученных методом нанотехнологий, на которых положение и размер пор заданы с высокой точностью. Это свойство позволяет контролировать проницаемость мембраны при разделении веществ с близкими размерами, таких как клетки крови. При диагностическом применении получение полной выборки клеток заданного типа становится особенно важным, так как в противном случае результаты будут недостоверными. Мембранная пробоподготовка в настоящее время привлекает внимание

именно благодаря появлению мембран нового поколения (рис. 26, а). Мембраны в сочетании с видеоцифровыми средствами позволяют проводить диагностику вирусных инфекций в крови на основе мембранного выделения лимфоцитов, селективного присоединения к ним флуоресцентных меток по принципу молекулярной комплементарности с последующей обработкой цифрового массива. На рис. 26, в и г представлены данные 3D численного моделирования, выполненного специалистами ООО "Софтмипакт", потоков образца крови в микроциповом мембранном модуле.

Интегрирование полупроницаемой мембраны с прецизионными порами заданного размера в капиллярную систему с возможностью управляемого транспорта реагентов и сопряжение мембраны с видеоцифровым сенсором позволяет реализовать компактные экспрессные системы для иммунодиагностики опасных инфекций. При этом микрочип является одноразовым. На рис. 27 представлена схема пробоподготовки с помощью мембраны.

Температурная обработка.

Рассмотрим процесс температурной обработки пробы. Такая пробоподготовка нужна в геномном анализе, где можно увеличить число молекул ДНК в пробе с использованием реакции амплификации. Проведение этой реакции (полимеразной цепной реакции — ПЦР) требует термостатирования. Фотография планарного устройства для термостатирования и конструкция

модуля для проведения полимеразной цепной реакции с водяным капиллярным охлаждением представлена ранее (см. рис. 6).

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ

Развитие всего спектра конструктивно-технологических и методических подходов для реализации промышленных образцов таких систем продолжается уже более 15 лет. Оказалось, что реализация аналитических микро- и наносистем является более сложной технической и технологической задачей, чем это виделось в начале пути [2, 3, 12]. Рассмотрим какие конструктивно-технологические проблемы возникают при создании аналитических микро- и

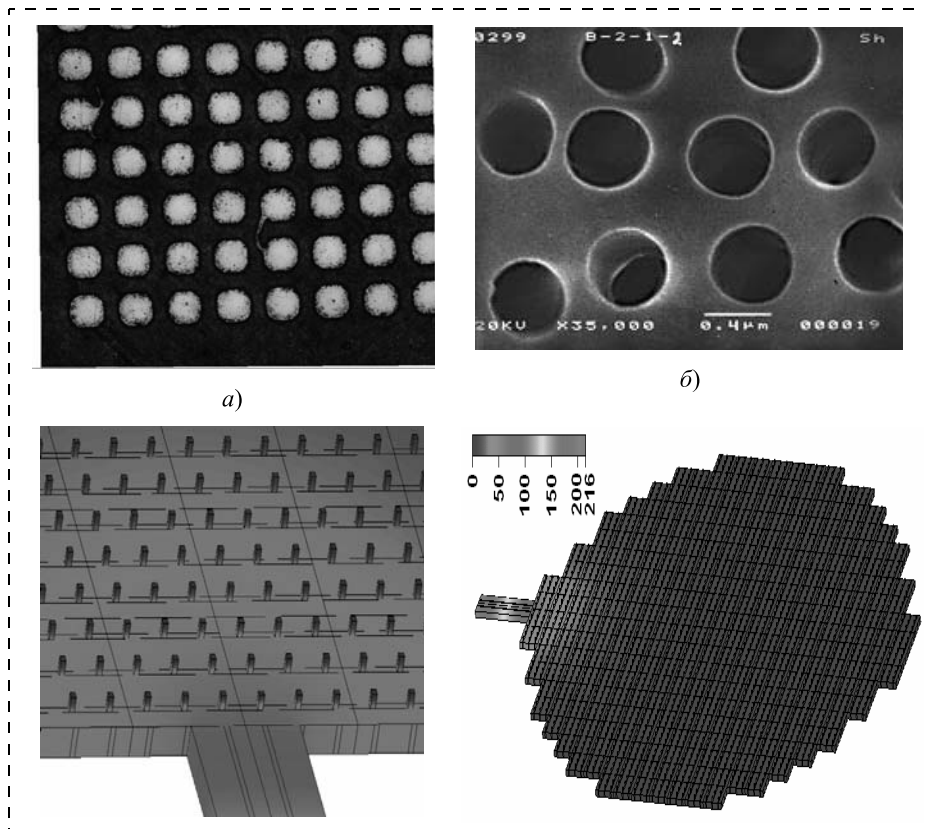


Рис. 26. Предфильтрация образца:

a — нанофильтр на основе анодного оксида алюминия (совместно с ИЭ АНБ, Минск); *б* — нуклофильтр (Трэктор, г. Москва); *в, г* — численное моделирование процесса втекания жидкости в мембранную ячейку (Софтимпакт, СПбГЭТУ)

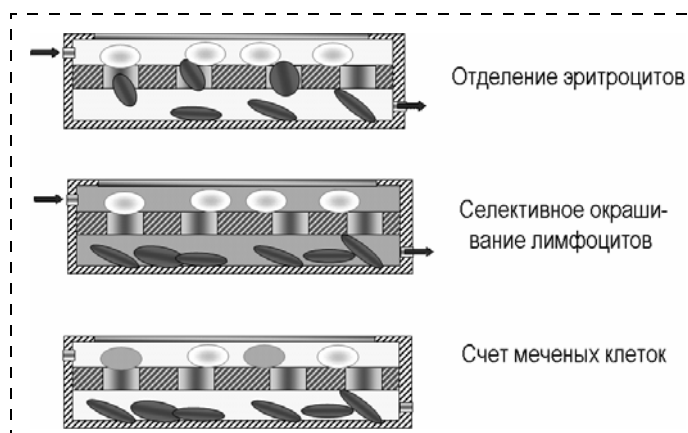


Рис. 27. Применение мембранной сепарации при пробоподготовке лимфоцитов

наносистем, выполняющих приборные функции, перечисленные в табл. 6.

Рассмотрим последовательно эти функции и способы их микрореализации.

Можно обобщить в табл. 6 физические принципы и нанотехнологические достижения, которые составляют научно-технический фундамент микро- и микроаналитических систем и лежат в основе конструктивно-технологических решений.

ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ

Реализация микроаналитических систем ограничивается в значительной степени готовностью соответствующих технологий, поскольку методологиче-

ские основы селективного определения веществ, основы сенсорной техники и аналитической химии в настоящее время опережают по объему наработок и широте охвата проблем в их классической постановке уровень развития еще достаточно новой области микроаналитических систем.

Технологии микроаналитических систем включают, прежде всего, планарные технологии — фотолитографию и травление (жидкостное, плазменное), лазерную абляцию, механическую микрообработку (до 10 мкм).

Комплекс полимерных технологий включает: жидкостное травление, горячее прессование, литье под давлением. При создании гибридных аналитических систем огромное значение имеют технологии поверхностного монтажа, корпусирования и модульной сборки. В табл. 7 приведены основные технологии изготовления микроаналитических систем.

Наряду с применением технологий микроэлектроники, при создании микро- и микроаналитических систем используют также химические и биологические технологии, перечисленные ниже.

Химическая обработка поверхности:

- синтез из газовой фазы;
- биосинтез на твердом носителе.

Химия полимеров:

- синтез макромолекул сложной архитектуры и коллоидных частиц;
- получение композитных материалов.

Технологии иммобилизации распознающих элементов сенсора:

- адсорбция на поверхности;
- микрокапсулирование;
- включение чувствительного элемента в матрицу геля, пасты или полимера;
- ковалентное связывание;
- сшивка через бифункциональные реагенты.

Сравнение органических и неорганических материалов как основы для изготовления аналитических систем приведено в табл. 8.

Безусловный интерес, благодаря технологичности и низкой стоимости, представляют органические материалы (полимеры).

При изготовлении микрочипов из стеклянных пластин наиболее сложной проблемой является спекание или посадка на ГОК (глубокий оптический контакт). Эти процедуры требуют высокого качества

Физические принципы и конструктивно-технологические решения создания микро- и наносистем на их основе

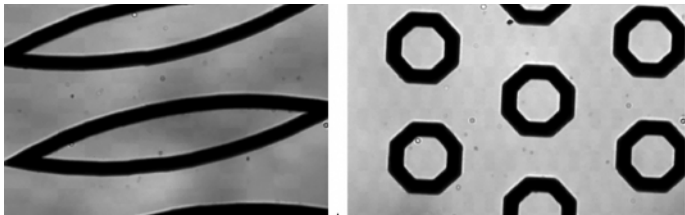
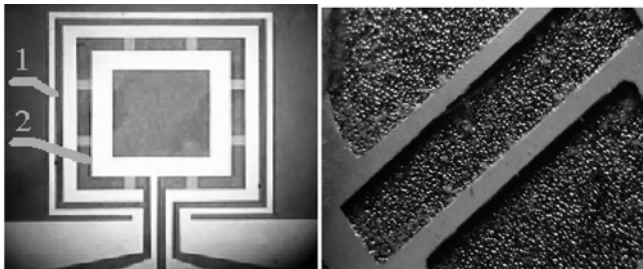
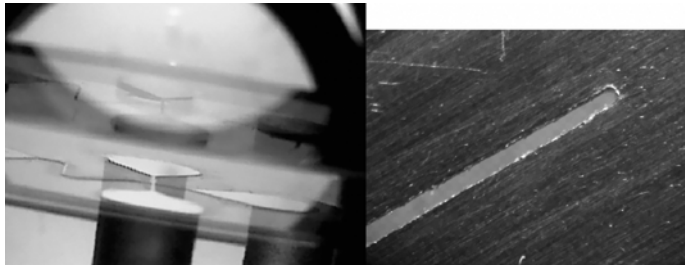
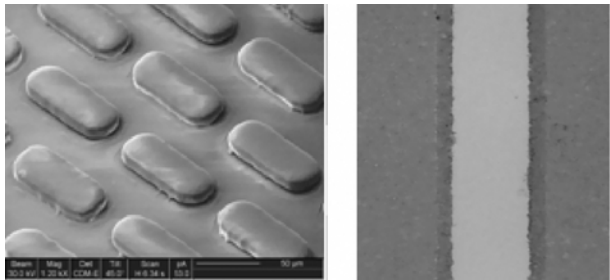
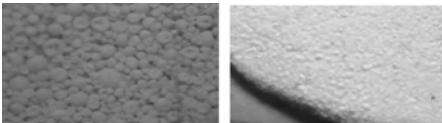
Функция	Принцип, процесс, устройство	Конструктивно-технологическое решение
1. Управление транспорт	Электроосмос Механический импульс Электрофорез Магнетофорез Сонификация Световые волны Нестационарная микрогидравлика Перемещение микрокапель на поверхности	Планарный капилляр, электрическое поле Клапанный, роторный микромеханический насос, в том числе интегральный Заряженные частицы, электрическое поле Магнитные частицы, селективное связывание магнитной метки, магнитное поле Управляемое звуковое поле Лазерное излучение Интегрированные микронасосы с динамическими пассивными клапанами Поверхностные звуковые волны
2. Ввод и подготовка пробы	Загрузка вещества Размол, термообработка, лизис, гидролиз Мембранная микрофильтрация Седиментация Диализ Осмотический "шок" Электрический разряд Селективная сорбция Обессоливание	Входной резервуар большого диаметра с защитной мембраной Гидроэлектроудар, микронагревательные элементы, микроразряд, химическая обработка, замораживание и компрессионное воздействие Встроенный микрофильтр Ловушка для седимента и препятствие для отделения супернатанта Диализная мембрана во входном резервуаре Резервуар, мембрана, доставка деионизованной воды Электроды Картридж с адсорбентом Обратный осмос
3. Разделение на компоненты	Электрофорез Хроматография Диализ	Электрическое поле высокой напряженности, капилляр свободный или заполненный инертной средой Межфазное распределение, планарные интегрированные колонки, электроосмотический или гидравлический поток Встроенная мембрана, камеры
4. Детектирование	Биораспознавание, гибридизация Химическая реакция Поглощение света Преломление света Флуоресценция	Иммобилизация активных биомолекул, синтез на поверхности Иммобилизация ионов, реагентов Источник излучения малой апертуры, 200—600 нм. Фотоприемник То же Источник первичного излучения. Система сбора вторичного излучения
5. Дозирование	Электроинжекция Капельная инъекция Инжекционный крест Мембранный клапан Система регулирования давления	Сопло — высокое напряжение Сопло Управляемые электрокинетические потоки Управляемая гибкая мембрана Эластичная мембрана
6. Физическая обработка	Термоциклирование Термостатирование Термоудар Диспергирование Насыщение кислородом Удаление растворенной газовой фазы	Управление нагревом и охлаждением — терморезистивные элементы на базе SiC, металлов, полупроводников Регулирование температуры, теплоизоляция, терморезистивные интегрированные элементы Нагревательные элементы Электроудар, ультразвуковое поле Барботирование, высвобождение физически связанного кислорода, гидролиз Барботирование гелием, ультразвуковое поле, вакуум
7. Химическая обработка	Реакция замещения, присоединения Ферментативный катализ Электрохимическая обработка	Реакторная микрокамера, подача реагентов микронасосами, смешивание реагентов за счет акустической вибрации, диффузии. Хранение и адресная доставка реагентов к месту реакции, поддержание внешних условий реакции Хранение и доставка биологически активных реагентов, термостатирование, доставка и смешивание Активный электрод, поддержание тока и напряжения, доставка реагентов

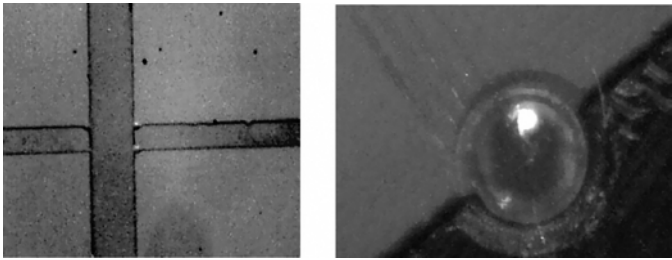
поверхности — плоскостности. При спекании полимерных пластин эти требования не так важны. Обычно при температурах несколько ниже температуры вязкотекучести достаточно приложения давления 0,5...20 кПа/см² (для получения надежного спекания пластин).

Кремний и кварц являются материалами, поддающимися профилированию методом фотолитографии, и пригодны для изготовления микрофлюидных чипов для хроматографии и электрофореза.

Высоким разрешением и аспектным отношением обладают структуры, полученные из материала SU-8,

впервые запатентованного корпорацией IBM в 1989 году. Этот материал является негативным фоторезистом, относящимся к типу эпоксидных смол. Структуры из SU-8, получаемые литографическим способом, являются достаточно стабильными после УФ облучения. Фоторезист SU-8-2035 представляет собой раствор эпоксидной смолы EPON 8 и фото-кислотного инициатора (SbF₆) в циклопентаноне. Фотоинициатор поглощает фотон излучения и образует при этом кислоту. Фотокислота образуется только в тех зонах фоторезистивной пленки, которые непосредственно подвергаются УФ облучению,

Группа технологий	Результат реализации
2D- и 3D-микротехнологии на стекле: • фотолитография • глубинное травление • металлизация • трафаретная печать (Фрагмент проточной системы газового сопла. Размер 50—100 мкм, глубина 10—30 мкм, кварцевое стекло КУ-1)	
Модифицированные 2D- и 3D-кремниевые технологии: • фотолитография • травление • металлизация А. Микрореактор для термоциклирования в геномном анализе: 1 — нагревательный элемент; 2 — термочувствительный элемент. Б. Мембранный актюатор	 А. Б.
3D-микромеханическая обработка стекла: • микрофрезерование 20—50 мкм • микропрофилирование 7—10 нм • сверление алмазными сверлами • лазерная обработка А. Фрагмент микроаналитического чипа для лазерного доплеровского электрофореза. Б. Микротрафарет	 А. 20—100 мкм Б.
Технологии пластмасс: • литье под давлением • горячее прессование • ламинирование • каландрирование	
2D-толсто пленочные технологии. Создание рисунка капиллярной системы, системы геометрических препятствий сепарационного узла и реактора. Подложка: полимер оптического качества, пленка, стекло, кварц. Субстрат: фоторезист SU-8, фоторезистивные защитные пленки на эпоксидной основе. Размеры: 25—200 мкм, глубина 5—200 мкм	 25 мкм 100 мкм 25 мкм 100 мкм
Позиционирование и поверхностный монтаж силовых функциональных элементов Печать пьезоэлектрического композита с полимерным (1,2) и силикатным связующим	 1 2

Группа технологий	Результат реализации
Микрооптические технологии: • интегрированные планарные световоды • микролинзы • литье оптических элементов	

и является катализатором реакции, протекающей после фазы облучения при заданной температуре и приводящей к отверждению. Температура процесса отжига (задубливания) должна быть выше температуры стеклования T_g , которая обычно $\approx 55^\circ\text{C}$. Во время процесса отжига фотокислота разрывает связи внутри эпоксидных групп, запуская тем самым реакции образования полимерных цепей, механизм которых похож на катионную полимеризацию. Этот процесс приводит к формированию плотной структуры, нерастворимой в органическом растворителе — уксусном эфире метил пропилен гликоля (PGMEA).

В табл. 9 приведены некоторые свойства фоторезиста SU-8 2035, использованного для изготовления

рельефа хроматографического модуля. Инертность сшитого SU-8 гарантирует отсутствие побочных реакций на стенках канала, что повышает качество анализа.

SU-8 может применяться для изготовления структур различной толщины (от 650 нм до 2 мм) и благодаря превосходным адгезионным качествам практически на любых подложках. Полученные рельефы характеризуются высоким аспектным отношением (больше 20 при УФ и больше 80 при рентгеновском излучении).

Конечная полимерная структура с большим количеством поперечных связей имеет высокую химическую устойчивость и хорошие температурные характеристики, позволяющие выдерживать технологические процессы с температурами, существенно превышающими 250°C .

Таблица 8

Сравнение органических и неорганических стекол как материалов микрочипов

Неорганическое стекло (Крон-8, ЖЗС-6 и др.)	Органическое стекло (термопласт — ПММА, ПК и др.)
Оптический доступ высокого качества Возможность формирования планарных интегрированных оптических элементов • микрорельефов (линза, киноформ) • градиентных элементов (световоды) Длительный срок службы Механическая жесткость конструкции Высокий поверхностный заряд и возможность его регулирования Высокая стоимость и трудоемкость Отсутствие пластичности	Низкая стоимость производства Простор для разработки многообразия форм Наличие <i>макротехнологий</i> (литье под давлением, прессование, сварка) Низкая стоимость материала и его разнообразие Пластичность Прочность

Таблица 9

Основные свойства SU-8 2035

Характеристика	Значение
Температура стеклования (для пленки, не подвергавшейся облучению), $^\circ\text{C}$	≈ 55
Температура стеклования (для полностью полимеризованной пленки), $^\circ\text{C}$	> 200
Температура разрушения (для полностью полимеризованной пленки), $^\circ\text{C}$	≈ 380
Коэффициент теплового расширения, $^\circ\text{C}^{-1}$	$52,0 \pm 5,1$
Относительная диэлектрическая проницаемость при 10 МГц	3—4

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ

Приборы с применением микро- и наноаналитических систем, как правило, содержат считывающее устройство (ридер) и сменный микрочип, содержащий пробу и реагенты (рис. 28).

Рассмотрим примеры макетных реализаций подобных миниатюрных систем, разработанных в Центре микротехнологии и диагностики СПбГЭТУ.

Приборы для лазерного доплеровского электрофоретического светорассеяния в капилляре. Анализатор лазерного доплеровского электрофорети-

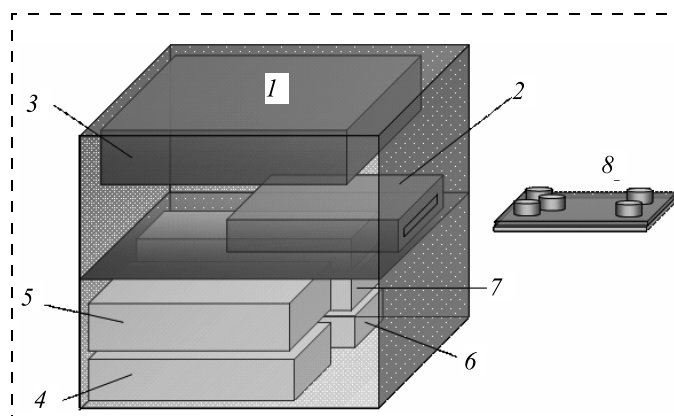


Рис. 28. Модульная архитектура аналитических приборов на основе микро- и наноаналитических систем:

1 — ридер; 2 — чип драйв для аналитического чипа; 3 — микрокомпьютер; 4 — блок питания; 5 — высоковольтный источник напряжения; 6 — микроконтроллер; 7 — аналого-цифровой преобразователь; 8 — аналитический микрочип

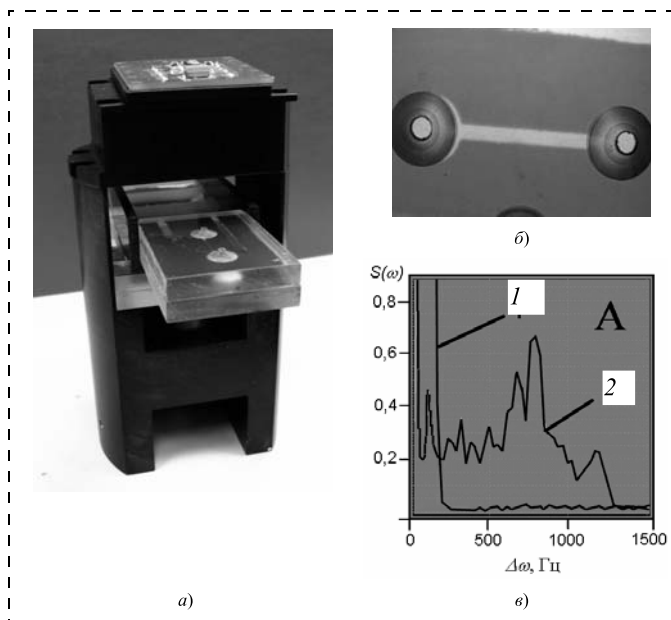


Рис. 29. Анализатор ЛДЭС:

a — общий вид; *б* — измерительный капилляр в одноразовом полимерном микрочипе; *в* — Фурье-спектр корреляционной функции электрофоретического доплеровского светорассеяния нормальной сыворотки крови человека (кривая 1 — для $E = 0$, кривая 2 — для $E = 1000 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$); твердотельный лазер с диодной накачкой (Лазер-экспорт, г. Москва), $\lambda = 532 \text{ нм}$, $P = 20 \text{ мВт}$

ческого светорассеяния (ЛДЭС) предназначен для определения скоростей кооперативного и диффузионного движения, электрокинетических параметров и размеров частиц и молекул в свободном растворе и может использоваться в аналитических приборах при контроле производства в пищевой, металлургической, целлюлозно-бумажной, фармацевтической промышленности, в научных исследованиях и в медицине для диагностики заболеваний (рис. 29, *a*).

Принцип метода доплеровского электрофоретического светорассеяния основан на измерении спектра когерентного света, рассеянного на частицах, которые движутся с постоянной скоростью v , и смешанного с возбуждающим светом, используемым в качестве гетеродина. Тогда в измеренном спектре центральная частота спектральной линии связана со скоростью v , а ее ширина — с диффузионной подвижностью частиц. Если в поле движутся частицы, имеющие различные групповые скорости, то спектр может содержать линии с характерными для данных скоростей центральными частотами, имеющими соответствующую диффузионную ширину. Измерение характеристик объектов методом электрофореза и оптического смешения позволяет в одном эксперименте измерить подвижность и коэффициент диффузии, а для многокомпонентных систем измерить подвижность и коэффициент диффузии каждого из компонентов.

Измерительная кювета выполнена в виде сменного планарного капиллярного микрочипа, содержащего, по крайней мере, один измерительный капилляр прямоугольного сечения с размерами h (высота перпендикулярно падающему лучу) и d (глубина по ходу луча) с плоскопараллельными оптическими окнами, имеющий вход и выход, соединенный с емкостями для реагентов (рис. 29, *б*).

На рис. 29, *в* представлен частотный спектр, соответствующий значениям групповых скоростей фракций сыворотки. Видно, что максимальное смещение частоты приближается к значению 1500 В, что указывает на большой динамический диапазон метода.

Приборы для флуоресцентного анализа на микрочипах для капиллярного электрофореза. Приборы с флуориметрическим детектированием предназначены для определения фракционного состава и электрофоретической подвижности фракций растворов с целью биохимической диагностики в клинической практике и в научных исследованиях методом капиллярного электрофореза в планарном капилляре или для электрохроматографии в планарных модулях.

Общий вид прибора представлен на рис. 30, *a*, *б*. Аналитическая система разработана как ридер и сменный чип (возможно одноразовый). Аналитический чип представлен на рис. 30, *б*, *в*, *г*.

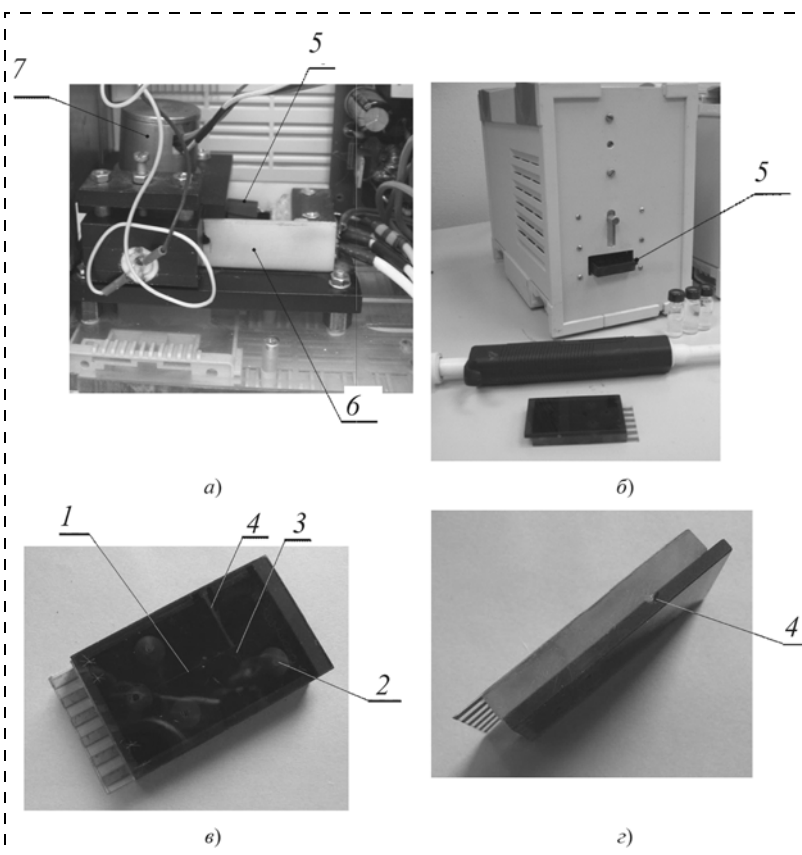


Рис. 30. Прибор для капиллярного электрофореза с флуориметрическим детектированием на основе одноразовых микрочипов:

1 — колонка; 2 — входное отверстие и резервуар для реагента; 3 — инъекционный крест; 4 — световодный канал и микролинза; 5 — микрочип; 6 — картридж с электрическим разъёмом; 7 — фотоприёмное устройство

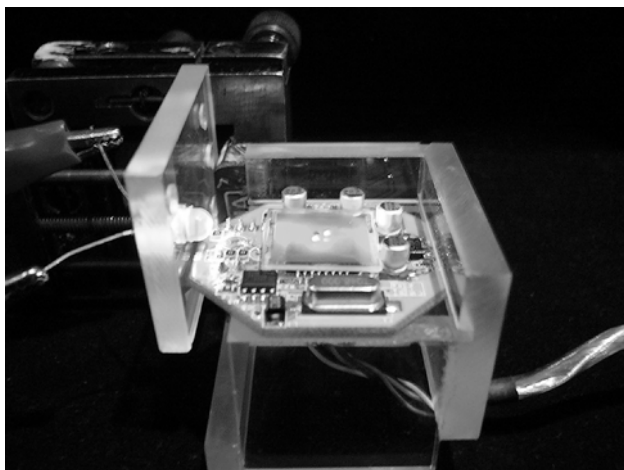


Рис. 31. Ридер для считывания данных флуоресценции с матричного микрочипа

Для повышения чувствительности приема можно повысить апертуру приема за счет интегрированных оптических элементов, таких как киноформы, линзы. Это даст повышение порога чувствительности на порядок и более.

Матричные приборы для флуоресцентного анализа. Такие приборы миниатюрны и дешевы, при этом позволяют получать высокое разрешение и чувствительность. На рис. 31 представлен макет ридера для считывания данных по флуоресценции с матричного чипа.

Чувствительность считывания с помощью КМОП-сенсора в представленном макете оценена с помощью растворов флуоресцеина и составляет

$0,2 \times 10^{-13}$ моля. Для повышения чувствительности на два и более порядков в платформу интегрируют микролинзы.

Матричные приборы для анализа в проходящем свете. Высокие чувствительность и специфичность в иммунологической диагностике достигаются путем использования высокоочищенных компонентов проводимой реакции и современных технических средств оптического детектирования фотометрии, люминометрии (основанных на хеми- и биолюминесценции), флуориметрии, в том числе с разрешением во времени (DELFA).

Для определения антител часто используют реакцию латекс-агглютинации (РЛА). Использование ридера на базе видеосенсора и микроплатформ для учета реакции латекс-агглютинации позволит сделать этот метод экспрессным, достоверным и мобильным.

На рис. 32 представлен ридер и набор матричных платформ. На рис. 32, в представлены результаты учета реакции латексного диагностикума при определении дифтерийного токсина.

Выводы

Микро- и наноаналитические системы, предназначенные для работы с нано- и пикоколичествами вещества в нанобъемах находятся в самом начале своего развития. Современными особенностями таких систем являются:

- блочно-модульная унификация технологических и аналитических подсистем, определяющая многообразие конструкций при минимизации затрат;
- полифункциональность и гибкость, определяющая широту номенклатуры продукции и многообразие решаемых классов задач в условиях различных потребителей (химия, биотехнология, медицина);
- интегрированность диагностических и технологических модулей в пределах одной рабочей зоны, определяющая возможность локализации различных видов воздействий и позволяющая работать со сверхмалыми количествами вещества при обеспечении высокой эффективности и скорости проведения процессов;
- "интеллектуальность" микрооборудования, определяемая системой контрольно-диагностических модулей нового поколения и гибкой связью между аналитическими и технологическими модулями;
- экономичность, определяемая групповыми принципами производства микроаналитических систем, их низкой материалоемкостью и энергоемкостью;
- экологичность, определяемая возможностью работы со сверхмалыми количествами веществ и простотой утилизации отходов.

Организация интегрально-группового производства микро- и наноаналитических систем вносит революционные изменения в область медицинской диагностики, генетиче-

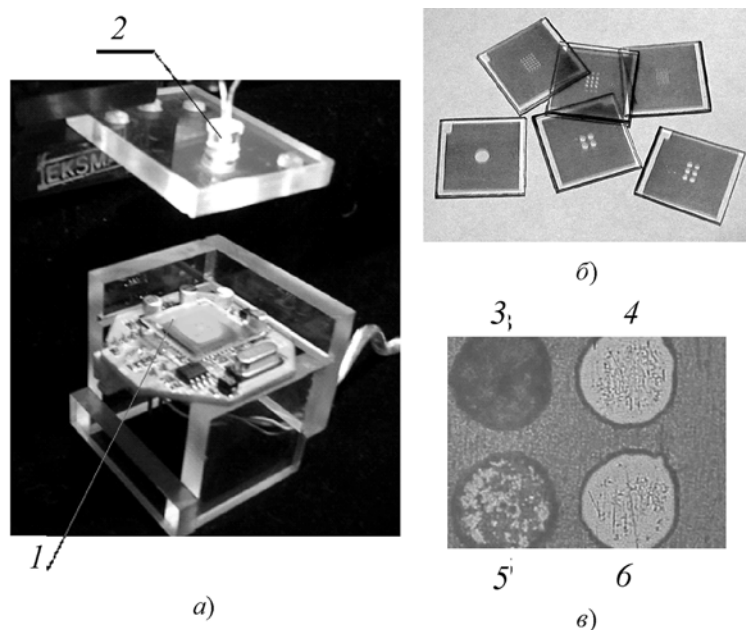


Рис. 32. Ридер и аналитический чип с микроячейками:

а — общий вид макета; б — аналитические чипы; в — результат реакции, записанный с помощью КМОП-видеосенсора в контактном режиме в проходящем свете; 1 — аналитический чип с микроячейками и КМОП видеосенсор; 2 — осветитель; 3 — контроль; 4, 5, 6 — образцы, содержащие различное количество дифтерийного токсина

ского анализа и микробиологического мониторинга за счет резкого сокращения стоимости и повышения скорости анализа, упрощения условий его проведения и автоматизации диагностических процедур.

Список литературы

1. **Manz A., Graber N., Widmer H. M.** Miniaturized total chemical analysis systems: A novel concept for chemical sensing // *Sensors and Actuators. B1*. 1990. С. 244—248.
2. **Jacobson S. C., Ramsey J. M.** Integrated microdevice for DNA Restriction Fragment Analysis // *Anal. Chem.* 1996. Т. 68. С. 720—723.
3. **Manz A., Harrison D. J., Verpoorte E., Widmer H. M.** Planar chips technology for miniaturization of separation systems: A developing perspective in chemical monitoring (review) // *Adv. Chromatogr.* 1993. Т. 33. Р. 1—66.
4. **Jacobson S. C., Culbertson C. T., Daler J. E., Ramsey J. M.** Microchip structures for Submillisecond Electrophoresis // *Anal. Chem.* 1998. Т. 70. С. 3476—3480.
5. **Зими́на Т. М.** Интегральные капиллярные сепарационные микросистемы для химического анализа // *Петербургский журнал электроники*. 2000. № 3—4. С. 79.
6. **Зими́на Т. М., Лучинин В. В., Крапивина Е. В., Ресин А. С.** Микросистемная техника и проблемы биомедицинского анализа // *Микросистемная техника*. 2000. № 2. С. 37—42.
7. **Зими́на Т. М., Лучинин В. В., Крапивина Е. В., Ресин А. С.** Микросистемная техника и проблемы биомедицинского анализа // *Микросистемная техника*. 2000. № 3. С. 18—30.
8. **Беленький Б. Г., Зими́на Т. М.** От классического жидкостного хроматографа к микроаналитическим системам // *Научное приборостроение*. 1999. Т. 9. № 3. С. 77.
9. **Fodor S. P. F., Read J. L., Pirrung M. C., Stryer L., Lu A. T., Solas D.** Light-Directed, Spatially Addressable Parallel Chemical Synthesis // *Science*. 1991. V. 251. P. 767—773.
10. **Proudnikov D., Timofeev E., Mirzabekov A.** Immobilization of DNA in polyacrylamide gel for the manufacture of DNA and DNA-oligonucleotide microchips // *Analyt. Biochem.* 1998. Т. 259. С. 34—41.
11. **Ali M. F., Kirby R., Goodey A. P., Rodriguez M. D., Ellington A. D., Neikirk D. P., McDevitt J. T.** DNA hybridization and discrimination of single-nucleotide mismatches using chip-based microbead arrays // *Anal. Chem.* 2003. Т. 75. С. 4732—4739.
12. **Способ** контроля биологической пробы в реакции латекс-агглютинации и аналитическая система для его осуществления. G01N 33/546. Патент РФ № RU 2298 798 С1. 2006.01. / Зими́на Т. М., Лучинин В. В., Мигунова В. Е., Краева Л. А., Ценева Г. Я., Меньшикова А. Ю., Шабельс Б. М., Дулатова М. В., Шпилюк Г. Ф.
13. **Зими́на Т. М.** Микро- и наноаналитические системы // *Нанотехнология. Физика. Процессы. Диагностика. Приборы* / Под ред. В. В. Лучинина и Ю. М. Таирова. М.: Физматлит, 2006.
14. **Аналитический** капиллярный микроchip. Патент РФ № 2229699, G01N21/00. 2000. Зими́на Т. М., Полянский М. Н., Лучинин В. В.
15. **Микроореактор** для химического и генетического тестирования. Патент РФ № 2171467. G01N27/00. 2000. Лучинин В. В., Корляков А. В., Зими́на Т. М., Никитин И. В.
16. **Биочип** для флюоресцентного и люминесцентного анализа. Патент РФ № 2280247. G01N21/64, 03. 2006. Зими́на Т. М., Лучинин В. В.
17. **Zimina T. M.** Integrated Chromatographic modules // *Мат. Междунар. симп. "100 лет хроматографии"*. Москва, 2003.
18. **Mandelbrot B. B.** The Fractal Geometry of Nature. 1998.
19. **Zimina T. M., Smith R. M., Myers P.** Comparison of ODS-modified silica gels as stationary phases for electrochromatography in packed capillaries // *J. Chromatogr.* 1997. Т. 758. С. 191—197.
20. **Zimina T. M., Smith R. M., Myers P., King B.** Effects of kinematic viscosity of slurry on the packing efficiency of PEEK microbore columns for liquid chromatography // *Chromatographia*. 1995. Т. 42. С. 662—668.
21. **Фридрихсберг Д. А.** Курс коллоидной химии. М.: Химия, 1995.
22. **Zeng S., Chen C.-H., Mikkelsen J. C., Santiago J. G.** Fabrication and characterization of electroosmotic micropumps // *Sensor and Actuators B*. 2001. 79. P. 107—114.
23. **Chien R.-L., Bousse L.** Electroosmotic pumping in microchips with Pnonhomogeneous distribution of electrolytes // *Electrophoresis*. 2002. 23. P. 1862—1869.
24. **Способ** проведения химического анализа. Патент РФ № 2075070. 1993. Андреев В. П.
25. **Батов С. Ю., Гуменюк Р. В., Аверков Д. Ю., Зими́на Т. М.** Миниатюрная электроосмотическая система водяного охлаждения для полимерных микрофлюидных чипов. Кисловодск, 2004.
26. **Rihter M., Linnemann R., Woias P.** Robust Design of Gas and Liquid Micropumps // *Sensor and Actuators A*. 1998. Т. 68. С. 480—486.
27. **Olsson A., Larsson O., Holm J., Lundblad L., Ohman O., Stemme G.** Valve-less diffuser micropumps fabricated using thermoplastic replication // *Sensor and Actuators A. Phys.* 64: 63—68. 1998.
28. **Aaron Sin, Christopher F. Reardon, Michael L. Shuler** Self-Priming Microfluidic Diaphragm Pump Capable of Recirculation Fabricated by Combining Soft Lithography and Traditional Machining *BIOTECHNOLOGY AND BIOENGINEERING*. 2004. Vol. 85. № 3.
29. **Зими́на Т. М., Лучинин В. В., Полянский В. В., Серкова М. Н., Казарин И. Г.** Капиллярный микроаналитический чип на основе оптического стекла // *Оптика*. 2001.
30. **Végyvári Á., Hjertén S.** A hybrid microdevice for electrophoresis and electrochromatography using UV detection // *Electrophoresis*. 2002. Т. 23. С. 3479—3486.
31. **Галактионов В. Г.** Механизмы иммунитета в графической форме. М.: Медицина, 2000.
32. **Гришаева Т. И.** Методы люминесцентного анализа. СПб: Изд-во НПО Профессионал, 2003. 226 с.
33. **Устройство** лазерного доплеровского электрофоретического светорассеяния / Заявка на изобретение № 2002106592. G01N21/00. 2003. Зими́на Т. М.
34. **Yamahata C., Lotto C., Al-Assaf E., Gijis M. A. M.** A PMMA valveless micropump using electromagnetic actuation // *Microfluid Nanofluid.* 2005. N 1. P. 197—207.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 535.82

К. П. Гайкович, д-р физ.-мат. наук,
Институт физики микроструктур РАН,
г. Нижний Новгород

СКАНИРУЮЩАЯ БЛИЖНЕПОЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТОМОГРАФИЯ

Разработан новый метод электромагнитной томографии структуры параметров трехмерных неоднородностей в полупространстве, применимый к различным видам физической диагностики сред. Рассмотрены возможности его применения с использованием известных методов поверхностного и подповерхностного зондирования в различных диапазонах частот.

Введение

В основе математически последовательных методов компьютерной томографии лежат преобразования Радона [1] и теория некорректных обратных задач [2]. При этом обычно используется возможность приема сигнала с разных сторон от исследуемого объема среды. В предлагаемом же методе исходными данными для анализа являются результаты двумерного сканирования над поверхностью полупространства, содержащего область неоднородностей. Эти результаты получены с использованием существующих методов поверхностного и подповерхностного зондирования [3] в зависимости от параметра измерений, который определяет эффективную глубину формирования принимаемого сигнала (например, от частоты принимаемого сигнала). Эти данные представляют собой трехмерную функцию и, соответственно, содержат информацию о трехмерной структуре среды. Очевидно, что максимальная глубина зондирования, реализующаяся при некотором значении упомянутого выше параметра, ограничена и, естественно, должна перекрывать область исследуемых неоднородностей. Идеи данной работы были частично доложены на конференциях (см. работы [4, 5]).

Многие известные методы двумерной поверхностной и одномерной подповерхностной диагностики сред могут быть положены в основу рассматриваемого подхода к томографии, однако в данной работе будут рассматриваться лишь методы электромагнитной диагностики, основанные на ближнепольных измерениях, в которых может быть реализовано субволновое и даже субапертурное разрешение. В подповерхностном зондировании такой ближнепольный эффект был экспериментально обнаружен в

формировании теплового излучения среды [6] и применен для ее температурного зондирования [7].

В сканирующей микроволновой и ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ) с помощью зондов с субволновым размером апертуры детали в получаемых изображениях поверхности имеют разрешения, много меньшие длины волны. Это достигается за счет трансформации ближнего поля зонда в распространяющиеся волны при рассеянии на неоднородностях. Оказалось возможным достигнуть и субапертурного разрешения путем деконволюции получаемых изображений с учетом аппаратной функции зонда [3]. Для целей томографии подповерхностных неоднородностей эти методы должны быть модифицированы таким образом, чтобы можно было изменять эффективную глубину формирования принимаемого сигнала в среде. Методы одномерной подповерхностной диагностики, такие, как ближнепольное СВЧ зондирование или низкочастотное магнитотеллурическое зондирование [3] также позволяют восстанавливать субволновые детали профилей параметров среды, но только в интервале зондирования, определяемом максимальной эффективной глубиной формирования сигнала, поскольку за пределами этого интервала разрешающая способность быстро уменьшается с ростом глубины. Для томографии трехмерно-неоднородной среды, основанной на методах одномерной подповерхностной диагностики, измерения должны быть дополнены двумерным сканированием вдоль поверхности.

Подход к решению рассматриваемых в данной работе задач сканирующей электромагнитной томографии основан на уравнениях Максвелла для комплексных амплитуд электрического и магнитного поля гармонического сигнала, а также на возможности разложения излучаемых полей в спектр поперечных плоских волн [8]. Специфика каждой из таких задач определяется видом исходных данных. Могут, например, измеряться двумерные распределения электрического и магнитного полей в зависимости от частоты сигнала или параметров токового распределения источника (или приемника). Могут измеряться квадратичные и более сложные формы полей, а также собственное излучение среды или вариации импеданса, вносимого в резонансные антенны при сканировании над неоднородной средой.

При анализе задач электромагнитной томографии в общем случае приходится иметь дело с неявно заданным многомерным и нелинейным оператором прямой задачи, и для решения соответствующих обратных задач строгий математический подход еще не развит. Однако удалось определить условия или приближения, при которых каждая из таких задач

разрешима в рамках развитого ниже математически последовательного подхода.

В статье не приводится весьма обширная библиография в области томографии за исключением работ [9–18], некоторые из которых имеют отношение к рассматриваемым вопросам.

1. Метод сканирующей компьютерной томографии

Суть предлагаемого здесь последовательного математического подхода состоит в том, что задачи сводятся к решению трехмерных интегральных уравнений, имеющих вид свертки по поперечным координатам, что позволяет путем двумерного преобразования Фурье по этим координатам свести задачу к одномерному интегральному уравнению Фредгольма 1-го рода для каждой пары волновых чисел поперечного двумерного спектра. Обратное двумерное преобразование Фурье решения этого уравнения (получаемого методом обобщенной невязки Тихонова с использованием теоремы Планшереля) дает искомую трехмерную структуру параметра среды.

На рис. 1 представлена схема сканирующей компьютерной томографии.

Пусть измеряемые в сканирующей компьютерной томографии двумерные распределения (изображения) в зависимости от параметра D связаны (по крайней мере, приблизительно) с объемным распределением соответствующих параметров среды интегральным уравнением

$$R(x, y, D) = \iiint_{V'} K(x - x', y - y', z', D) \times \varepsilon(x', y', z') dx' dy' dz', \quad (1)$$

где ядро уравнения K — аппаратная функция; $R(x, y, z)$ — измеренный сигнал; $\varepsilon(x', y', z')$ — искомое распределение параметра среды (для определенности заполняющей полупространство $z \leq 0$). Зависимость ядра уравнения K от параметра D позволяет в принципе искать решение (1) относительно трехмерного распределения ε .

Уравнение (1) является трехмерным интегральным уравнением Фредгольма 1-го рода (интеграл по глубине z' от двумерной свертки по поперечным ко-

ординатам). Известно, что решение даже одномерных уравнений этого типа представляет собой сложную некорректную задачу, требующую применения методов регуляризации, основанных на использовании дополнительной априорной информации о точном решении. В частности, известен большой круг задач диагностики среды, связанных с восстановлением профилей ее параметров и приводящих к решению одномерных уравнений Фредгольма 1-го рода [3]. Задачи, приводящие к двумерным уравнениям 1-го рода типа свертки, решались в простейших задачах томографии [2], а также с целью восстановления изображений поверхности по данным сканирующей зондовой микроскопии, в которых истинное изображение сглажено аппаратной функцией зонда (см., например, в работах [3, 20–22]). Математически последовательный подход к решению таких уравнений Фредгольма 1-го рода основан на теории некорректных задач Тихонова [2, 19]. Ниже рассмотрен подход к решению трехмерных уравнений 1-го рода типа (1), в котором как бы объединяются методы решения упомянутых одномерных и двумерных задач.

Сначала используется тот факт, что двумерное преобразование Фурье уравнения (1) по поперечным координатам приводит к одномерному интегральному уравнению относительно глубинных распределений компонент поперечного спектра:

$$\bar{R}(\kappa_x, \kappa_y, D) = 4\pi^2 \int_{-\infty}^0 \bar{K}(\kappa_x, \kappa_y, z', D) \bar{\varepsilon}(\kappa_x, \kappa_y, z') dz', \quad (2)$$

где

$$\bar{R}(\kappa_x, \kappa_y, D) = \frac{1}{4\pi^2} \iint R(x, y, D) \exp(-i\kappa_x x - i\kappa_y y) dx dy;$$

$$\bar{\varepsilon}(\kappa_x, \kappa_y, D) = \frac{1}{4\pi^2} \iint \varepsilon(x, y, D) \exp(-i\kappa_x x - i\kappa_y y) dx dy;$$

$$\bar{K}(\kappa_x, \kappa_y, D) = \frac{1}{4\pi^2} \iint K(x, y, D) \exp(-i\kappa_x x - i\kappa_y y) dx dy.$$

Если ядро уравнения и искомое решение имеют локальные носители, то можно периодически продолжить эти функции на всю плоскость и использовать разложение в дискретный ряд Фурье так, как это делалось в задачах деконволюции двумерных изображений в сканирующей зондовой микроскопии [3, 20–22]. Это позволяет использовать алгоритм быстрого преобразования Фурье, что в данной многомерной задаче критически важно для ее решения за приемлемое время. Далее уравнение (2) решается как одномерное интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода относительно глубинного профиля поперечного спектра $\bar{\varepsilon}(\kappa_x, \kappa_y, z')$ для каждой пары κ_x, κ_y в интервалах дискретного спектрального разложения. И, наконец, искомое решение $\varepsilon(x, y, z)$ получается путем обратного преобразования Фурье восстановленного поперечного спектра неоднородностей среды. Такой подход подразумевает, что неоднородности локализованы в некоторой известной области конечного размера. Если это условие не выполнено, то нужно считаться с возможностью внесения погрешностей около границ обла-

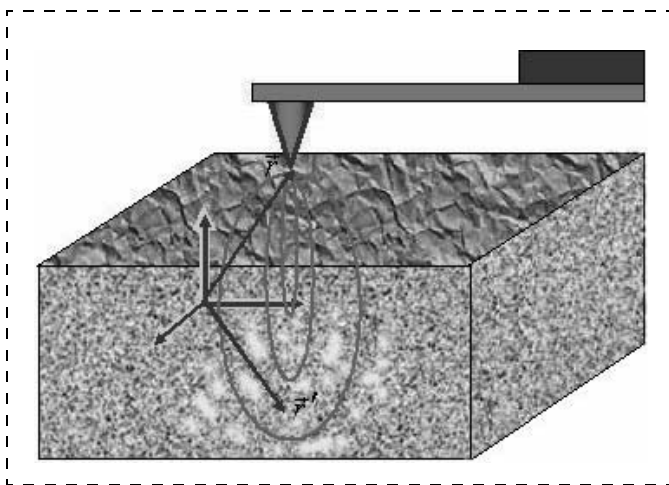


Рис. 1. Схема сканирующей томографии полупространства с неоднородностями

ти анализа на масштабах порядка ширины аппаратной функции.

Если использовать информацию о принадлежности решения (2) к классу интегрируемых с квадратом функций, имеющих интегрируемую с квадратом производную, приближенное решение (2) $\tilde{\varepsilon}$ может быть найдено методом обобщенной невязки [19]. Предполагается, что известны оценка интегральной ошибки измерений δ и мера погрешности h приближенно известного оператора K_h , которые удовлетворяют условиям

$$\|\tilde{R} - \tilde{R}^\delta\|_{L_2} \leq \delta; \quad \|\tilde{K} - \tilde{K}_h\|_{W_2^1 \rightarrow L_2} \leq h, \quad (3)$$

где $\tilde{R}$ — левая часть уравнения (2), соответствующая точному решению; $\tilde{R}^\delta$ — данные измерений с ошибкой δ . Согласно методу Тихонова приближенное решение (2) находится из условия минимума функционала обобщенной невязки

$$M_\alpha[\tilde{\varepsilon}] = \|4\pi^2 \tilde{K}_h \tilde{\varepsilon} - \tilde{R}^\delta\|_{L_2}^2 + \alpha \|\tilde{\varepsilon}\|_{W_2^1}^2; \quad (4)$$

при дополнительном условии, которое выражает принцип обобщенной невязки и позволяет найти значение параметра регуляризации α при заданном уровне погрешностей измерений и оператора:

$$\|4\pi^2 \tilde{K}_h \tilde{\varepsilon} - \tilde{R}^\delta\|_{L_2}^2 = (\delta + h \|\tilde{\varepsilon}\|_{W_2^1})^2. \quad (5)$$

Важным преимуществом рассматриваемого метода является сходимость получаемого приближенного решения к точному в метрике W_2^1 , и, следовательно, равномерная сходимость (т. е. по максимуму модуля) по мере уменьшения погрешности измерений в интегральной метрике [19]. Значения параметров погрешности измерений δ и h (оцененные в метрике L_2) определяют качество восстановления, неявно регулируя значение параметра регуляризации, от которого зависит степень заглаживания приближенного решения. При $(\delta, h) \rightarrow 0$ восстановленное распределение равномерно сходится к истинному. Поэтому нет необходимости использовать большие статистические ансамбли для получения представительных оценок точности восстановления, как это требуется в других методах, имеющих интегральную или среднюю квадратичную сходимость — достаточно заполнить численное моделирование для типичных, и может быть экстремальных, распределений.

Параметр погрешности ядра h определяется обычно из численного решения прямой задачи, и его стремятся сделать меньше меры погрешности измерений δ , которая с учетом теоремы Парсеваля—Планшереля может быть оценена из условий (3) как

$$\begin{aligned} \delta^2 &= \frac{1}{\Delta D} \int \int_{\kappa_x, \kappa_y} d\kappa_x d\kappa_y \int_D [\delta \tilde{R}(D, \kappa_x, \kappa_y)]^2 dD = \\ &= \frac{1}{4\pi^2 \Delta D} \int \int_{x, y} dx dy \int_D [\delta R(D, x, y)]^2 dD = \frac{1}{4\pi^2} \delta_R^2, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\delta R(D, \kappa_x, \kappa_y) = \tilde{R}(D, \kappa_x, \kappa_y) - \tilde{R}^\delta(D, \kappa_x, \kappa_y)$, а интегрирование выполняется по области анализа.

Искомое решение получается путем обратного преобразования Фурье полученного глубинного профиля спектральных компонент:

$$\varepsilon(x, y, z) = \iint [\tilde{\varepsilon}(\kappa_x, \kappa_y, z) \exp(i\kappa_x x + i\kappa_y y) d\kappa_x d\kappa_y]. \quad (7)$$

При восстановлении трехмерной структуры полупространства из решения (1) неизбежно ограничение глубины восстановления характерным масштабом, на котором происходят существенные изменения ядра уравнения K . Для ядер с единичной нормировкой можно оценить эффективную глубину восстановления как максимальную (при изменении параметра D) эффективную толщину слоя, в котором в основном формируется принимаемый сигнал:

$$d_{\text{eff}}(D) = \left| \int_{-\infty}^0 z \iint K(x, y, z, D) dx dy dz \right|. \quad (8)$$

Это естественное ограничение характерно для задач зондирования профилей параметров сред, сводящихся к уравнению Фредгольма 1-го рода [3]. При этом точность решения быстро убывает на глубинах $z < -d_{\text{eff}}$, поэтому поперечный спектр $\tilde{\varepsilon}(\kappa_x, \kappa_y, z')$ тоже восстанавливается с погрешностью, возрастающей с глубиной. Тогда, несмотря на то, что обратное преобразование Фурье спектра, которое дает искоемое решение, является корректной операцией, погрешность этого решения тоже будет возрастать за пределами максимальной глубины зондирования, определяемой из выражения (8). Характерной особенностью таких задач является также относительно медленная сходимость к точному решению при уменьшении погрешности данных.

Важно отметить, что реализация математически последовательного подхода к решению задач компьютерной томографии возможна лишь в немногих случаях. Например, линейная задача просвечивания поглощающего объекта тонкими лучами, когда ослабленный сигнал принимается вокруг такого объекта [2], сводится к решению интегрального уравнения типа двумерной свертки. Однако реализовать строгий подход при решении более сложных трехмерных задач чаще всего не удастся. В таких случаях задачу пытаются свести к решению системы линейных уравнений, где многомерность задачи накладывает жесткие ограничения на шаг дискретизации. В самом деле, если к такой системе уравнений сводится решение трехмерного интегрального уравнения, то при размерности сетки в 100 точек по каждой координате потребуется 10^{12} чисел только для хранения в памяти матрицы шестимерного ядра уравнения. Таким образом, приходится решать задачи на сетке с небольшой размерностью, что, естественно, дает хорошие результаты только для простых по структуре объектов томографии и для таких способов измерения, когда соответствующая система уравнений не является плохо обусловленной. А так как даже простейшая схема кругового просвечивания приводит к решению не корректной обратной задачи, то с уменьшением шага дискретизации соответствующая система уравнений становится плохо обусловленной, а решение теряет устойчивость. Поэтому с практической точки зрения преимущество рассмотренного здесь последовательного математического подхода состоит в возможности решения задачи на персональных компьютерах с высоким разрешением за разумное время.

2. Поля и их латеральные спектры в сканирующей электромагнитной томографии

Большое число задач сканирующей томографии различных сред может быть основано на измерении различных параметров электромагнитных волн в самых разных диапазонах частот. В основе анализа естественно должны рассматриваться уравнения Максвелла, которые для комплексных амплитуд монохроматической ($\varepsilon^{i\omega t}$, ω — циклическая частота) волны в трехмерно-неоднородной изотропной среде с комплексной диэлектрической проницаемостью ε имеют вид:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} - i\frac{\omega}{c} \varepsilon \mathbf{E} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}; \quad (9)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} + i\frac{\omega}{c} \mathbf{H} = 0. \quad (10)$$

Измеряться могут сами поля, их квадратичные характеристики, трансформированные аппаратной функцией прибора, а также интегральные величины, связанные с распределением этих характеристик в некоторой области, в зависимости от положения или ориентации зонда. Чтобы применить развитую выше теорию, рассмотрим задачу распространения в неоднородной среде, представляя ее комплексную диэлектрическую проницаемость ε в виде отклонения ε_1 , занимающего конечную область в полупространстве $z \leq 0$, от некоторого постоянного значения $\varepsilon_0 = \text{const}$ в остальной части этого полупространства:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1(\mathbf{r}). \quad (11)$$

Тогда уравнения Максвелла принимают вид:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} - i\frac{\omega}{c} \varepsilon_0 \mathbf{E} = i\frac{\omega}{c} \varepsilon \mathbf{E} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}; \quad (12)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} + i\frac{\omega}{c} \mathbf{H} = 0. \quad (13)$$

Невозмущенные поля $\mathbf{E}_0$, $\mathbf{H}_0$ при заданном распределении источников в верхнем полупространстве определяются из решения системы

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \mathbf{H}_0 - i\frac{\omega}{c} \varepsilon_0 \mathbf{E}_0 = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \\ \operatorname{rot} \mathbf{E}_0 + i\frac{\omega}{c} \mathbf{H}_0 = 0, \end{cases} \quad (14)$$

с помощью известных функций Грина $\vec{G}_{E, H}(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$ (решение с точечным источником в правой части (14)) как

$$\mathbf{E}_0(\mathbf{r}) = \frac{1}{i\omega} \int_V \vec{G}_E(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \mathbf{j}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'; \quad (16)$$

$$\mathbf{H}_0(\mathbf{r}) = \frac{1}{c} \int_V \vec{G}_H(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \mathbf{j}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'. \quad (17)$$

Трехмерные поля в формулах (16), (17) могут быть разложены в поперечные спектры плоских волн, описывающие и ближнепольные компоненты поля источников [8]. Это позволяет вычислить невозмущенное поле от источников и в полупространстве $z \leq 0$. Рассматривая первое слагаемое в правой части уравнения (12) как сторонний источник

$\mathbf{j}_s = \frac{i\omega \varepsilon_1}{4\pi} \mathbf{E}$ в полупространстве $z \leq 0$, можно свести решение (12), (13) к интегральному уравнению типа Фредгольма 2-го рода для поля $\mathbf{E}$ при $z \leq 0$:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) + \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int_V \varepsilon_1(\mathbf{r}') \vec{G}_E(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}', \quad (18)$$

$$\text{или, обозначая } \mathbf{K}_E(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \varepsilon_1(\mathbf{r}') \vec{G}_E(\mathbf{r}, \mathbf{r}'),$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) + \int_V \mathbf{K}_E(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'. \quad (19)$$

Уравнение (19) эквивалентно волновому уравнению с тем отличием, что функция Грина может учитывать источники и условия на границах раздела сред. Решение (19) для значений

$$\left[\int_V \int_V |\mathbf{K}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')|^2 d\mathbf{r} d\mathbf{r}' \right]^{1/2} < 1$$
 имеет вид

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) + \int_V \mathbf{R}_E(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{E}_0(\mathbf{r}') d\mathbf{r}', \quad (20)$$

где резольвента $\mathbf{R}_E$ удовлетворяет функциональным уравнениям, называемым в физике уравнениями Дайсона:

$$\mathbf{R}_E(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \mathbf{K}_E(\mathbf{r}, \mathbf{r}') + \int_V \mathbf{K}_E(\mathbf{r}, \mathbf{r}'') \mathbf{R}_E(\mathbf{r}'', \mathbf{r}') d\mathbf{r}'', \quad (21)$$

$$\mathbf{R}_E(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \mathbf{K}_E(\mathbf{r}, \mathbf{r}') + \int_V \mathbf{K}_E(\mathbf{r}'', \mathbf{r}') \mathbf{R}_E(\mathbf{r}, \mathbf{r}'') d\mathbf{r}'', \quad (22)$$

для решения которых созданы эффективные алгоритмы (см., например, [23]). Резольвента представляется также рядами Неймана

$$\mathbf{R}_E = \mathbf{K}_E + \mathbf{K}_E^{(2)} + \dots + \mathbf{K}_E^{(n)} + \dots,$$

$$\mathbf{K}_E^{(n)} = \int_V \mathbf{K}_E(\mathbf{r}, \mathbf{s}) \mathbf{K}_E^{(n-1)}(\mathbf{s}, \mathbf{r}') d\mathbf{s}, \quad (23)$$

которые на практике чаще всего используются для приближенного нахождения резольвенты. Вклад членов ряда (23) интерпретируется как вклад однократного, двукратного и т. д. рассеяния. Полученное таким образом поле $\mathbf{E}$ используется далее для определения поля $\mathbf{H}$ при $z \leq 0$:

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}_0(\mathbf{r}) + \frac{i\omega}{4\pi c} \int_V \varepsilon_1(\mathbf{r}') \vec{G}_H(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}', \quad (24)$$

которое легко найти из (17) или прямо из уравнения Максвелла (13). Соотношения (18), (24) решают, таким образом, прямую задачу определения полей в рассматриваемой неоднородной среде и являются исходными для постановки некоторых задач сканирующей томографии сред с использованием электромагнитных волн.

На основе этого же подхода строится и теория возмущений. Искомые поля представляются при этом как

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots, \quad \mathbf{H} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_1 + \mathbf{H}_2 + \dots, \quad (25)$$

где невозмущенные поля $\mathbf{E}_0$, $\mathbf{H}_0$, порождаемые внешними источниками, удовлетворяют уравнениям

(14), (15). Поля E_1 , H_1 , соответствующие первому приближению теории возмущений, называемому борновским или (в оптике) релеевским, получаются для функции источника $j_s = \frac{i\omega\epsilon_1}{4\pi} E_0$ в правой части (12) и представляются как

$$E_1(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \epsilon_1(\mathbf{r}') \vec{G}_E(\mathbf{r} - \mathbf{r}') E_0(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'; \quad (26)$$

$$H_1(\mathbf{r}) = \frac{i\omega}{4\pi c} \int_V \epsilon_1(\mathbf{r}') \vec{G}_H(\mathbf{r} - \mathbf{r}') E_0(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'. \quad (27)$$

Эти уравнения будут иметь вид свертки, если записать их относительно функции источника j_s , в которой невозмущенное поле — известная функция:

$$E_1(\mathbf{r}) = \frac{1}{i\omega\epsilon_0} \int_V \vec{G}_E(\mathbf{r} - \mathbf{r}') j_s(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'; \quad (28)$$

$$H_1(\mathbf{r}) = \frac{1}{c} \int_V \vec{G}_H(\mathbf{r} - \mathbf{r}') j_s(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'. \quad (29)$$

Уравнения для второго и последующих приближений уже не обладают этим свойством, равно как и общая формула (19) с резольвентой. Таким образом, задачи томографии с использованием измерений рассеянных полей в постановке, основанной на решении уравнений типа свертки по поперечным координатам, можно решать только в рамках первого приближения теории возмущений.

Выполняя двумерное преобразование Фурье по поперечным координатам в (28), (29), имеем одномерные интегральные уравнения Фредгольма 1-го рода относительно глубинного профиля поперечных спектральных компонент эффективного источника рассеянного поля

$$E_1(\kappa_x, \kappa_y, z) = \frac{4\pi^2}{i\omega\epsilon_0} \int_{-\infty}^0 \vec{G}_E(\kappa_x, \kappa_y, z, z') j_s(\kappa_x, \kappa_y, z') dz'; \quad (30)$$

$$H_1(\kappa_x, \kappa_y, z) = \frac{4\pi^2}{c_0} \int_{-\infty}^0 \vec{G}_H(\kappa_x, \kappa_y, z, z') j_s(\kappa_x, \kappa_y, z') dz', \quad (31)$$

которые можно рассматривать как исходные уравнения для методов электромагнитной томографии, основанных на измерении комплексных амплитуд полей. По форме эти уравнения аналогичны (2) и, казалось бы, могут быть решены описанным в разделе 1 методом. Однако, учитывая, что G является тензором, на самом деле в общем случае (30), (31) представляют собой системы из трех интегральных уравнений, решение которых является сложной вычислительной задачей.

Тем не менее, существуют возможности сведения задач томографии к решению одного интегрального уравнения типа (2). Во-первых, это случай, когда невозмущенное поле в среде является одиночной плоской волной $E_0(\mathbf{r}) = E_0 \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r})$. Тогда, используя свойство свертки с экспонентой, из (26) имеем интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода типа (2) для каждой из компонент поля:

$$E_1(\kappa_x, \kappa_y, z) = \frac{\pi}{\epsilon_0} \int_{-\infty}^0 \epsilon_1(\kappa_x - k_x, \kappa_y - k_y, z') \times$$

$$\times \vec{G}_E(\kappa_x, \kappa_y, z, z') E_0 \exp(\pm i\sqrt{k^2 - k_\perp^2} z') dz', \quad (32)$$

где $k^2 = (\omega/c)^2 \epsilon_0$. В (32) можно видеть эффект сдвига поперечного спектра неоднородностей диэлектрической проницаемости относительно спектра измеряемых вариаций поля, который приводит к тому, что в крупномасштабных вариациях поля проявляются мелкомасштабные (включая и субволновые) вариации диэлектрической структуры. В том случае, если в среде рассеивается замедленная волна, т. е. при $k_\perp^2 = k_x^2 + k_y^2 > |k|^2$, в качестве параметра измерений, который определяет эффективную глубину формирования принимаемого сигнала, могут использоваться компоненты волнового вектора невозмущенной волны.

Одинокная замедленная волна может быть создана в диэлектрическом полупространстве с помощью призмы или полуцилиндра с показателем преломления, большим, чем в зондируемом полупространстве с использованием эффекта полного внутреннего отражения на границе раздела сред. Такой метод был предложен в работах [15–18] для томографии неоднородностей в вакууме или над плоской границей полупространства, которые облучались замедленной волной при различных углах падения лучей, испытывающих полное внутреннее отражение на плоской границе раздела с вакуумом.

В диэлектрическом полупространстве не всегда возможно создать одиночную замедленную волну, поскольку на его границе условие полного внутреннего отражения может и не выполняться. В таких случаях возможен другой подход, основанный на использовании свойства зондов с электрически малой апертурой, расположенной вблизи плоской поверхности диэлектрической среды, создавать в ней целый спектр замедленных волн. Этот спектр определяют форма и положение апертуры (распределение тока в источнике). Как следствие, появляются новые параметры (размеры апертуры зонда, ее высота над поверхностью), от которых зависит эффективная глубина формирования сигнала в среде. Такая зависимость была обнаружена экспериментально при приеме теплового излучения среды с применением электрически малых антенн и использована для разработки нового метода ближнепольного СВЧ зондирования подповерхностного профиля температуры [3, 6, 7]. Аналогичный подход возможен и в некоторых других, рассматриваемых ниже, методах сканирующей ближнепольной электромагнитной томографии. Во всех таких приложениях двумерное сканирование вдоль поверхности среды должно осуществляться излучающим ближнепольным зондом.

Электрическое и магнитное поля, создаваемые реальным или эффективным распределением тока в однородном пространстве, которые, как было показано выше, определяются источниками через соответствующие функции Грина, выражаются точными формулами (1П), (2П), приведенными в Приложении. Двумерное Фурье-преобразование этих интегральных соотношений по поперечным волновым числам приводит к выражениям (3П), (4П) для компонент поперечного спектра в виде одномерных интегралов по вертикальной координате. Сами поля могут, таким образом, быть представлены в виде раз-

ложения по плоским волнам (5П), (6П), что является решающим моментом последующего анализа.

Уравнения (3П), (6П) могут служить исходными уравнениями для решения задач сканирующей томографии в разнообразных приложениях электромагнитной ближнепольной диагностики структуры параметров среды. Для решения любой такой задачи томографии нужно знать лишь распределение электрического поля от источника сигнала E_0 в невозмущенной части среды, которое для однородной среды получается из разложения (5П) при заданных источниках. Возмущенные поля можно найти по формулам (5П), (6П), где в качестве источников фигурируют уже компоненты невозмущенного поля E_0 .

Внутри полупространства невозмущенное поле находится по формулам Френеля для плоской волны [8]. Если задать источник излучения в виде распределения электрического тока по апертуре зонда $j^p(x, y, z)$, то поле, падающее на границу полупространства из вакуума можно найти, используя разложение (5П) поля по плоским волнам при $\epsilon_0 = 1$. При переходе через границу раздела $z = 0$ нужно разложить компоненты амплитуды поля на границе раздела по проекциям на плоскость падения и плоскость, перпендикулярную к плоскости падения и плоскости $z = 0$, а затем умножить эти компоненты на коэффициенты Френеля $T_{||}$, $T_{\perp}$. В фазе поля в среде необходимо сделать замену $k_0 \rightarrow k$. Тогда получаем соотношение (7П) для поля E_0^{in} в невозмущенной области полупространства и выражение (8П) для поперечного спектра этого поля. Общие выражения для рассеянных полей весьма громоздки, поэтому они представлены здесь для двумерного распределения тока источника, у которого есть только x -компонента на высоте $z = z_1$, т. е. для $j^p = j_x^p(x', y', z')\delta(z' - z_1)$, тогда электрическое поле в невозмущенной среде определяется формулой (9П). Если это двумерное распределение тока создается зондом, положение которого задается его поперечными координатами x_1 и y_1 , то, с учетом спектрального представления этого распределения (10П), поле как функция поперечных координат зонда выражается формулой (11П). В частности, для однородного распределения тока в виде $j^p = j_x^p\delta(z' - z_1)$, $j_x^p = \text{const}$, в прямоугольнике $|x - x_1| < L_x/2$, $|y - y_1| < L_y/2$ электрическое поле в невозмущенной среде согласно (11П) будет иметь вид:

$$E_0^{in}(x - x_1, y - y_1, z, z_1) = -\frac{1}{\omega} \frac{j_x^p}{2} \times \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp\{-ik_x(x - x_1) - ik_y(y - y_1) \pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}z \pm i\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2}z_1\}}{\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2}} \times \\ \times \frac{1}{\pi^2 \kappa_x \kappa_y} \sin \frac{\kappa_x L_x}{2} \sin \frac{\kappa_y L_y}{2} \{f_x^{E0}(\kappa_x, \kappa_y, \epsilon_0)x_0 + \\ + f_y^{E0}(\kappa_x, \kappa_y, \epsilon_0)y_0 + f_z^{E0}(\kappa_x, \kappa_y, \epsilon_0)z_0\} d\kappa_x d\kappa_y. \quad (33)$$

В формуле (33) можно различить поперечный спектр тока источника, определяемый из (10П):

$$j_x^p(\kappa_x, \kappa_y) = \frac{j_x^p}{\pi^2 \kappa_x \kappa_y} \sin(\kappa_x L_x/2) \sin(\kappa_y L_y/2). \quad (34)$$

Этот спектр играет роль фильтра пространственных частот, от которого зависит вклад ближнего поля. Из (33) можно видеть, что с ростом размеров апертуры L_x , L_y и высоты зонда над поверхностью z_1 подавляются ближнепольные компоненты поля зонда, которые определяют чувствительность измерений к мелкомасштабным (меньше длины волны) вариациям параметров среды. Соответствующее магнитное поле определяется из уравнения Максвелла в виде (12П).

Вариации полей внутри среды, связанные с ее неоднородностями, выражаются в общем виде соотношениями (26), (27), которые не являются уравнениями свертки по координатам зонда, однако есть возможность представления невозмущенного поля в виде разложения по плоским волнам. Полагая в (5П),

$$(6П) \quad j = \frac{i\omega\epsilon_1}{4\pi} E_0^{in}, \quad \text{получаем соотношения (13П),}$$

(14П) для вариаций электрического и магнитного полей в неоднородном полупространстве в борновском приближении и соотношения (15П), (16П) для их поперечных спектров. Эти спектры, как и (32), являются одномерными интегралами по глубине от поперечных спектральных компонент ϵ со сдвигом по пространственным частотам относительно спектров измеряемых полей. Из уравнений видно, что для реализации метода томографии, основанного на измерении рассеянных полей, создаваемых ближнепольным зондом, необходимо осуществлять сканирование, как по координатам излучающего зонда, так и по координатам поля (приемника).

В данной работе рассмотрены также методы томографии, в которых используются интегральные квадратичные характеристики полей — это двумерное распределение интенсивности рассеянного поля одиночной замедленной волны и интегральный поток рассеянного поля, создаваемого сканирующим ближнепольным зондом. Также рассмотрены методы томографии, основанные на измерениях двумерного распределения вариаций эффективной яркостной температуры собственного теплового излучения среды или импеданса резонансной антенны, обусловленные подповерхностными вариациями температуры или диэлектрических параметров среды соответственно.

3. Методы сканирующей томографии

Сканирующая низкочастотная томография

Электромагнитную томографию, основанную на измерениях возмущенного поля, легче всего реализовать в низкочастотном диапазоне. Известно, что при уменьшении частоты реальная часть комплексной диэлектрической проницаемости диэлектриков уменьшается по сравнению с мнимой частью, и на достаточно низких частотах ею можно пренебречь. Одновременно возрастает толщина скин-слоя, на масштабе которого волна в среде затухает. Эти особенности низкочастотного диапазона используются в классической задаче А. Н. Тихонова о низкочастотном магнитотеллурическом зон-

дировании профиля проводимости земной коры (см., например, в работах [3, 24–27]. При зондировании на частотах от тысячных долей герца до сотен герц, глубина проникновения излучения на минимальных длинах волн достигает километровых масштабов.

Соответствующая обратная задача для коэффициента волнового уравнения чрезвычайно сложна. Впервые она была сформулирована А. Н. Тихоновым [24], и решалась им в одномерном случае для многослойной модели среды методом минимизации функционала невязки. Очевидно, что приближение одномерное неоднородной среды может легко нарушаться в реальных условиях. Рассматриваемый в данной работе подход позволяет решать задачу томографии трехмерной диэлектрической структуры земной коры в рамках теории возмущений.

Анализ существенно упрощается благодаря тому, что на низких частотах измерений комплексная диэлектрическая проницаемость для земной коры $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' = -i\frac{4\pi\sigma}{\omega}$ зависит лишь от одного параметра — проводимости σ . Другое существенное упрощение связано с тем фактом, что в силу справедливости граничных условий Леонтовича поле падающей волны в среде можно рассматривать как плоскую электромагнитную волну с векторами электрического и магнитного поля, направленными вдоль осей x и y соответственно ($E_0 = E_{0x}x_0$, $H_0 = H_{0y}y_0$), которая распространяется нормально к земной поверхности $z = 0$. В среде невозмущенные поля E_0 , H_0 имеют вид волны, затухающей с ростом глубины в поглощающем полупространстве:

$$E_0(\mathbf{r}) = E_{0x} \exp(ikz)x_0 = E_{0x} \exp\left(\frac{z}{\delta} + i\frac{z}{\delta}\right)x_0; \quad (35)$$

$$\begin{aligned} H_0(\mathbf{r}) &= H_{0y} \exp\left(\frac{z}{\delta} + i\frac{z}{\delta}\right)y_0 = \\ &= E_{0x} \frac{c(i-1)}{\omega\delta} \exp\left(\frac{z}{\delta} + i\frac{z}{\delta}\right)y_0, \end{aligned} \quad (36)$$

где $\delta = \frac{c}{\sqrt{2\pi\omega\sigma_0}}$ — толщина скин-слоя. Можно видеть, что поле невозмущенной волны в среде не зависит от поперечных координат и, следовательно, войдет в интегральные уравнения (26), (27) для рассеянного поля лишь как множитель при ε_1 . Измерения выполняются на уровне поверхности ($z = 0$) в зависимости от частоты измерений ω . С учетом указанных выше упрощений развитая выше теория приводит к весьма лаконичным и наглядным уравнениям, следующим из (26), (27):

$$\begin{aligned} E_1(\kappa_x, \kappa_y, \omega) &= \frac{1}{8\pi} \frac{E_{0x}}{\sigma_0} \int_{-\infty}^0 \sigma_1(\kappa_x, \kappa_y, z') \times \\ &\times \exp\left(\frac{z'}{\delta} + i\frac{z'}{\delta}\right) \exp[\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}(z - z')] \times \\ &\times \frac{(k^2 - \kappa_x^2)x_0 - \kappa_x\kappa_y y_0 \mp \kappa_x\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}z_0}{i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}} dz'; \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} H_1(\kappa_x, \kappa_y, z) &= H_{0y} \frac{(1+i)\omega\delta}{4c^2} \int_{-\infty}^0 \sigma_1(\kappa_x, \kappa_y, z') \times \\ &\times \exp\left(\frac{z'}{\delta} + i\frac{z'}{\delta}\right) \exp[\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}(z - z')] \times \\ &\times \frac{y_0\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2} + z_0\kappa_y}{i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}} dz'. \end{aligned} \quad (38)$$

Если, например, методом двумерного сканирования измеряются вариации y -компоненты магнитного поля на уровне поверхности ($z = 0$) в зависимости от частоты падающей волны, то из уравнения (38) следует еще более простое уравнение:

$$\begin{aligned} H_{1y}(\kappa_x, \kappa_y, \omega)/H_{0y} &= \frac{(1+i)\omega\delta}{4c^2} \int_{-\infty}^0 \sigma_1(\kappa_x, \kappa_y, z') \times \\ &\times \exp\left(\frac{z'}{\delta} + i\frac{z'}{\delta}\right) \exp[\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}z'] dz'. \end{aligned} \quad (39)$$

Уравнение (39) соответствует по типу уравнению (2), если в качестве параметра D рассматривать частоту измерений ω . Из (39) можно видеть, что вклад неоднородностей среды в возмущения полей экспоненциально уменьшается на масштабе скин-слоя δ , толщина которого зависит от частоты, возрастая с уменьшением последней, что и лежит в основе метода глубинного зондирования. Вместе с тем, можно видеть, что существует и другой вид затухания, определяемый второй экспонентой, который для ближнеполюсных компонент поперечного спектра таких, что $\kappa_{\perp}^2 = \kappa_x^2 + \kappa_y^2 > |k|^2$, быстро увеличивается с ростом значений поперечных волновых чисел. Эти квазистационарные компоненты затухают вблизи неоднородностей, но, конечно, вносят свой вклад в измеряемые поля.

С практической точки зрения важно заметить, что ввиду стационарности среды можно использовать тот факт, что левая часть уравнения (39) представляет собой отношение спектра вариаций поля к амплитуде невозмущенного поля — это позволяет проводить измерения не одновременно, а по паре точек (одна из которых — за пределами области неоднородностей) с использованием различных внешних источников.

Сканирующая зондовая томография

Сканирующая зондовая томография предлагает как развитие возможностей методов сканирующей ближнеполюсной микроскопии. Этот вид микроскопии использует зонды с апертурой, которая существенно меньше длины излучаемого или принимаемого зондом света, что позволяет реализовать разрешающую способность деталей анализируемой поверхности с размерами, много меньшими длины волны. Именно трансформация неоднородностями поверхности ближнего поля излучения зонда в волновое, наблюдаемое в разных схемах в отраженном или проходящем свете в дальней зоне, используется для получения изображений в схеме измерений, где зонд является излучателем. В схемах, где зонд принимает излучение внешнего источника, которое

проходит через образец или отражается от него, используется трансформация на неоднородностях волнового поля в ближнее, вариации которого и измеряются зондом с малой апертурой.

Исторически первые ближнепольные микроскопы были созданы в СВЧ диапазоне [28], а уже потом появились различные схемы сканирующей оптической ближнепольной микроскопии (СБОМ) [29–31]. Все эти методы были нацелены на измерения поверхности с субволновым разрешением. Учет сглаживающего действия аппаратной функции зонда на основе разработанных в работах [3, 21, 22] методов деконволюции изображений (решения обратных задач для интегральных уравнений типа двумерной свертки) позволил реализовать в СБОМ субапертурную разрешающую способность.

Осуществление ближнепольного подхода к томографии подповерхностных неоднородностей должно, следовательно, в первую очередь, исключить влияние поверхностной структуры. Это может быть достигнуто измерениями над плоской и достаточно гладкой поверхностью. Следует также иметь в виду, что измерения фазы сигнала не всегда осуществимы (особенно, в оптическом диапазоне), поэтому далее будут рассмотрены и такие методы измерений, в которых информация о фазе не используется.

Излучающий зонд. Сначала рассмотрим задачу томографии в случае, когда излучающий зонд осуществляет двумерное сканирование над поверхностью среды, содержащей область с неоднородностями, а измеряются вариации полной мощности сигнала, прошедшей через образец (рис. 2).

Измерительным прибором регистрируются вариации интегральной (по поперечным координатам) интенсивности излучения, т. е. среднего модуля z -компоненты вектора Пойнтинга, прошедшей через образец с неоднородностями. Будем считать, что в измерительный прибор направляется вся мощность излучения, проходящая через поперечное сечение на некоторой глубине z в волновой зоне за пределами области неоднородностей. На этой глу-

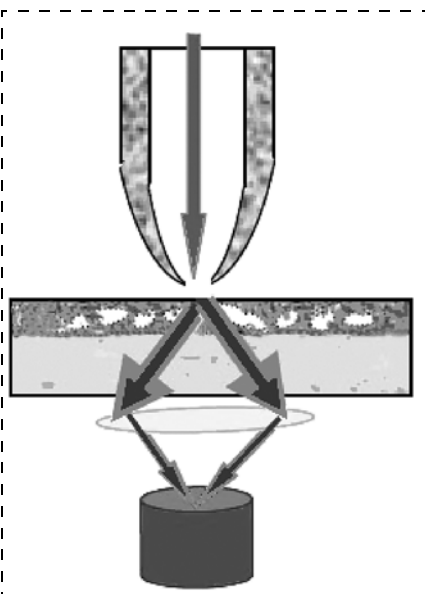


Рис. 2. Схема сканирующей ближнепольной томографии для излучающего зонда

бине z интегральная интенсивность сигнала в зависимости от положения зонда при двумерном сканировании определяется как

$$S(z, r_1) = \iint \frac{c}{8\pi} \operatorname{Re}[\mathbf{E} \cdot \mathbf{H}^*]_z dx dy = \iint \frac{c}{16\pi} ((\mathbf{E}^* \cdot \mathbf{H})_z + [\mathbf{E} \cdot \mathbf{H}^*]_z) dx dy \cong \iint \frac{c}{16\pi} (E_{0x} H_{0y}^* - E_{0y} H_{0x}^* + E_{0x} H_{1y}^* - E_{0y} H_{1x}^* + E_{1x} H_{0y}^* - E_{1y} H_{0x}^* + E_{0x}^* H_{0y} - E_{0y}^* H_{0x} + E_{0x}^* H_{1y} - E_{0y}^* H_{1x} + E_{1x}^* H_{0y} - E_{1y}^* H_{0x}) dx dy. \quad (40)$$

Отсюда следует, что вариации интенсивности выражаются соотношением

$$S_1(z, r_1) \cong \iint \frac{c}{16\pi} [(E_{0x} H_{1y}^* - E_{0y} H_{1x}^* + E_{1x} H_{0y}^* - E_{1y} H_{0x}^*) + \text{к. с.}] dx dy, \quad (41)$$

где к. с. — комплексно-сопряженное выражение.

Оказывается, что если, используя полученные соотношения для полей, выполнить в соотношении (41) интегрирование по поперечным координатам среды, то в результате получается уравнение свертки по поперечным координатам зонда. Это позволяет свести задачу томографии к одномерному интегральному уравнению для глубинного профиля компонент поперечного спектра вариаций сигнала [см. Приложение, формула (18П)]. Однако из-за потери фазовой информации в измерениях задачу можно решать только для случаев, когда возмущение диэлектрической проницаемости либо чисто действительное ($\varepsilon_1 = \varepsilon'_1$), либо чисто мнимое ($\varepsilon_1 = \varepsilon''_1$). Тогда можно использовать разложение (18П) измеренного сигнала в спектр по поперечным координатам зонда, которое, например, для $\varepsilon_1 = \varepsilon'_1$ представимо в компактном виде как

$$S_1(k_x, k_y, z_1, L_x, L_y) = \int_{-\infty}^0 \varepsilon'_1(k_x, k_y, z') \times K(j_x, z, z', z_1, k, k_x, k_y, L_x, L_y) dz'. \quad (42)$$

Таким образом, показано, что рассматриваемая задача сканирующей ближнепольной томографии сводится к виду (2) и может быть решена предложенным для этого уравнения методом. Ядро K (см. (18П)) содержит интеграл по всему интервалу возможных сдвигов пространственных частот. Это и соответствует преобразованию ближних полей в распространяющиеся. Параметры излучающего токового распределения определяют глубинное распределение ядра (42). Так, в качестве параметра D [см. (2)], определяющего разрешение по глубине, в выражении (42) могут быть использованы высота зонда над поверхностью z_1 , размеры апертуры L_x, L_y , частота сигнала.

На рис. 3 представлены результаты численного моделирования сканирующей ближнепольной оптической томографии по замкнутой схеме.

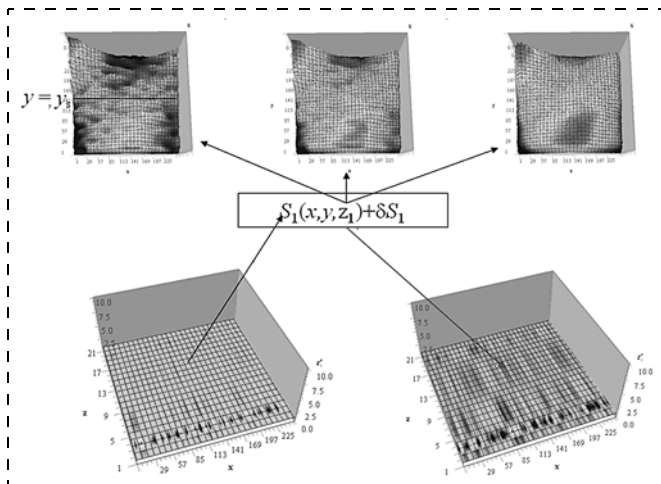


Рис. 3. Численное моделирование метода сканирующей томографии для излучающего зонда

Численное моделирование осуществлялось на основе структуры поверхностных неоднородностей, полученной из реальных измерений СБОМ [3, 21] (на длине волны 488 нм в квадратной области со стороной 845 нм с помощью зонда с размером апертуры ~ 70 нм). Путем "погружения" этой структуры внутрь среды и псевдослучайного "размазывания" по глубине относительно некоторого среднего уровня генерировалось исходное распределение трехмерных неоднородностей $\varepsilon = \varepsilon'(x, y, z)$, глубинный разрез которого вдоль линии $y = y_s$ представлен на рис. 3 вверху слева.

Для этого распределения с учетом справедливости борновского приближения для описанных выше исходных данных вычислялось "точное" двумерное (по поперечным координатам) распределение сигнала, измеряемого на трех уровнях высоты z_1 , выбранных таким образом, чтобы эффективная глубина формирования (8) перекрывала область глубин, в которой сосредоточены неоднородности. К этим "точным" распределениям добавлялась случайная нормально распределенная погрешность, моделирующая ошибки измерений. Полученные таким образом "данные измерений" представлены на рис. 3 в верхнем ряду так, что эффективная глубина формирования сигнала (глубина зондирования) возрастает слева направо. По этим данным из решения (42) методом Тихонова восстанавливался глубинный профиль компонент поперечного спектра вариаций диэлектрической проницаемости, а решение задачи томографии получалось путем двумерного обратного преобразования Фурье.

Глубинный разрез $\varepsilon = \varepsilon'(x, y_s, z)$ восстановленной структуры неоднородностей вдоль линии $y = y_s$ представлен на рис. 3 внизу справа. Сравнение с исходным распределением показывает, что локализация подповерхностных неоднородностей восстановлена в целом правильно и с субволновым разрешением (не хуже 50 нм), что указывает на эффективность созданного алгоритма. Время решения данной задачи томографии на сетке $(256 \times 256 \times 32)$ составило несколько минут вычислений на персональном компьютере, поэтому не вызывает сомнения возможность решения задач и с более высокой размерностью.

Принимающий зонд. Теперь рассмотрим задачу томографии в случае, когда зонд в процессе двумерного сканирования над плоской поверхностью среды принимает излучение, возникающее при прохождении сигнала внешнего источника через образец с неоднородностями (рис. 4).

Поскольку учет отражений от верхней и нижней границ образца не представляет трудности, а сигнал внешнего источника, как показано выше, может быть разложен в спектр по плоским волнам, представим для большей наглядности результатов невозмущенное поле в среде как одиночную плоскую волну:

$$E_0^{in}(\mathbf{r}) = E_0 \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r}). \quad (43)$$

В верхнем полупространстве невозмущенное поле выражается формулой (20П), а его поперечный спектр имеет вид

$$E_1^{\text{out}}(\kappa_x, \kappa_y, z) = \frac{1}{8\pi\varepsilon_0} \int_{-\infty}^0 \varepsilon_1(k_x + \kappa_x, k_y + \kappa_y, z') \times \\ \times \frac{\exp\{\pm i\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2}z \pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}z'\}}{i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}} [E_{1x}(-\kappa_x, -\kappa_y)x_0 + \\ + E_{1y}(-\kappa_x, -\kappa_y)y_0 + E_{1z}(-\kappa_x, -\kappa_y)z_0] dz'. \quad (44)$$

Можно видеть, что спектр вариаций поля связан со спектром вариаций диэлектрической проницаемости уравнением Фредгольма типа (2) и для уравнения (44) применим развиваемый метод сканирующей томографии. В качестве параметра D , определяющего глубину формирования принимаемого сигнала, могут служить компоненты волнового вектора зондирующего поля или частота сигнала. Сдвиг спектра возмущенной компоненты поля относительно спектра неоднородностей диэлектрической проницаемости вполне аналогичен сдвигу в уравнении (32) и указывает на тот факт, что в крупномасштабных вариациях поля проявляются мелкомасштабные вариации диэлектрической структуры.

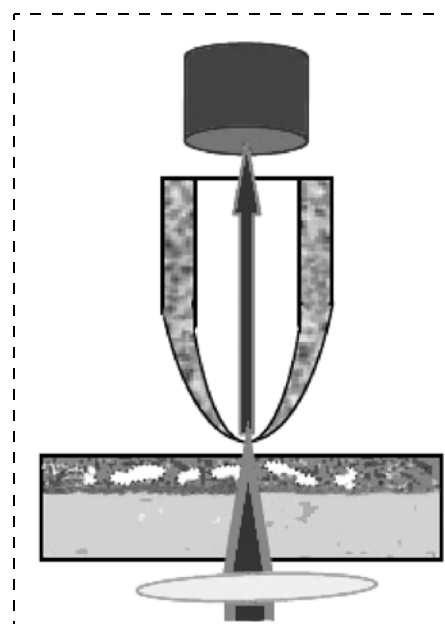


Рис. 4. Схема сканирующей ближнепольной томографии для принимающего зонда

Как уже отмечалось, измерения поля не всегда легко осуществимы. Пусть, например, измеряемое зондом значение сигнала определяется так же, как в ближнепольной сканирующей оптической микроскопии — сверткой двумерной аппаратной функции зонда и интенсивности электрической компоненты поля из соотношения

$$S(x_1, y_1, z_1) = \frac{c\sqrt{\varepsilon_0}}{16\pi} \iint F(x_1 - x, y_1 - y) \times |E^{\text{out}}(x, y, z_1)|^2 dx dy. \quad (45)$$

Данные двумерного сканирования вариаций интенсивности на высоте z_1 могут быть разложены в спектр Фурье по поперечным координатам движения зонда, учитывая, что $\varepsilon_0 = 1$ и из $|E_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1)| \gg |E_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1)|$ следует

$$|E|^2 = |E_0|^2 + 2\text{Re}(E_0^* E_1) + |E_1|^2 \cong |E_0|^2 + 2\text{Re}(E_0^* E_1) = |E_0|^2 + (E_0^* E_1) + (E_0^* E_1)^*. \quad (46)$$

В результате получается выражение (26П), которое в компактной форме имеет вид одномерного интегрального уравнения для глубинного профиля компонент поперечного спектра вариаций сигнала:

$$S_1(\kappa_x, \kappa_y, z_1) = F(\kappa_x, \kappa_y) \left(\int_{-\infty}^0 \varepsilon_1(\kappa_x + 2\kappa_x, \kappa_y + 2\kappa_y, z') \times K_1(\kappa_x, \kappa_y, \kappa_x, \kappa_y, z', z_1) dz' + \int_{-\infty}^0 \varepsilon_1^*(\kappa_x - 2\kappa_x, \kappa_y - 2\kappa_y, z') K_2(\kappa_x, \kappa_y, \kappa_x, \kappa_y, z', z_1) dz' \right). \quad (47)$$

В качестве параметра D в уравнении (2), который определяет глубину формирования принимаемого сигнала, при решении (47) могут служить компоненты волнового вектора зондирующего поля или частота сигнала. Сдвиг спектра возмущенной компоненты поля относительно спектра неоднородностей диэлектрической проницаемости вдвое превышает аналогичный сдвиг для спектра поля в (44), т. е. и в крупномасштабных вариациях интенсивности еще легче проявляются мелкомасштабные вариации диэлектрической структуры, что позволяет достигнуть субволнового разрешения. Передаточная функция $F(\kappa_x, \kappa_y)$ играет роль фильтра пространственных частот.

Уравнение (47) удобно решать, начиная с края спектра неоднородностей, так, чтобы можно было пренебречь вкладом 2-го слагаемого, а потом использовать в этом слагаемом ранее определенные профили спектральных компонент.

Сканирующая микроволновая томография

Как и в случае ближнепольной сканирующей микроскопии, метод сканирующей ближнепольной томографии оказалось проще реализовать в микроволновом диапазоне, чем в оптическом. В диапазоне СВЧ возможны как пассивные измерения собствен-

ного теплового излучения сред (радиометрия), так и измерения в активном режиме с излучающей резонансной антенной, где измеряются параметры отражения от антенны, связанные с вариациями импеданса, вносимого средой (импедансные измерения). СВЧ радиометрия используется главным образом для определения одномерных распределений температуры сред (атмосферы, водной среды, грунта, живых тканей) [3, 32–34]. Импедансные СВЧ измерения могут использоваться для определения структуры диэлектрических параметров сред [3, 35–38].

СВЧ радиометрическая томография температуры. В общем случае уравнение для принимаемой эффективной яркостной температуры получается из флуктуационно-диссипационной теоремы для корреляционной функции флуктуационных токов в поглощающей среде и теоремы взаимности в виде (см., например, [34])

$$T_B(\mathbf{r}) = \frac{\int_V T(\mathbf{r}') \varepsilon''(\mathbf{r}') |E(\mathbf{r}, \mathbf{r}')|^2 d\mathbf{r}'}{\int_V \varepsilon''(\mathbf{r}') |E(\mathbf{r}, \mathbf{r}')|^2 d\mathbf{r}'}, \quad (48)$$

где V — область, занимаемая поглощающей средой с мнимой частью комплексной диэлектрической проницаемости ε'' ; $T(\mathbf{r})$ — пространственное распределение температуры в среде; $E(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ — комплексная амплитуда электрического поля в точке $\mathbf{r}'$, создаваемого антенной, привязанной к точке $\mathbf{r}$ при ее работе в активном режиме. Распределение поля в среде определяется распределением тока, создаваемого в антенне. Для однородной по диэлектрической проницаемости среды задача СВЧ томографии трехмерного распределения температуры не связана с использованием борновского приближения, поэтому соответствующая прямая задача решается точно с использованием поля E_0 , определяемого соотношением (7П). Соответственно, обратная задача — задача томографии — имеет сходимость к точному решению при уменьшении погрешности измерений.

Будем считать, что неоднородности температуры расположены в некоторой области полупространства $z \leq 0$, так что $T(\mathbf{r}) = T_0 + T_1(\mathbf{r})$. Тогда в предлагаемом методе сканирующей СВЧ радиометрической томографии измеряемые на высоте z_1 двумерные распределения $T_{B1}(x, y, D)$ (в зависимости от параметра D , определяющего чувствительности измерений к глубине) связаны с вариациями температуры среды интегральным уравнением типа свертки по поперечным координатам:

$$T_{B1}(x_1, y_1, D) = \int \int \int_{x', y' = -\infty}^0 T_1(x', y', z') \times \frac{|E_0(x' - x_1, y' - y_1, z', z_1)|^2}{\int \int \int_{x', y' = -\infty} |E_0(x' - x_1, y' - y_1, z', z_1)|^2 dx' dy' dz'} dx' dy' dz', \quad (49)$$

а искомое интегральное уравнение для компонент поперечного спектра вариации яркостных температур имеет вид:

$$T_{B1}(k_x, k_y, D) = \int_{-\infty}^0 T_1(k_x, k_y, z') K(k_x, k_y, z', D) dz', \quad (50)$$

где ядро уравнения $K(k_x, k_y, z)$ описывается формулой (27П). Это ядро также содержит интеграл по всем возможным сдвигам пространственных частот, что обеспечивает чувствительность измерений к субволновым (и даже к субапертурным) температурным неоднородностям. Для двумерного однородного распределения тока в антенне $\mathbf{j}(x, y) = j_x \mathbf{x}_0, j_x = \text{const}$ в плоскости $x-y$ в прямоугольнике $|x - x_1| < L_x/2, |y - y_1| < L_y/2$, типичного для электрически малых диполей, спектр тока в ядре (27П) имеет вид (34), откуда можно видеть, что ядро уравнения K зависит от размеров ближнепольной антенны L_x, L_y . Эти размеры, высота z_1 или частота измерений ω могут использоваться в качестве параметра D , определяющего чувствительность измерений к глубинному распределению температурных неоднородностей среды.

Далее уравнение (50) решается как одномерное интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода относительно глубинного профиля поперечного спектра $T_1(k_x, k_y, z')$ для каждой пары k_x, k_y в интервалах дискретного спектрального разложения, а искомое решение $T_1(x, y, z)$ получается путем обратного преобразования Фурье восстановленного поперечного спектра неоднородностей среды. Для измерений в дальней зоне постановка задачи томографии в описываемом виде не представляет принципиальных трудностей, поскольку имеется возможность точно измерить диаграмму направленности антенны. В качестве параметра D для измерений в дальней зоне может использоваться только частота принимаемого излучения. При измерении сплошных сред с помощью ближнепольных (в частности, контактных) антенн на аппаратную функцию оказывают влияние ближнепольные компоненты, вклад которых зависит от размеров антенны и ее расстояния от исследуемой среды. Это позволяет наряду с частотой использовать указанные параметры в качестве параметра D в (50) [3, 7]. Описанный метод томографии может применяться также в некоторых задачах радиоастрономии.

Сканирующая СВЧ импедансная томография. Использование в активном режиме ближнепольных резонансных антенн с размерами апертуры, много меньшими длины волны, таких же, как применяемые в ближнепольной радиометрии [3–7], может быть положено в основу метода сканирующей импедансной томографии. В этом методе осуществляется зондирование подповерхностных неоднородностей диэлектрической структуры среды, а исходными данными для анализа являются вариации параметров резонансной антенны, измеряемые с помощью рефлектометра. Эти параметры — вариации коэффициента отражения от входа антенны R или сдвига Δf_0 частоты согласования при ее контакте со средой зависят от вариаций эффективного импеданса, вносимого вариациями параметров среды в резонансный контур антенны. При этом на частоте f_0 достигается наилучшее согласование (минимум коэффициента отражения). На импеданс входной антенны $Z^a = R^a + iX^a$ (для электрически малых антенн

$R^a \ll X^a$) влияют окружающие электромагнитные поля, вариации которых связаны с вариациями диэлектрических параметров среды.

Ширина резонансной кривой слабо зависит от потерь на излучение, и изменения резонансной частоты и связанные с ними вариации коэффициента отражения определяются главным образом вариациями реактанса [37]. Эти малые вариации пропорциональны вариациям интеграла по объему от разности плотности электрического и магнитного полей, создаваемых в среде антенной, которая определяется мнимой частью вектора Пойнтинга:

$$X^a(\mathbf{r}_1) \propto \omega \int_V \frac{|\mathbf{H}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r})|^2 - \varepsilon'(\mathbf{r})|\mathbf{E}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r})|^2}{16\pi} d\mathbf{r}, \quad (51)$$

где положение антенны задано точкой $\mathbf{r}_1$, на высоте z_1 над полупространством $z \leq 0$. В данном случае естественно использовать явную зависимость реактанса от действительной части диэлектрической проницаемости ε' , полагая (если возмущение достаточно мало) поля, равными невозмущенным полям $\mathbf{E}_0, \mathbf{H}_0$, для томографии трехмерной структуры ε' . Для постановки задачи о структуре мнимой части диэлектрической проницаемости необходимо, очевидно, измерять также потери на излучение по вариациям добротности согласующего резонатора.

Вводя по аналогии с яркостной температурой эффективную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_1^{\text{eff}} = \frac{\Delta \varepsilon'}{\Delta R} R_1$ как произведение калибровочной константы и вариаций коэффициента отражения, из уравнения (28) получаем трехмерное интегральное уравнение

$$\varepsilon_1^{\text{eff}}(x_1, y_1, D) = \int_{x, y, z=-\infty}^0 \int \int \varepsilon'_1(x', y', z') \times \frac{|E_0(x' - x_1, y' - y_1, z', z_1, D)|^2}{\int_{x, y, z=-\infty}^0 \int \int |E_0(x' - x_1, y' - y_1, z', z_1, D)|^2 dx' dy' dz'} dx' dy' dz', \quad (52)$$

свертка которого по поперечным координатам приводит к одномерному интегральному уравнению

$$\varepsilon_1^{\text{eff}}(k_x, k_y, D) = \int_{-\infty}^0 \varepsilon'_1(k_x, k_y, z') K(k_x, k_y, z', D) dz'. \quad (53)$$

Можно видеть, что ядро K уравнения (53) в точности совпадает с ядром (50) для случая радиометрических измерений и тоже описывается формулой (27П). Уравнение (53) сводит задачу сканирующей СВЧ импедансной томографии к одномерному интегральному уравнению типа Фредгольма 1-го рода, которая решается далее так же, как было описано в разд. 1 статьи. Так же, как и при решении уравнения (50), размеры ближнепольной антенны L_x, L_y , ее высота z_1 над поверхностью среды или частота измерений ω могут использоваться при решении (53) в качестве параметра D , определяющего чувствительность измерений к глубинному распределению диэлектрических неоднородностей среды и

эффективную глубину зондирования. Так же, как и выше, измерения чувствительны к субволновым и субапертурным неоднородностям.

Этот метод апробирован для томографии неоднородной структуры диэлектрической проницаемости живых тканей человеческого тела [38], где была реализована предсказанная теоретически субволновая разрешающая способность ближнепольных измерений.

Заключение

Разработанный метод сканирующей электромагнитной томографии неоднородного полупространства может быть реализован с использованием различных существующих видов поверхностной и подповерхностной диагностики сред. Приведенные результаты численного моделирования продемонстрировали работоспособность метода и эффективность численного алгоритма. Метод был реализован на практике в микроволновом диапазоне для восстановления трехмерной подповерхностной структуры диэлектрической проницаемости живых тканей.

Автор признателен Г. М. Альтшуллеру за помощь в проведении экспериментов и М. Б. Черняевой — за полезные консультации.

Работа выполнена при поддержке программ фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН (проекты "Ближнепольное электромагнитное зондирование диэлектрических и проводящих сред" и "Когерентная томография земной коры с использованием ультранизкочастотных электромагнитных полей").

Список литературы

1. Radon J. Über die bestimmung von funktionen durch ihre integralwerte langs gewisser mannigfaltigkeiten. Leipzig: Ber. Verh. Sachs. Akad. Wiss., 1917.
2. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я., Тимонов А. А. Математические задачи компьютерной томографии. — М.: Наука, 1987. 158 с.
3. Gaikovich K. P. Inverse Problems in Physical Diagnostics. New York: Nova Science Publishers Inc. 2004. 304 p.
4. Gaikovich K. P. Near-field microwave tomography // Proc. of 15th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo — 2005). Sevastopol, Crimea, Ukraine. September 12–16, 2005 — Conference Proceedings. Sevastopol: Weber Publishing Co., 2005. P. 865–866.
5. Gaikovich K. P. Near-field scanning tomography // Proc. of 8th International Conference on Transparent Optical Networks ICTON 2006, Nottingham, United Kingdom, June 18–22, 2006. V. 1. P. 250–255.
6. Гайкович К. П., Резник А. Н. Эффект ближнего поля теплового радиоизлучения // Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 72. Вып. 11. С. 792–796.
7. Gaikovich K. P., Reznik A. N., Vaks V. L., Yurasova N. V. New effect in near-field thermal emission // Physical Review Letters. 11 March 2002. V. 88. N 10. P. 104302–1–104302–4.
8. Фейнберг Е. Л. Распространение электромагнитных волн вдоль земной поверхности. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 546 с.
9. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Кочкиков И. В., Рау Э. И., Савин Д. О., Спивак Г. В., Степанов В. В. Вычислительная микротомография объектов в рентгеновской и оптической сканирующей микроскопии // Докл. АН СССР. 1986. Т. 289. № 5. С. 1104–1108.
10. Тихонов А. Н., Бочикашвили П. Н., Гончарский А. В., Матвиенко А. Н., Степанов В. В. Микротомография слоистых сред в конусных пучках // Докл. АН СССР. 1987. Т. 296. № 5. С. 11095–1098.

11. Huang P., Swanson E. A., Lin C. P., Schuman J. S., Stinson W. G., Chang W. et al. Optical Coherence Tomography // Science. 1991. Vol. 254. P. 1178–1181.
12. Feldchtein F. I., Gelikonov G. V., Gelikonov V. M., Kuranov R. V., Sergeev A. M., Gladkova N. D. et al. Endoscopic applications of optical coherence tomography // Optics Express. 1998. Vol. 3. N 6. P. 257–269.
13. Semenov S. Y., Bulyshev A. E., Souvorov A. E., Svenson R. H., Sirov Y. E., Borisov V. Y., Pozukh V. G., Kozlov I. M., Nazarov A. G., Tatsis G. P. Microwave tomography: Theoretical and experimental investigation of the iteration reconstruction algorithm // IEEE Trans. Microwave. Theory Tech. 1998. Vol. 46. P. 133–141.
14. Semenov S. Y., Svenson R. H., Bulyshev A. E. et al. Three-dimensional microwave tomography: initial experimental imaging of animals // IEEE. Trans. Biomed. Eng. 2002. Vol. 49. P. 55–63.
15. Carney P., Markel V., Schotland J. Near-Field Tomography without Phase Retrieval // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 86. P. 5874–5877.
16. Carney P. S., Schotland J. C. Theory of total-internal-reflection tomography // Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision. 2003. N 3. P. 542–547.
17. Carney P. S., Frazin R. A., Bozhevolny S. I. et al. A computational lens for the near-field // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 92. P. 163–903.
18. Carney P. S., Schotland J. C. Near-Field Tomography // Inside Out: Inverse Problems / Ed. Gunther Uhlman. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
19. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983. 200 с.
20. Гайкович К. П., Жилин А. В. Восстановление двумерного распределения радиояркостности по измерениям с известной диаграммой направленности // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 10. С. 940–949.
21. Гайкович К. П., Дряхлушин В. Ф., Жилин А. В. Улучшение разрешающей способности СБОМ-изображений на основе учета передаточной функции зонда // Микросистемная техника. 2003. № 7. С. 19–21.
22. Gaikovich K. P., Dryakhlushin V. F. Thin structure of near-field emission of semiconductor laser // Pr. of SPIE. 2004. Vol. 5582. P. 253–260.
23. Martin O. J. F., Girard C., Dereux A. Generalized Field Propagator for Electromagnetic Scattering and Light Confinement // Phys. Rev. Lett. 1995. Vol. 74. N 4. P. 526.
24. Тихонов А. Н. Об определении электрических характеристик глубоких слоев земной коры // Док. АН СССР. Нов. сер. 1950. Т. 73. № 2. С. 295–297.
25. Велихов Е. П., Жамалетдинов А. А., Собчаков Л. А. и др. Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ-диапазона // Док. АН РАН. 1994. Т. 338. № 1. С. 106–109.
26. Поляков С. В., Ермакова Е. Н., Поляков А. С., Якунин М. Н. Формирование спектров и поляризации фонового ультранизкочастотного электромагнитного шума на поверхности земли // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т. 42. № 2. С. 240–248.
27. Gaikovich K. P. Ultra low frequency sounding and tomography of earth crust // Pr. of the Third International Conference "Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals". 18–22 September 2006. Sevastopol, Ukraine). IEEE. P. 294–296.
28. Ash E. A., Nichols G. Super-resolution aperture scanning microscope // Nature. Vol. 1972237, p. 510–512.
29. Pohl D. W., Denk W., Lanz M. Optical stethoscopy: image recording with resolution $\lambda/20$ // Appl. Phys. Lett. 1984. Vol. 44. N 7. P. 651–653.
30. Durig U., Pohl D. W., Rohrer F. Near-field optical-scanning microscopy // J. Appl. Phys. 1986. Vol. 59. N 10. P. 3318–3327.
31. Lewis A., Isaacson M., Harootunian A., Murray A. Development of a 500 Å resolution light microscope. // Ultramicroscopy (Netherlands). 1984. Vol. 13. P. 227–231.
32. Leroy I., Bocquet B., Mamouni A. Non-invasive microwave radiometry theirometry // Physiol. Meas. 1998. Vol. 19. P. 127–148.
33. Гайкович К. П., Сумин М. И., Троицкий Р. В. Определение глубинного профиля температуры методом многочас-

точной радиотермографии в медицинских приложениях // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. № 9. С. 1104–1112.

34. **Gottis P. G., Uzunoglu N. K., Papakonstantinou P. S.** Measurements of three-dimensional temperature distribution inside dielectric objects using near-field radiometry // Journal of Electromagnetic Waves. 1988. V. 5. N 1. P. 62–68.

35. **Gaikovich K. P., Nozdrin Yu. N., Reznik A. N., Vaks V. L.** Reconstruction of the subsurface dielectric structure by microwave near-field measurements // Physics of Low-Dimensional Structures. 2002. Vol. 5/6. P. 99–104.

36. **Altshuller G. M., Gaikovich K. P., Vaks V. L.** Microwave subsurface imaging of living tissues // Physics of Low-Dimensional Structures. 2003. Vol. 3/4. P. 203–208.

37. **Reznik A. N., Yurasova N. V.** Electrodynamics of microwave near-field probing: Application to medical diagnostics // Journal of Applied Physics. 2005. Vol. 98. N 11. P. 114701 (9 pages).

38. **Gaikovich K. P.** Subsurface Near-Field Scanning Tomography // Physical Review Letters. 4 May 2007. Vol. 98. N 18. P. 183902-1–183902-4.

Приложение

Формулы для электрического и магнитного полей, создаваемых распределением тока в однородном пространстве с комплексной диэлектрической проницаемостью ε :

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}) = & \frac{1}{i\omega\varepsilon_0} \int_V \left[\frac{\mathbf{e}^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^3} \cdot \left\{ \left[-ik - \frac{2}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \right] \times \right. \right. \\ & \times \left. \left[-ik - \frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \right] + \frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^2} \right\} \cdot (\mathbf{j}(\mathbf{r}'), (\mathbf{r}-\mathbf{r}')) \times \\ & \times (\mathbf{r}-\mathbf{r}') + \left\{ \frac{\mathbf{e}^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^2} \left[-ik - \frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \right] + \right. \\ & \left. \left. + k^2 \frac{\mathbf{e}^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \right\} \cdot \mathbf{j}(\mathbf{r}') \right] d\mathbf{r}'; \end{aligned} \quad (1\text{П})$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(\mathbf{r}) = & \frac{1}{c} \int_V \left(\frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^2} + \frac{ik}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \right) \times \\ & \times \left[\mathbf{j}(\mathbf{r}') \frac{(\mathbf{r}-\mathbf{r}')}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \right] \mathbf{e}^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} dx' dy' dz'. \end{aligned} \quad (2\text{П})$$

Двумерное Фурье-преобразование (1П) и (2П) по поперечным волновым числам приводит к следующим выражениям для компонент поперечного спектра:

$$\begin{aligned} E(\kappa_x, \kappa_y, z) = & \frac{1}{2i\varepsilon_0\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp\{\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}(z-z')\}}{i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}} \times \\ & \times \{j_x(\kappa_x, \kappa_y, z')[(k^2 - \kappa_x^2)\mathbf{x}_0 - \kappa_x\kappa_y\mathbf{y}_0 \mp \kappa_x\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}\mathbf{z}_0] + \\ & + j_y(\kappa_x, \kappa_y, z')[-\kappa_y\kappa_x\mathbf{x}_0 + (k^2 - \kappa_y^2)\mathbf{y}_0 \mp \kappa_y\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}\mathbf{z}_0] + \\ & + j_z(\kappa_x, \kappa_y, z')[\mp \kappa_x\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}\mathbf{x}_0 \mp \kappa_y\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}\mathbf{y}_0 + \\ & + \kappa_{\perp}^2\mathbf{z}_0]\} dz'; \end{aligned} \quad (3\text{П})$$

$$\begin{aligned} H(\kappa_x, \kappa_y, z) = & \frac{1}{2c} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp\{\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}(z-z')\}}{i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}} \times \\ & \times \{j_x(\kappa_x, \kappa_y, z')[\mathbf{y}_0(\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}) + \mathbf{z}_0(i\kappa_x)] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + j_y(\kappa_x, \kappa_y, z')[-\mathbf{x}_0(\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}) + \mathbf{z}_0(-i\kappa_y)] + \\ & + j_z(\kappa_x, \kappa_y, z')[\mathbf{x}_0(i\kappa_y) + \mathbf{y}_0(-i\kappa_x)]\} dz; \end{aligned} \quad (4\text{П})$$

где $\kappa_{\perp} = \sqrt{\kappa_x^2 + \kappa_y^2}$. Выбор знака перед радикалами осуществляется так, чтобы получить затухающую экспоненту. Исходные поля могут быть представлены в виде разложения по плоским волнам:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}) = & \frac{1}{i\varepsilon_0\omega} \int_V \frac{1}{8\pi^2} \times \\ & \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp\{-i\kappa_x(x-x') - i\kappa_y(y-y') \pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}(z-z')\}}{i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}} \times \\ & \times \{j_x(x', y', z')[(k^2 - \kappa_x^2)\mathbf{x}_0 - \kappa_x\kappa_y\mathbf{y}_0 \pm \kappa_x\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}\mathbf{z}_0] + \\ & + j_y(x', y', z')[-\kappa_y\kappa_x\mathbf{x}_0 + (k^2 - \kappa_y^2)\mathbf{y}_0 \pm \kappa_y\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}\mathbf{z}_0] + \\ & + j_z(x', y', z')[\pm \kappa_x\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}\mathbf{x}_0 \pm \kappa_y\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}\mathbf{y}_0 + \\ & + \kappa_{\perp}^2\mathbf{z}_0]\} d\kappa_x d\kappa_y dV'; \end{aligned} \quad (5\text{П})$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(\mathbf{r}) = & \frac{1}{8\pi^2 c} \times \\ & \times \left(\int_V \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp\{-i\kappa_x(x-x') - i\kappa_y(y-y') \pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}(z-z')\}}{i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}} \times \right. \\ & \times \{j_x(x', y', z')[(\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2})\mathbf{y}_0 + (-i\kappa_y)\mathbf{z}_0] + \\ & + j_y(x', y', z')[-(\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2})\mathbf{x}_0 + (i\kappa_x)\mathbf{z}_0] + \\ & \left. + j_z(x', y', z')[(-i\kappa_y)\mathbf{x}_0 + (i\kappa_x)\mathbf{y}_0]\} d\kappa_x d\kappa_y dx' dy' dz' \right). \end{aligned} \quad (6\text{П})$$

Если задать источник излучения в верхнем полупространстве в виде распределения электрического тока зонда $\mathbf{j}^p(x, y, z)$, то в нижнем полупространстве ($z \leq 0$) получаем поле:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_0^{in}(x, y, z) = & -\frac{1}{\omega} \int_V \frac{1}{8\pi^2} \times \\ & \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp\{-i\kappa_x(x-x') - i\kappa_y(y-y') \pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}z \pm i\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2}z'\}}{i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}} \times \\ & \times \left\{ j_x^p(x', y', z') \left[\frac{1}{\kappa_{\perp}^2} [\kappa_x^2(k_0^2 - \kappa_{\perp}^2)T_{\parallel} + \kappa_y^2\kappa_0^2 T_{\perp}] \mathbf{x}_0 + \right. \right. \\ & + \frac{\kappa_x\kappa_y}{\kappa_{\perp}^2} [(k_0^2 - \kappa_{\perp}^2)T_{\parallel} - k_0^2 T_{\perp}] \mathbf{y}_0 \pm \kappa_x\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2} T_{\parallel} \mathbf{z}_0 \left. \right] + \\ & + j_y^p(x', y', z') \left[\frac{\kappa_x\kappa_y}{\kappa_{\perp}^2} [(k_0^2 - \kappa_{\perp}^2)T_{\parallel} - k_0^2 T_{\perp}] \mathbf{x}_0 + \right. \\ & + \frac{1}{\kappa_{\perp}^2} [\kappa_y^2(k_0^2 - \kappa_{\perp}^2)T_{\parallel} + \kappa_x^2 k_0^2 T_{\perp}] \mathbf{y}_0 \pm \kappa_y\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2} T_{\parallel} \mathbf{z}_0 \left. \right] + \\ & + j_z^p(x', y', z') [(\pm\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2})[\kappa_x T_{\parallel} \mathbf{x}_0 + \kappa_y T_{\parallel} \mathbf{y}_0] + \\ & \left. + \kappa_{\perp}^2 T_{\parallel} \mathbf{z}_0] \right\} d\kappa_x d\kappa_y dV'. \end{aligned} \quad (7\text{П})$$

Соответствующий спектр можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_0^{in}(\kappa_x, \kappa_y, z) = & -\frac{1}{2\omega} \times \\ & \times \int_{z'} \frac{\exp i\{\pm\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}z \pm \sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2}z'\}}{\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2}} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left\{ j_x^p(\kappa_x, \kappa_y, z') \left[\frac{1}{\kappa_{\perp}^2} [\kappa_x^2 (k_0^2 - \kappa_{\perp}^2) T_{\parallel} + \kappa_y^2 k_0^2 T_{\perp}] \mathbf{x}_0 + \right. \right. \\
& + \frac{\kappa_x \kappa_y}{\kappa_{\perp}^2} [(k_0^2 - \kappa_{\perp}^2) T_{\parallel} - k_0^2 T_{\perp}] \mathbf{y}_0 \pm \kappa_x \sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2} T_{\parallel} \mathbf{z}_0 \left. \right] + \\
& + j_y^p(\kappa_x, \kappa_y, z') \left[\frac{\kappa_x \kappa_y}{\kappa_{\perp}^2} [(k_0^2 - \kappa_{\perp}^2) T_{\parallel} - k_0^2 T_{\perp}] \mathbf{x}_0 + \right. \\
& + \frac{1}{\kappa_{\perp}^2} [\kappa_y^2 (k_0^2 - \kappa_{\perp}^2) T_{\parallel} + \kappa_x^2 k_0^2 T_{\perp}] \mathbf{y}_0 \pm \\
& \pm \kappa_y \sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2} T_{\parallel} \mathbf{z}_0 \left. \right] + j_z^p(\kappa_x, \kappa_y, z') \times \\
& \times \left[(\mp \sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2}) [\kappa_x T_{\parallel} \mathbf{x}_0 + \kappa_y T_{\parallel} \mathbf{y}_0] + \kappa_{\perp}^2 T_{\parallel} \mathbf{z}_0 \right] dz'; (8\Pi)
\end{aligned}$$

$$\text{где } T_{\parallel} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_0} \sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2}}{\varepsilon_0 \sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2} + \sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}};$$

$$T_{\perp} = \frac{2\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2}}{\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2} + \sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}} - \text{коэффициенты Френеля.}$$

Для двумерного распределения тока в виде x -компоненты $\mathbf{j}^p = j_x^p(x', y', z') \delta(z' - z_1)$

$$\begin{aligned}
\mathbf{E}_0^{\text{in}}(x, y, z, z_1) = & -\frac{1}{\omega} \int dx' dy' \frac{1}{8\pi^2} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} j_x^p(x', y', z_1) \times \\
& \times \frac{\exp\{-i\kappa_x(x-x') - i\kappa_y(y-y') \pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2} z \pm i\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2} z_1\}}{\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2}} \times \\
& \times [f_x^{E0}(\kappa_x, \kappa_y) \mathbf{x}_0 + f_y^{E0}(\kappa_x, \kappa_y) \mathbf{y}_0 + \\
& + f_z^{E0}(\kappa_x, \kappa_y) \mathbf{z}_0] d\kappa_x d\kappa_y, (9\Pi)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{где } f_x^{E0} = & \frac{1}{\kappa_{\perp}^2} [\kappa_x^2 (k_0^2 - \kappa_{\perp}^2) T_{\parallel} + \kappa_y^2 k_0^2 T_{\perp}]; f_y^{E0} = \\
= & \frac{\kappa_x \kappa_y}{\kappa_{\perp}^2} [(k_0^2 - \kappa_{\perp}^2) T_{\parallel} - k_0^2 T_{\perp}]; f_z^{E0} = \pm \kappa_x \sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2} T_{\parallel}.
\end{aligned}$$

Если это двумерное распределение тока на высоте $z = z_1$ создается зондом, положение которого задается его поперечными координатами x_1 и y_1 , то с учетом спектрального представления этого распределения

$$\begin{aligned}
j_x^p(\kappa_x, \kappa_y, x_1, y_1) = & \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} j_x^p(x - x_1, y - y_1) \times \\
& \times \exp(-i\kappa_x x - i\kappa_y y) dx dy = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} j_x^p(x', y') \times \\
& \times \exp(-i\kappa_x x' - i\kappa_y y') dx dy \cdot \exp(-i\kappa_x x_1 - i\kappa_y y_1) = \\
& = j_x^p(\kappa_x, \kappa_y) \exp(-i\kappa_x x_1 - i\kappa_y y_1) (10\Pi)
\end{aligned}$$

поле в невозмущенной среде будет иметь вид:

$$\mathbf{E}_0^{\text{in}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = -\frac{1}{2} \frac{1}{\omega} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} j_x^p(\kappa_x, \kappa_y, z_1) \times$$

$$\begin{aligned}
& \times \frac{\exp\{-i\kappa_x(x-x_1) - i\kappa_y(y-y_1) \pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2} z \pm i\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2} z_1\}}{\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2}} \times \\
& \times [f_x^{E0}(\kappa_x, \kappa_y) \mathbf{x}_0 + f_y^{E0}(\kappa_x, \kappa_y) \mathbf{y}_0 - \\
& - f_z^{E0}(\kappa_x, \kappa_y) \mathbf{z}_0] d\kappa_x d\kappa_y. (11\Pi)
\end{aligned}$$

Магнитное поле определяется из уравнения Максвелла:

$$\begin{aligned}
\mathbf{H}_0^{\text{in}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = & i \frac{c}{\omega} \text{rot } \mathbf{E}_0^{\text{in}} = \frac{c}{2\omega^2} \times \\
& \times \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \frac{\exp\{-i\kappa_x(x-x_1) - i\kappa_y(y-y_1) \pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2} z \pm i\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2} z_1\}}{i\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2}} \times \\
& \times j_x^p(-\kappa_x, -\kappa_y, z_1) \{f_x^{H0}(\kappa_x, \kappa_y, \varepsilon_0) \mathbf{x}_0 + f_y^{H0}(\kappa_x, \kappa_y, \varepsilon_0) \mathbf{y}_0 + \\
& + f_z^{H0}(\kappa_x, \kappa_y, \varepsilon_0) \mathbf{z}_0\} d\kappa_x d\kappa_y, (12\Pi)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{где } f_x^{H0}(\kappa_x, \kappa_y, \varepsilon_0) = & [\pm \kappa_x \sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2} T_{\parallel} (-i\kappa_y) - \\
& - \frac{\kappa_x \kappa_y}{\kappa_{\perp}^2} ((k_0^2 - \kappa_{\perp}^2) T_{\parallel} - k_0^2 T_{\perp}) (\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2})];
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f_y^{H0}(\kappa_x, \kappa_y, \varepsilon_0) = & -[\pm \kappa_x \sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2} T_{\parallel} (-i\kappa_x) - \\
& - \frac{1}{\kappa_{\perp}^2} (\kappa_x^2 (k_0^2 - \kappa_{\perp}^2) T_{\parallel} + \kappa_y^2 k_0^2 T_{\perp}) (\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2})];
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f_z^{H0}(\kappa_x, \kappa_y, \varepsilon_0) = & \left[\left(\frac{\kappa_x \kappa_y}{\kappa_{\perp}^2} [(k_0^2 - \kappa_{\perp}^2) T_{\parallel} - k_0^2 T_{\perp}] \times \right. \right. \\
& \times (-i\kappa_x) - \frac{1}{\kappa_{\perp}^2} (\kappa_x^2 (k_0^2 - \kappa_{\perp}^2) T_{\parallel} + \kappa_y^2 k_0^2 T_{\perp}) (-i\kappa_y) \left. \right].
\end{aligned}$$

Полагая $\mathbf{j} = \frac{i\omega\varepsilon_1}{4\pi} \mathbf{E}_0^{\text{in}}$ в (5П), (6П), получаем вариации полей в неоднородном полупространстве:

$$\begin{aligned}
\mathbf{E}_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = & -\frac{1}{64\pi^3 \varepsilon_0 \omega} \int_{V'} \varepsilon_1(x', y', z') \iiint_{-\infty-\infty}^{\infty} j_x^p(\kappa'_x, \kappa'_y, z_1) \times \\
& \times \frac{\exp\{-i\kappa'_y(x-x') - i\kappa'_x(y-y') \pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2} (z-z')\}}{i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}} \times \\
& \times \frac{\exp\{i\kappa'_x(x'-x_1) + i\kappa'_y(y'-y_1) \pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2} z' \pm i\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2} z_1\}}{\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2}} \times \\
& \times \{[f_x^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(k^2 - \kappa_{\perp}^2) + f_y^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(-\kappa_y \kappa_x) - \\
& - f_z^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(\pm \kappa_x \sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2})] \mathbf{x}_0 + [f_x^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(-\kappa_x \kappa_y) + \\
& + f_y^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(k^2 - \kappa_{\perp}^2) - f_z^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(\pm \kappa_y \sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2})] \mathbf{y}_0 + \\
& + [f_x^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(\pm \kappa_x \sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}) + f_y^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0) \times \\
& \times (\pm \kappa_y \sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}) - f_z^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0) \kappa_{\perp}^2] \mathbf{z}_0\} d\kappa'_x d\kappa'_y d\kappa'_z dV'; (13\Pi)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{H}_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = & -\frac{1}{64\pi^3 c} \int_{V'} \varepsilon_1(x', y', z') \iiint_{-\infty-\infty}^{\infty} j_x^p(\kappa'_x, \kappa'_y, z_1) \times \\
& \times \frac{\exp\{-i\kappa'_x(x-x') - i\kappa'_y(y-y') \pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2} (z-z')\}}{\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}} \times \\
& \times \frac{\exp\{i\kappa'_x(x'-x_1) + i\kappa'_y(y'-y_1) \pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2} z' \pm i\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2} z_1\}}{\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2}} \times \\
& \times \{[f_y^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}) - f_z^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(-i\kappa_y)] \mathbf{x}_0 +
\end{aligned}$$

$$+ [f_x^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2}) + f_z^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(i\kappa_x)]y_0 + \\ + [f_x^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(-i\kappa_y) + f_y^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(i\kappa_x)]z_0 \times \\ \times d\kappa_x d\kappa_y d\kappa'_x d\kappa'_y dV' \quad (14П)$$

и их поперечные спектры:

$$E_1^{\text{in}}(\kappa_x, \kappa_y, \kappa'_x, \kappa'_y, z, z_1) = \\ = -\frac{1}{16\pi\varepsilon_0\omega} \int_{z'} \varepsilon_1(\kappa_x + \kappa'_x, \kappa_y + \kappa'_y, z') j_x^p(-\kappa'_x, -\kappa'_y, z_1) \times \\ \times \frac{\exp\{\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2}(z - z') \pm i\sqrt{k^2 - \kappa_\perp'^2} z' \pm i\sqrt{k_0^2 - \kappa_\perp'^2} z_1\}}{i\sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2} \sqrt{k_0^2 - \kappa_\perp'^2}} \times \\ \times \{[f_x^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(k^2 - \kappa_x^2) + f_y^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(-\kappa_y \kappa_x) - \\ - f_z^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(\pm \kappa_x \sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2})]x_0 + [f_x^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(-\kappa_x \kappa_y) + \\ + f_y^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(k^2 - \kappa_y^2) - f_z^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(\pm \kappa_y \sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2})]y_0 + \\ + [-f_x^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(\pm \kappa_x \sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2}) - f_y^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0) \times \\ \times (\pm \kappa_y \sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2}) + f_z^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)\kappa_\perp^2]z_0\} dz'; \quad (15П)$$

$$H_1(\kappa_x, \kappa_y, \kappa'_x, \kappa'_y, z, z_1) = \\ = -\frac{1}{16\pi c} \int_{z'} \varepsilon_1(\kappa_x + \kappa'_x, \kappa_y + \kappa'_y, z') j_x^p(-\kappa'_x, -\kappa'_y, z_1) \times \\ \times \frac{\exp\{\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2}(z - z') \pm i\sqrt{k^2 - \kappa_\perp'^2} z' \pm i\sqrt{k_0^2 - \kappa_\perp'^2} z_1\}}{\sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2} \sqrt{k_0^2 - \kappa_\perp'^2}} \times \\ \times \{[f_y^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2}) + f_z^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0) \times \\ \times (i\kappa_y)]x_0 + [f_x^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2}) - \\ - f_z^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(-i\kappa_x)]y_0 + [f_x^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(i\kappa_y) + \\ + f_y^{E0}(\kappa'_x, \kappa'_y, \varepsilon_0)(-i\kappa_x)]z_0\} dz'. \quad (16П)$$

Излучающий зонд. Вариации интегральной интенсивности сигнала зонда, прошедшего через область неоднородностей, в зависимости от положения зонда при двумерном сканировании

$$S_1(z, r_1) \cong \iint \frac{c}{16\pi} [(E_{0x} H_{1y}^* - E_{0y} H_{1x}^* + \\ + E_{1x} H_{0y}^* - E_{1y} H_{0x}^*) + \text{к. с.}] dx dy \quad (17П)$$

имеют двумерный латеральный спектр, представимый одномерным интегралом по глубине:

$$S_1(z, k_x, k_y) = \frac{1}{128\pi\omega} \left\{ \int_{-\infty}^0 \varepsilon_1(k_x, k_y, z') \times \right. \\ \times \iint \frac{\exp\{(\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2} z \pm i\sqrt{k_0^2 - \kappa_\perp'^2} z_1) \pm i\sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2}(z - z')\}}{(\sqrt{k_0^2 - \kappa_\perp'^2})^* \sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2}} \times \\ \times \frac{\exp\{(\pm i\sqrt{k^2 - (k_x - \kappa_x)^2 - (k_y - \kappa_y)^2} z' \pm \\ \pm i\sqrt{k_0^2 - (k_x - \kappa_x)^2 - (k_y - \kappa_y)^2} z_1)\}}{(\sqrt{k_0^2 - (k_x - \kappa_x)^2 - (k_y - \kappa_y)^2})^*} \times \\ \times \{j_x^p(-\kappa_x, -\kappa_y, z_1) j_x^p(\kappa_x - k_x, \kappa_y - k_y, z_1) \{f_x^{E0*}(\kappa_x, \kappa_y) \times \\ \times [f_x^{E0}(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y)(\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2}) - f_z^{E0}(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y) \times \\ \times (-i\kappa_x)] - f_y^{E0*}(\kappa_x, \kappa_y) [f_y^{E0}(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y)(\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2}) +$$

$$+ f_z^{E0}(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y)(i\kappa_y)]\} - \frac{1}{k^2} j_x^p(\kappa_x, \kappa_y, z_1) \times \\ \times j_x^p(\kappa_x - k_x, \kappa_y - k_y, z_1) \{f_y^{H0*}(\kappa_x, \kappa_y) [f_x^{E0}(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y) \times \\ \times (k^2 - \kappa_x^2) - f_y^{E0}(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y) \kappa_y \kappa_x - f_z^{E0}(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y) \times \\ \times (\pm \kappa_x \sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2})] - f_x^{H0*}(\kappa_x, \kappa_y) [f_x^{E0}(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y) \kappa_x \kappa_y + \\ + f_y^{E0}(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y)(k^2 - \kappa_y^2) - f_z^{E0}(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y) \times \\ \times (\pm \kappa_y \sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2})]\} \} d\kappa_x d\kappa_y dz' + \int_{-\infty}^0 \varepsilon_1^*(k_x, k_y, z') \times \\ \times \iint \frac{\exp\{\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2} z \pm i\sqrt{k_0^2 - \kappa_\perp'^2} z_1 \pm i(\sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2})^*(z - z')\}}{\sqrt{k_0^2 - \kappa_\perp'^2} (\sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2})^*} \times \\ \times \frac{\exp\{(\pm i\sqrt{k^2 - (k_x - \kappa_x)^2 - (k_y - \kappa_y)^2} z' \pm \\ \pm i\sqrt{k_0^2 - (k_x - \kappa_x)^2 - (k_y - \kappa_y)^2} z_1)\}}{(\sqrt{k_0^2 - (k_x - \kappa_x)^2 - (k_y - \kappa_y)^2})^*} \times \\ \times \{j_x^p(\kappa_x, \kappa_y, z_1) j_x^p(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y, z_1) \{f_x^{E0}(\kappa_x, \kappa_y) \times \\ \times [f_x^{E0}(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y)(\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2}) + f_z^{E0}(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y) \times \\ \times (i\kappa_x)]^* - f_y^{E0}(\kappa_x, \kappa_y) [f_y^{E0}(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y)(\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2}) - \\ - f_z^{E0}(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y)(-i\kappa_y)]^*\} - \frac{1}{k^2} j_x^p(\kappa_x, \kappa_y, z_1) \times \\ \times j_x^p(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y, z_1) \{f_y^{H0}(\kappa_x, \kappa_y, \varepsilon_0) [f_x^{E0}(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y) \times \\ \times (k^2 - \kappa_x^2) - f_y^{E0}(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y) \kappa_y \kappa_x - f_z^{E0}(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y) \times \\ \times (\pm \kappa_x \sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2})]^* - f_x^{H0}(\kappa_x, \kappa_y) [-f_x^{E0}(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y) \kappa_x \kappa_y + \\ + f_y^{E0}(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y)(k^2 - \kappa_y^2) - f_z^{E0}(k_x - \kappa_x, k_y - \kappa_y) \times \\ \times (\pm \kappa_y \sqrt{k^2 - \kappa_\perp^2})]^*\} \} d\kappa_x d\kappa_y dz'. \quad (18П)$$

Принимающий зонд. Представим невозмущенное поле в среде как плоскую волну:

$$E_0^{\text{in}}(\mathbf{r}) = E_0 \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r}). \quad (19П)$$

В верхнем полупространстве невозмущенное поле выражается как

$$E_0^{\text{out}}(\mathbf{r}) = (E_{0x}^{\text{out}} x_0 + E_{0y}^{\text{out}} y_0 + E_{0z}^{\text{out}} z_0) \times \\ \times \exp\{ik_x x + ik_y y \pm i\sqrt{k_0^2 - \kappa_\perp^2} z_1\}; \quad (20П)$$

$$E_{0x}^{\text{out}} = \frac{1}{\kappa_\perp^2} (E_{0x}(k_x^2 T_{\parallel}^{\text{out}} + k_y^2 T_{\perp}^{\text{out}}) + \\ + E_{0y} k_x k_y (T_{\parallel}^{\text{out}} - T_{\perp}^{\text{out}}));$$

$$E_{0x}^{\text{out}} = \frac{1}{\kappa_\perp^2} (E_{0x} k_x k_y (T_{\parallel}^{\text{out}} - T_{\perp}^{\text{out}}) + \\ + E_{0y} (k_x^2 T_{\perp}^{\text{out}} + k_y^2 T_{\parallel}^{\text{out}})); E_{0z}^{\text{out}} = E_{0z} T_{\parallel}^{\text{out}};$$

$$T_{\parallel}^{\text{out}} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_0} \sqrt{k_0^2 - \kappa_\perp^2}}{\sqrt{k_0^2 - \kappa_\perp^2} + \sqrt{\varepsilon_0} \sqrt{k^2 - \varepsilon_0 \kappa_x^2 - \varepsilon_0 \kappa_y^2}};$$

$$T_{\perp}^{\text{out}} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_0} \sqrt{k_0^2 - \kappa_\perp^2}}{\sqrt{\varepsilon_0} \sqrt{k_0^2 - \kappa_\perp^2} + \sqrt{k^2 - \varepsilon_0 \kappa_x^2 - \varepsilon_0 \kappa_y^2}}.$$

Тогда, полагая в (8П) $j^p = \frac{i\omega}{4\pi} \varepsilon_1 \mathbf{E}_0 \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r})$, получаем поле возмущенной волны E_0^{in} в среде $z \leq 0$, которое создаст над неоднородным полупространством поле

$$E_1^{\text{out}}(x, y, z) = \frac{1}{32\pi^3 \varepsilon_0} \int_{V'} \varepsilon_1(x', y', z') \times \\ \times \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} d\kappa_x d\kappa_y \frac{1}{i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}} \exp\{-i\kappa_x(x-x') - i\kappa_y(y-y') + \\ + i\kappa_x x' + i\kappa_y y' \pm i\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2} z \pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2} z'\} \times \\ \times [E_{1x}(\kappa_x, \kappa_y) x_0 + E_{1y}(\kappa_x, \kappa_y) y_0 + E_{1z}(\kappa_x, \kappa_y) z_0] dV'; \\ E_{1x}(\kappa_x, \kappa_y) = E_{0x} \frac{1}{\kappa_{\perp}^2} \{ \kappa_x^2 [(k^2 - \kappa_{\perp}^2)] T_{\parallel}^{\text{out}} + \\ + \kappa_y^2 k^2 T_{\perp}^{\text{out}} \} + E_{0y} \frac{1}{\kappa_{\perp}^2} \{ \kappa_y \kappa_x (k^2 - \kappa_{\perp}^2) T_{\parallel}^{\text{out}} - \\ - \kappa_y \kappa_x k^2 T_{\perp}^{\text{out}} \} + E_{0z} \kappa_x (\pm \sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}) T_{\parallel}^{\text{out}}; \\ E_{1y}(\kappa_x, \kappa_y) = E_{0x} \frac{1}{\kappa_{\perp}^2} \{ \kappa_x \kappa_y (k^2 - \kappa_{\perp}^2) T_{\parallel}^{\text{out}} - \\ - \kappa_x \kappa_y k^2 T_{\perp}^{\text{out}} \} + E_{0y} \frac{1}{\kappa_{\perp}^2} \{ \kappa_y^2 (k^2 - \kappa_{\perp}^2) T_{\parallel}^{\text{out}} + \\ + \kappa_x^2 k^2 T_{\perp}^{\text{out}} \} + E_{0z} \kappa_y (\pm \sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}) T_{\parallel}^{\text{out}}; \\ E_{1z}(\kappa_x, \kappa_y) = E_{0x} (\pm \kappa_x \sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}) T_{\parallel}^{\text{out}} + \\ + E_{0y} (\pm \kappa_y \sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2}) T_{\parallel}^{\text{out}} + E_{0z} \kappa_{\perp}^2 T_{\parallel}^{\text{out}}. \quad (21\text{П})$$

Пусть измеряемое зондом значение сигнала определяется сверткой двумерной аппаратной функции зонда и интенсивности электрической компоненты поля из соотношения:

$$S(x_1, y_1, z_1) = \frac{c\sqrt{\varepsilon_0}}{16\pi} \iint F(x_1 - x, y_1 - y) \times \\ \times |E^{\text{out}}(x, y, z_1)|^2 dx dy. \quad (22\text{П})$$

Данные двумерного сканирования вариаций интенсивности на высоте z_1 могут быть разложены в спектр Фурье по поперечным координатам движения зонда:

$$S(\kappa_x, \kappa_y, z_1) = \frac{c\sqrt{\varepsilon_0}}{16\pi} F(\kappa_x, \kappa_y) \iint |E^{\text{out}}(x, y, z_1)|^2 \times \\ \times \exp(-i\kappa_x x - i\kappa_y y) dx dy. \quad (23\text{П})$$

Учитывая, что $\varepsilon_0 = 1$ и тот факт, что из условия $|E_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1)| \gg |E_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1)|$ следует

$$|E|^2 = |E_0|^2 + 2\text{Re}(E_0^* E_1) + |E_1|^2 \cong |E_0|^2 + \\ + 2\text{Re}(E_0^* E_1) = |E_0|^2 + (E_0^* E_1) + (E_0^* E_1)^*, \quad (24\text{П})$$

из выражения

$$S_1(\kappa_x, \kappa_y, z_1) = \frac{c}{16\pi} F(\kappa_x, \kappa_y) \iint (E_0^{\text{out}*}(x, y, z_1) \times \\ \times E_1^{\text{out}}(x, y, z_1) + \text{к. с.}) \exp(-i\kappa_x x - i\kappa_y y) dx dy \quad (25\text{П})$$

получаем формулу для спектра сигнала:

$$S_1(\kappa_x, \kappa_y, \kappa_x, \kappa_y, z_1) = \\ = \frac{c}{32} F(\kappa_x, \kappa_y) \left\{ \frac{1}{\varepsilon_0} \int_{-\infty}^0 \varepsilon_1(\kappa_x + 2\kappa_x, \kappa_y + 2\kappa_y, z') \times \right. \\ \times \frac{\exp\{(\pm i\sqrt{k_0^2 - (\kappa_x + k_x)^2 - (\kappa_y + k_y)^2} z \pm \\ \pm i\sqrt{k^2 - (\kappa_x + k_x)^2 - (\kappa_y + k_y)^2} z' \} \times \\ \times \exp\{\pm i\sqrt{k_0^2 - (\kappa_x + k_x)^2 - (\kappa_y + k_y)^2} z_1\} \times \\ \times [E_{0x}^* E_{1x}(-\kappa_x - k_x, -\kappa_y - k_y) + E_{0y}^* \times \\ \times E_{1y}(-\kappa_x - k_x, -\kappa_y - k_y) + E_{0z}^* \times \\ \times E_{1z}(-\kappa_x - k_x, -\kappa_y - k_y)] + \frac{1}{\varepsilon_0^*} \varepsilon_1^*(\kappa_x - 2\kappa_x, \kappa_y - 2\kappa_y, z') \times \\ \times \frac{\exp\{(\pm i\sqrt{k_0^2 - (\kappa_x - k_x)^2 - (\kappa_y - k_y)^2} z \pm \\ \pm i\sqrt{k^2 - (\kappa_x - k_x)^2 - (\kappa_y - k_y)^2} z' \} \times \\ \times \exp\{\pm i\sqrt{k_0^2 - (\kappa_x - k_x)^2 - (\kappa_y - k_y)^2} z_1\} \times \\ \times [E_{0x}^* E_{1x}(\kappa_x - k_x, \kappa_y - k_y) + E_{0y}^* E_{1y}(\kappa_x - k_x, \kappa_y - k_y) + \\ \left. + E_{0z}^* E_{1z}(\kappa_x - k_x, \kappa_y - k_y)] dz' \right\}. \quad (26\text{П})$$

Сканирующая СВЧ томография. Ядро уравнений (50), (52) для распределения тока (10П)

$$K(k_x, k_y, z) = \bar{K}(k_x, k_y, z) / \int_{-\infty}^0 4\pi^2 \times \\ \times \iint \bar{K}(k_x, k_y, z') dk_x dk_y dz', \quad (27\text{П})$$

$$\bar{K}(k_x, k_y, z) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} j_x^p(\kappa_x, \kappa_y, z_1) j_x^{p*}(\kappa_x + k_x, \kappa_y + k_y, z_1) \times \\ \times \frac{\exp\{\pm i\sqrt{k^2 - \kappa_{\perp}^2} z \pm i\sqrt{k_0^2 - \kappa_{\perp}^2} z_1\} \times \\ \times \frac{\exp\{(\pm i\sqrt{k^2 - (\kappa_x + k_x)^2 - (\kappa_y + k_y)^2} z \pm \\ \pm i\sqrt{k_0^2 - (\kappa_x + k_x)^2 - (\kappa_y + k_y)^2} z_1\} \times \\ \times \{f_x^{E0}(\kappa_x, \kappa_y, \varepsilon_0) f_x^{E0*}(\kappa_x + k_x, \kappa_y + k_y, \varepsilon_0) + \\ + f_y^{E0}(\kappa_x, \kappa_y, \varepsilon_0) f_y^{E0*}(\kappa_x + k_x, \kappa_y + k_y, \varepsilon_0) + \\ + f_z^{E0}(\kappa_x, \kappa_y, \varepsilon_0) f_z^{E0*}(\kappa_x + k_x, \kappa_y + k_y, \varepsilon_0)\} dk_x dk_y.$$

УДК 621.316.56 + 621.316.925.4

Э. Г. Косцов, д-р физ.-мат. наук,
С. И. Фадеев, д-р физ.-мат. наук,
А. А. Колесников,
Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
Институт математики СО РАН, г. Новосибирск

ВЫСОКОЭНЕРГОЕМКИЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ КОММУТАТОРЫ

Рассматривается возможность создания быстродействующих микрокоммутаторов с двумя устойчивыми состояниями на базе высокоэнергоемкого микроактюатора, основанного на электростатическом наклоне тонкой металлической пленки на поверхность диэлектрика с высокими значениями диэлектрической проницаемости. Коммутаторы способны выдерживать без переключения из одного состояния в другое, перегрузку более $(3...5) \cdot 10^3$ г. Проводится анализ закономерностей их работы и основные характеристики. Описывается одна из конструкций микрокоммутатора, изготавливаемого методами технологии микроэлектроники.

В настоящее время одним из наиболее развивающихся секторов современной микроэлектроники являются микроэлектромеханические системы (МЭМС), основная задача которых заключается в создании микромеханических систем, не имеющих по совокупности параметров аналогов. Спектр возможных применений МЭМС исключительно широк — микрооптоэлектромеханика (дисплеи, адаптивная оптика, оптические коммутаторы, дифракционные решетки с электрически перестраиваемым шагом, управляемые 2D и 3D-матрицы микрозеркал и др.), ВЧ устройства (коммутаторы, перестраиваемые фильтры, конденсаторы, антенны, фазовые решетки, сканеры и т. п.), измерители перемещений (гироскопы, акселерометры двух- и трехосные, датчики давления, вибрации и т. п.), микродвигатели, микрореле, биоМЭМС, химические МЭМС, микрофлюидные МЭМС, компоненты космических микроспутников и т. д.

К настоящему времени объем реальных продаж МЭМС более 10 млрд долл и их ежегодный рост составляет 13...18 %.

Одной из важнейших задач при создании МЭМС по объему и степени готовности к крупномасштабному применению является построение на их основе микрокоммутаторов, микрореле, программируемых матриц и т. п. Проблеме создания микрореле на различных физических принципах посвящено значительное число работ, например [1—15]. В числе задач, которые могут быть успешно решены созданием

таких устройств, можно отметить коммутацию ВЧ трактов, где преимущества их перед коммутаторами на основе *p*- и *n*-переходов, полевых транзисторов, заключаются в значительно меньшей емкости (несколько фемтофарадов) и низком сопротивлении канала коммутации (доли ома), высоком сопротивлении изоляции, что позволяет обеспечивать частоту пропускания до 50...150 ГГц и выше при более высокой радиационной стойкости.

Микрокоммутаторы используются и при переключении оптических каналов. В этом случае жесткие требования к электрическому контакту отсутствуют, но становятся более важными, наряду с быстродействием, такие параметры как точность позиционирования и безгистерезисность перемещения подвижного элемента.

Принцип работы микрокоммутаторов может быть использован и при создании таких устройств как газовые клапаны, микропомпы, микронасосы, инжекторы капель жидкости и т. п.

Основным элементом всех описанных устройств является электромеханический преобразователь энергии — микроактюатор.

Среди различных физических принципов, на которых базируются такие преобразователи, электромагнитные, пьезоэлектрические, электростатические, предпочтение отдается последним, как наиболее технологичным. Электростатические микродвигатели относятся к классу емкостных машин, в которых наиболее важным параметром является удельная емкость $C_{уд}$ в межэлектродном зазоре. Технология микроэлектроники, технология глубокого кремния, позволяет создавать достаточно малые зазоры, около 2 мкм, что обеспечивает значение удельной энергоемкости до 0,01 Дж/м² и силы тяги до $10^{-7}...10^{-6}$ Н. Для увеличения этой силы приходится соединять параллельно множество элементарных микродвигателей, что наряду с увеличением площади актюатора, снижает его надежность и увеличивает стоимость. Однако для ряда практических задач указанные параметры являются недостаточными, и перед разработчиками МЭМС стоит проблема их значительного увеличения.

Одна из задач, требующих увеличения удельной энергоемкости микроактюаторов, связана с тем, что в реальных условиях всегда имеют место колебания (миковибрации) различной природы, даже в "стационарных" условиях (колебания стен зданий, механизмов), которые способны создать силы воздействия на микроэлектромеханические устройства, соответствующие ускорениям 0,1...10 м/с² и значительно выше. Поэтому при проектировании устройств МЭМС, несмотря на незначительную массу подвижных пластин (ПП) — порядка $10^{-9}...10^{-8}$ кг, необходимо учитывать эти силы, способные приво-

дить к самопроизвольному срабатыванию таких устройств, поскольку они не могут быть скомпенсированы силами тяги микроактюаторов с низкой удельной энергоемкостью. В то же время известен широкий класс задач (прежде всего в аэрокосмической и военной технике, транспорте), когда необходимо использование быстродействующих микрокоммутаторов, способных выдерживать большие перегрузки, без переключения из одного состояния в другое.

Кроме этого, одной из важных задач при создании микрокоммутаторов является использование при переключении "силовых" каналов, когда необходимо осуществить переключение канала с достаточно высокой мощностью (сейчас большинство микрокоммутаторов не могут обеспечить переключение мощности свыше 20...50 мВт; более мощных микрокоммутаторов пока не известно). В этом вопросе одним из важнейших факторов является сопротивление контакта, которое определяется, в первую очередь, силой прижатия двух поверхностей на подвижном и на неподвижном элементах коммутатора [16]. Контактное усилие микроактюаторов на воздушных зазорах, которые в настоящее время используются при построении коммутаторов, не превышает 0,1...2 мН, оно распределяется на площади контактирования не более 100...250 мкм², и эта площадь фактически определяется массой ПП.

Ранее в работах [17–24] описаны высокоэнергоемкие микродвигатели, построенные на новом принципе электромеханического преобразования энергии и обеспечивающие достижение удельной энергоемкости A_R 0,3...1 Дж/м² и более. Суть этого принципа состоит в трансформации электрической энергии, накапливаемой в процессе электростатического прижатия (наката) тонкой металлической пленки (лепестка) на поверхность сегнетоэлектрика с большой диэлектрической проницаемостью, в натяжение этой пленки, преобразуемое далее в механическое движение ПП, на поверхности которой закреплен один из концов металлической пленки.

Цель данной работы — рассмотрение возможности создания на базе микроактюатора, основанного на указанном принципе электромеханического преобразования энергии, быстродействующих микрокоммутаторов, с двумя устойчивыми состояниями, способных развивать силы тяги, значительно превышающие силу тяжести Mg и создавать большую силу прижатия контактов.

В конструкциях указанных электростатических микродвигателей необходимо обеспечить достаточную гибкость и упругость лепестка, кроме того, последний после выключения импульса напряжения должен быстро принимать исходную форму перед каждым новым тактом — от этого зависит тактовая частота работы микродвигателя.

В работах [17–20] анализ характеристик микроактюаторов проводился исходя из того, что форма лепестка достаточно точно описывается кубической параболой с плавным касанием им поверхности сегнетоэлектрика. Такая форма лепестка была ис-

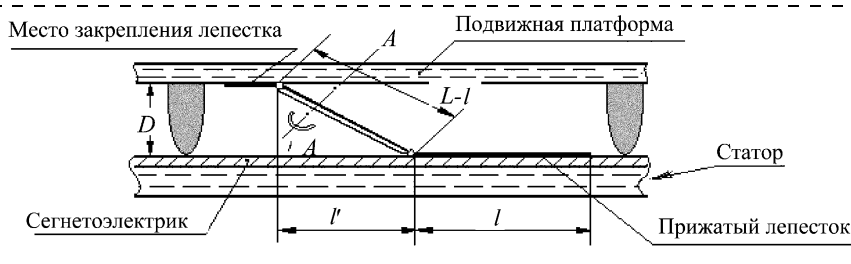


Рис. 1. Схема конструкции электростатического микродвигателя с постоянно прижатой частью лепестка

пользована в экспериментальных образцах микродвигателей, в этом случае время восстановления формы лепестка, пропорциональное его длине L , при $L = 1000$ мкм составляло до 200 мкс.

Для уменьшения времени отрыва лепестка от поверхности сегнетоэлектрика разработана трехмерная форма лепестков с поперечным U — образным изгибом и разработана технология их изготовления, материал — бронза. Схема конструкции микроактюатора с поперечным изгибом лепестка представлена на рис. 1 (см. сечение AA), где радиус кривизны R закругления в поперечном сечении соизмерим с его шириной b , $R > b$. Лепесток имеет изломы в области его закрепления на поверхности ПП и в области конечной точки электростатического наката (точки электростатического прижатия двух поверхностей, распластывания лепестка), которая перемещается вдоль поверхности сегнетоэлектрика под действием электростатических сил.

Будем полагать, что подвижный элемент микрокоммутатора с двумя устойчивыми состояниями представляет собой тонкую пластину кремния, на поверхности которой расположены две металлические пленки (лепестка), обеспечивающие движение ПП в двух противоположных направлениях при электростатическом накате каждой из них на поверхность сегнетоэлектрика. Перевод электростатическими силами элемента из одного состояния в другое сопровождается и сжатием, и распрямлением пружины.

Математическая модель электростатического микроактюатора с поперечно изогнутым лепестком

Для анализа работы микрокоммутатора использовалась модель электростатического наката, основанная на энергетическом балансе, с рассмотрением перераспределения энергии электрического поля, накапливаемой в структуре, с удельной величиной $A_{уд}$, между кинетической энергией движения ПП, работой сил нагрузки двигателя F (сил трения и пружины), энергией деформации лепестка.

Рассмотрим математическую модель, описывающую закон движения подвижной пластины с поперечно изогнутым лепестком, общая длина которого равна L . Как следует из рис. 1, в любой момент времени шаг подвижной пластины H , высота зазора D и длина электростатически прижатой (распластанной) части лепестка l , связаны соотношением

$$(L - l)^2 = D^2 + H^2. \quad (1)$$

Отсюда, учитывая, что $D/(L - l) \leq 1$, получаем $H \approx D^2/2(L - l(t))$ и, следовательно,

$$dH/dl \approx D^2/2(L - l)^2. \quad (2)$$

Обозначим через $A_{уд} bdl$ и $\frac{J}{2R^2} bdl(t)$ элементарную работу электростатического поля и работу сил упругости (сил распластывания лепестка), где $J = Eh^3/12(1 - \mu)$ — цилиндрическая жесткость; μ — коэффициент Пуассона; h — толщина лепестка; E — модуль Юнга материала лепестка. При этом сила F , определяющая движение, находится из условия

$$FdH = \left[A_{уд} - \frac{J}{2R^2} \right] bdl, \quad (3)$$

т. е., принимая во внимание выражение (2),

$$F = \left[A_{уд} - \frac{J}{2R^2} \right] bdl/dH = \left[A_{уд} - \frac{J}{2R^2} \right] bD^2/H^2. \quad (4)$$

В результате закон движения подвижной пластины, учитывающий силу трения $F_{тр}$ принимает вид

$$M \frac{d^2 H}{dt^2} = F - F_{тр}. \quad (5)$$

Силу сопротивления движению ПП — силу трения и силу изгиба пружины — выразим следующим образом:

$$F_{тр} = Kmg[1 + F_{п}(H)], \quad (6)$$

где K — коэффициент трения; Mg — сила тяжести. Сила пружины $F_{п}(H)$ первоначально направлена в сторону, противоположную движению ПП, а после прохождения "мертвой точки" — по движению. Предполагается, что в начальный момент времени $dH/dt = 0$, а $H = l_0$ — постоянно прижатая к поверхности сегнетоэлектрика часть лепестка.

При сопоставлении результатов численного анализа математической модели и экспериментальных данных учитывались такие параметры как длительность импульса напряжения t_p , его амплитуда V , зазор между контактами D_z (расстояние перемещения ПП). Задавалась также начальная сила пружины $F_{п}(0)$ и закон ее изменения $F_{п}(0) + s(x)$ по мере перемещения ПП. Величина $F_{п}(0)$ определяет силу прижатия контактов после их замыкания и силу допустимой перегрузки — $F_{п}(0)/Mg$.

Из численного решения уравнения (5) были получены следующие основные характеристики указанных микрокоммутаторов.

В первые моменты действия импульса напряжения, до начала движения ПП, при большой нагрузке, определяемой значением силы $F_{п}(0)$, для исключения "проскальзывания" лепестка по поверхности сегнетоэлектрика и снижения времени до начала движения ПП необходимо обеспечить первоначальное, достаточное для данной нагрузки, "сцепление" лепестка с поверхностью сегнетоэлектрика — силу "электронного клея". Поэтому часть длины лепестка l_0 должна быть постоянно прижата к поверхности сегнетоэлектрика, тогда свободная часть лепестка будет $L - l_0$.

Экспериментальные исследования показали, что для пленок ниобата бария — стронция, НБС, модифицированных лантаном, $Ba_{0.5}Sr_{0.5}Nb_2O_6 + 1\% La$, со значением диэлектрической проницаемости 3000...5000, используемых при создании указанных микродвигателей, сила сцепления двух поверхностей пропорциональна накапливаемой при их электростатическом прижатии энергии, коэффициент пропорциональности — K_1 . Величина K_1 — удельная сила отрыва лепестка от поверхности сегнетоэлектрика, отнесенная к энергии электростатического наката (сила "электронного клея"), ее значение составляет, как показали экспериментальные исследования, $(3...5) \cdot 10^5$ Н/Дж. Столь высокие значения этого коэффициента позволяют исключить сдвиг прижатой под действием сил электростатики поверхности лепестка относительно поверхности сегнетоэлектрика даже при больших механических нагрузках.

Условие сцепления можно выразить следующим неравенством относительно сил тяги, сжатия пружины и энергии начального "сцепления" двух поверхностей, равной $A_{уд}bl_0$:

$$K_1 A_{уд} bl_0 > Kmg + F_{п}(0). \quad (7)$$

Таким образом, начальная длина наката лепестка должна быть

$$l_0 > (Kmg + F_{п}(0))/K_1 A_{уд} b. \quad (8)$$

Можно, задавая априори значение l_0 , определить ту силу (перегрузку), которая способна осуществить отрыв площади лепестка bl_0 , т. е. $F_{п}(0) > K_1 A_{уд} bl_0$, например, при $A_{уд} = 0,3$ Дж/м², $b = 5 \cdot 10^{-4}$ м, $l_0 = 10^{-4}$ м, $F_{п}(0) > 7,5 \cdot 10^{-3}$ Н. Таким образом, достаточно выбрать значение l_0 в пределах 100 мкм, чтобы, начиная со значений массы ПП, $M = 10^{-6}$ кг и менее, обеспечить соотношение $F_{п}(0)/Kmg$ более 10^3 .

Из выражения

$$H(t) \approx D^2/2(L - l(t)) \quad (9)$$

и исходя из значения D_z легко получить априорную оценку таких важных параметров конструкции микрорактюатора, как D , L , $l(t_p)$.

Оценка энергии распрямления продольно изогнутого лепестка, например при $R \approx 10^{-2}$ м, показывает, что она существенно меньше 0,1...1 % $A_{уд}$ и составляет порядка 10^{-4} Дж/м², но в то же время этой энергии достаточно для осуществления быстрого отрыва лепестка, прижатого к поверхности (его масса менее 10^{-5} кг/м²) сегнетоэлектрика по всей площади наката. Эффект аномально высокой скорости отрыва металлической пленки от поверхности сегнетоэлектрика одновременно по всей длине U-образного лепестка, за время меньшее, чем 1 мкс — время спада импульса, был установлен экспериментально. Это открывает возможность создания быстродействующих микрокоммутаторов.

Конструкция лепестка, которая может быть представлена в виде двух балок с движущимся шарниром (в виде рычага) допускает возможность достижения значительной силы тяги F_t на ПП, превышающей ту силу, которая следует из изменения емкости $C(x)$ — $(V^2 \partial C / \partial x) / 2$ в процессе электростатического наката

$l(t, x)$. Определить эту силу можно из простого соотношения $F_T D_z \approx A_{уд} b l(t_p)$, она может составлять значения до 0,1...0,5 Н на 1 мм ширины лепестка и ограничена только его механической прочностью — для $b = 500$ мкм и $h = 1,5$ мкм это ограничение составляет 0,4...0,5 Н. При этом в момент развития максимальной тяги практически действуют только растягивающие напряжения, и поэтому при нагрузке, не превышающей пределов усталости материала (для пленок из бронзы до 50...60 кг/мм²), контактные элементы таких микродвигателей являются в механическом отношении очень надежными и способны выдерживать свыше 10^{11} ... 10^{12} циклов переключения.

Уравнение (1) дает возможность описания полной картины работы микрокоммутатора в широком диапазоне вариаций значений основных параметров.

На рис. 2—5 представлены типичные распределения в процессе перемещения ПП сил тяги микроактюатора и силы сопротивления пружины, их изменение во времени, поведение скорости ПП — до достижения "мертвой" точки и после ее прохождения, для одной из совокупностей основных параметров устройства ($M = 2 \cdot 10^{-6}$ кг; $D_z = 3$ мкм; $D_e = 30$ мкм; $L = 1$ мм, $l_0 = 200$ мкм, $b = 500$ мкм; $A_{уд} = 0,3$ Дж/м²; $E = 1,1 \cdot 10^{11}$ Н/м², $F_n(0) = 6 \cdot 10^{-3}$ Н, $s(x)$ — линейная функция). До определенного момента времени t_{kr} силы тяги преобладают, и только начиная с t_{kr} они становятся меньше сил упругости пружины — этот момент определяет максимальную длительность импульса напряжения, способного перевести при заданной исходной силе пружины устройство из одного состояния в другое.

При определенном соотношении параметров пружина, первоначально препятствующая движению ПП, после прохождения "точки перегиба", наоборот, ускоряет это движение (рис. 4), она же определяет и силу прижатия контактов.

Использование понятия мгновенной мощности, относительно массы ПП, $W_{уд}$ показывает, что она может значительно превышать 1000 Вт/кг. Отметим, что эта величина зависит от согласованной нагрузки, в данном случае в основном от силы сопротивления пружины. Удельная сила тяги в первые моменты времени также может быть очень высокой — до 10^5 Н/кг и более, также в зависимости от значения нагрузки.

При малых значениях M минимальное время, начиная с которого возможно движение ПП после подачи импульса напряжения, определяется двумя факторами. Первый фактор — время начала электростатического наката металлической пленки на поверхность сегнетоэлектрика. Этот процесс может быть достаточно коротким, как показали экспериментальные исследования, в пределах 1...3 мкс. Второй фактор — непосредственная передача энергии от места электростатического наката к точке крепления металлической пленки на поверхности ПП. Минимальное время этого процесса определяется скоростью звука в металлической пленке, ее длиной, и может быть также в пределах 1...5 мкс и менее.

Влияние величины $A_{уд}$ и массы ПП на время переключения микрокоммутатора и на максимально возможную перегрузку иллюстрируют рис. 5 и 6.

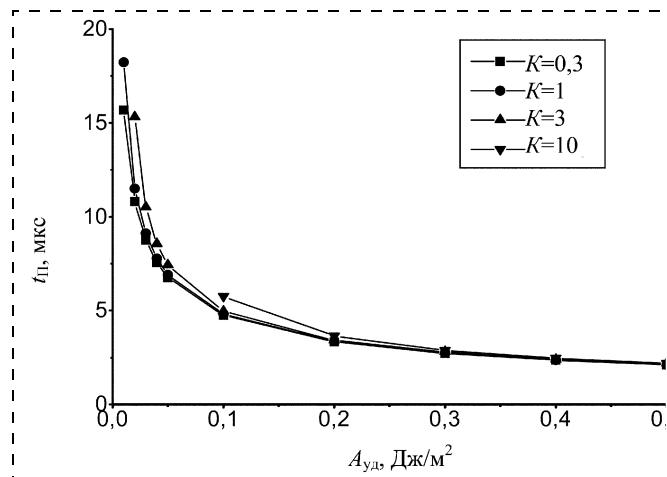


Рис. 2. Зависимость времени переключения микрокоммутатора от удельной энергоемкости микроактюатора

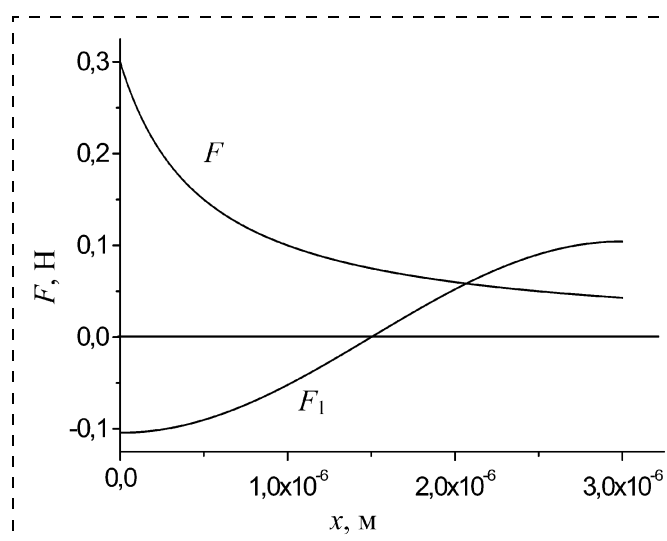


Рис. 3. Распределение силы тяги микроактюатора и силы сопротивления пружины в процессе перемещения подвижной платформы

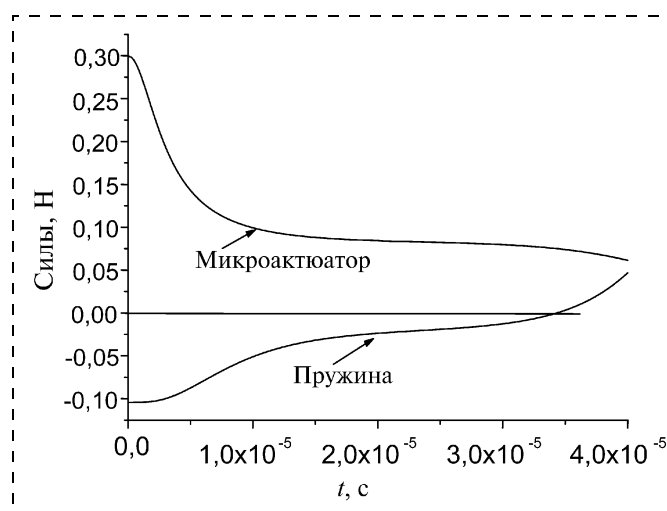


Рис. 4. Изменение силы тяги микроактюатора и силы сопротивления пружины во времени:

$M = 2 \cdot 10^{-6}$ кг, $L = 0,001$ м, $D_z = 3 \cdot 10^{-6}$ м, $D = 3 \cdot 10^{-5}$ м, $A_{уд} = 0,3$ Дж/м², $K = 1$, $G_0 = 5320$

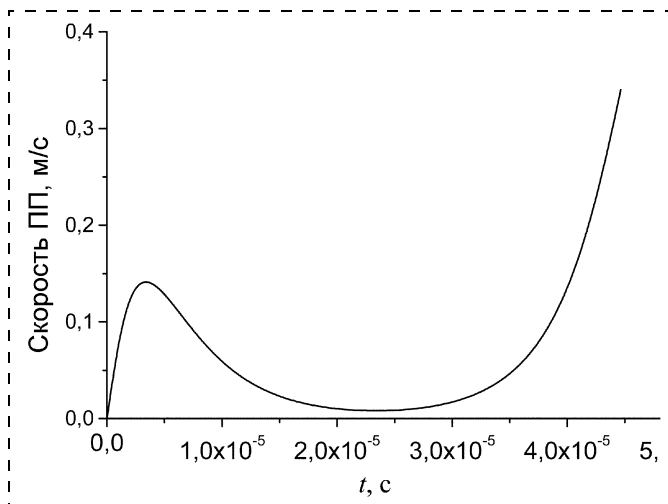


Рис. 5. Изменение скорости перемещения ПП во времени:

$M = 2 \cdot 10^{-6}$ кг, $L = 0,001$ м, $D_z = 3 \cdot 10^{-6}$ м, $D = 3 \cdot 10^{-5}$ м, $A_{уд} = 0,3$ Дж/м², $K = 1$, $G_0 = 5320$

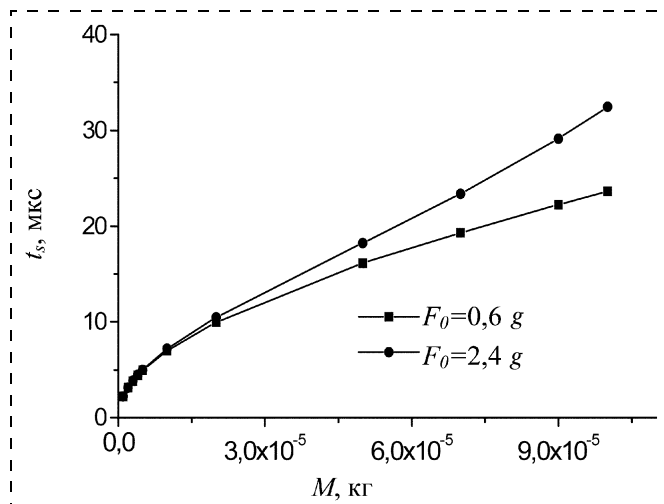


Рис. 6. Влияние массы ПП на время переключения микрокоммутатора:

$L = 1 \cdot 10^{-3}$ м, $D = 3 \cdot 10^{-5}$ м, $D_z = 10^{-6}$ м, $A_{уд} = 0,3$ Дж/м²

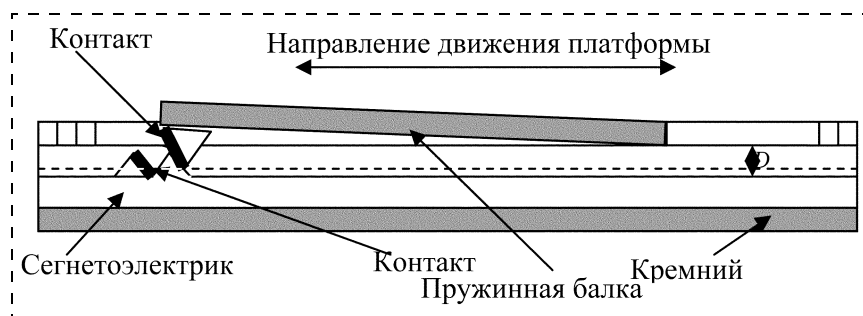


Рис. 7. Пример конструкции микрокоммутатора

Время переключения микрокоммутатора из одного устойчивого состояния в другое лежит в микросекундных диапазонах (5...50 мкс) — в зависимости от межэлектродного зазора, D_z — чем оно меньше, тем меньше это время (см. рис. 5), при этом для малых зазоров возможна большая перегрузка — более 3000... 5000 г.

При создании реальных образцов микрокоммутатора алгоритм выбора конкретных параметров его конструкции может быть следующий: первоначально выбирается время переключения и сила притяжения контактов или сила перегрузки, которую может выдержать микрокоммутатор без переключения, и далее выбираются необходимая площадь наката, длина лепестков при заданной $A_{уд}$ (заданных V), затем M и другие параметры.

Один из примеров конструкции микрокоммутатора представлен на рис. 7. В этой конструкции упругий элемент (пружина) представляет собой тонкую кремниевую балку (ее длина 400... 600 мкм, ширина и толщина 50...100 мкм, в зависимости от необходимой жесткости), конец которой изгибается на высоту "защелки" при перемещении ПП под действием электростатических сил наката лепестков. Технологически размещение защелки возможно и на боковой стороне неподвижной пластины.

Заключение

Анализ показывает, что использование описанного принципа электромеханического преобразова-

ния энергии дает возможность создания бистабильных быстродействующих микрокоммутаторов, выдерживающих без срабатывания перегрузку в 3000...5000 г и более, после которой при подаче импульса напряжения они способны перейти из одного состояния в другое.

Использование в конструкции микрокоммутаторов указанного принципа электромеханического преобразования энергии дает возможность не только существенно улучшить их характеристики, но и расширить возможные области применения. При этом в сравнении этих микрокоммутаторов с микрокоммутаторами, основанными на микроактюаторах с воздушными зазорами, имеются следующие преимущества:

- значительно увеличивается удельная энергоемкость и, соответственно, мощность микроактюатора, а также устойчивость к большим перегрузкам;
- уменьшается время переключения микрокоммутатора из одного состояния в другое, даже при высоких нагрузках, и это состояние сохраняется в течение сколь угодно длительного времени;
- значительно снижается чувствительность характера движения ПП к коэффициенту трения в конструкции микрокоммутатора и, соответственно, увеличивается технологичность его изготовления;
- увеличивается диапазон перемещения ПП, значение зазора D_z и качество электрического контакта.

Список литературы

1. **Lee H. et al.** Electrostatically actuated copper-blade microrelays // *Sensors and Actuators*. 2002. A 100. P. 105–113.
2. **Hoffmann M., Voges E.** Bulk silicon micromachining for MEMS in optical communication systems // *J. Micromech. Microeng.* 2002. V. 12. P. 349.
3. **Miao L., Zhengping Z., Xiaodong H., Xuefeng Z., Haifeng L., Ronghui G.** Adaptive contact for improving the behavior of silicon MEMS switches // *J. Micromech. Microeng.* 2002. V. 12. P. 696.
4. **Wang Y. et al.** Low-voltage lateral-contact micro relays for RF applications // *MEMS*. 2002. P. 645–648.
5. **Wong J. et al.** An electrostatically-actuated MEMS switch for power applications // *MEMS*. 2000. P. 633–638.
6. **Kam See Hoon, Ijaz Jafri, Keating D. J.** Simulations Based Design for a Large Displacement Electrostatically Actuated Microrelay // *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*. 2002. 32. P. 37–46.
7. **Taher M.** On a tunable bistable MEMS-theory and experiment // *Journal of MEMS*. 2000. Vol. 9:2. P. 157–170.
8. **Sun X. et al.** A bistable microrelay based on two-segment multimorph cantilever actuators // *MEMS*. 1998. P. 154–159.
9. **Schiele I., Huber J., Evers C., Hillerich B., Kozlowski F.** Micromechanical relay with electrostatic actuation // *Proc. Transducers 97*. 1997.
10. **Kruglick E. et al.** Bistable MEMS relays and contact characterization // *Proc. Solid-state sensors and actuators Workshop*. 1998. P. 333–337.
11. **Baskaran R., Turner K. L.** Mechanical domain coupled mode parametric resonance and amplification in a torsional mode microelectromechanical oscillator // *J. Micromech. Microeng.* 2003. V. 13. P. 701.
12. **Brenner M. et al.** Optimum design of a MEMS switch // *Proc. 5th International Conf. on Modeling and Simulation of Microsystems*, USA. April 2002.
13. **McCarthy B., Adams G. G., McGruer N. E., Potter D.** A dynamic model, including contact bounce, of an electrostatically

actuated microswitch // *Journal of microelectromechanical systems*. JUN 2002. 11: (3). P. 276–283.

14. **Schiele I.** Surface-micromachined electrostatic microrelay // *Sensors and Actuators*. 1998. A 66. P. 345–354.

15. **Qiu J. et al.** A centrally-clamped parallel-beam bistable MEMS mechanism // *MEMS*. 2001. P. 353–356.

16. **Holm R.** *Electric Contact*. Berlin: Springer, 1967.

17. **Dyatlov V. L., Kostsov E. G.** Electromechanical energy converters of micromechanic devices on the basis of ferroelectric films // *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*. 1998. A 405. P. 511–513.

18. **Дятлов В. Л., Косцов Э. Г.** Высокоэнергоемкие микродвигатели на основе тонких сегнетоэлектрических пленок // *Микросистемная техника*. 1999. N 1. С. 22–32.

19. **Dyatlov V. L., Kostsov E. G.** Planar electrostatic micromotors on the basis of the ferroelectric films // *Integrated Ferroelectrics*. 1999. N 23. P. 149–160.

20. **Dyatlov V. L., Kostsov E. G., Baginsky I. L.** High-effective electromechanical energy conversion on the basis of thin ferroelectric films // *Ferroelectrics*. 2000. V. 241. P. 99–106.

21. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** High-energy capacitive electrostatic micromotors // *J. Micromech. Microeng.* 2003. 13. P. 190–200.

22. **Багинский И. Л., Буханец Д. И., Кашеев Э. Л., Косцов Э. Г.** Электростатический двигатель для быстрой действующих микромеханических устройств // *Микросистемная техника*. 2004. № 4. С. 2–7.

23. **Kostsov E. G.** Ferroelectric-based electrostatic micromotors with nanometer gaps // *IEEE Trans-action on Ultrasonics, Ferroelectric and Frequency Control, Special Issue on Nanoscale Ferroelectric*. 2006. V. 53. N 12. P. 2294–2299.

24. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** Electrostatic micromotor based on ferroelectric ceramic // *J. Micromech. Microeng.* 2004. N 14. P. 1569–1575.

25. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** Linear electrostatic micromotor on the basis of ferroelectric ceramics // *Ferroelectrics*. 2005. 320. P. 609–616.

ИНФОРМАЦИЯ

Сообщение для печати

Распоряжение от 9 июня 2007 г. № 756-р

Утвердить прилагаемый состав Правительственного совета по нанотехнологиям, образованного постановлением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2007 г. # 364 "О Правительственном совете по нанотехнологиям".

Председатель Правительства Российской Федерации М. Фрадков

УТВЕРЖДЕН
распоряжением Правительства
Российской Федерации
от 9 июня 2007 г. № 756-р

СОСТАВ

Правительственного совета по нанотехнологиям

Иванов С. Б. — Первый заместитель Председателя Правительства Российской Федерации (председатель совета)

Ковальчук М. В. — директор Института кристаллографии имени А. В. Шубникова Российской академии наук, директор федерального государственного учреждения Российский научный центр "Курчатовский институт" (заместитель председателя совета)

Фурсенко А. А. — Министр образования и науки Российской Федерации (заместитель председателя совета)

Абрамов А. Г. — член правления Российского союза промышленников и предпринимателей (работодателей) (по согласованию)

Алешин Б. С. — руководитель Роспрома

Белоусов А. Р. — заместитель Министра экономического развития и торговли Российской Федерации

Богданчиков С. М. — член правления Российского союза промышленников и предпринимателей (работодателей), президент открытого акционерного общества "Нефтяная компания "Роснефть" (по согласованию)

Боровков И. В. — руководитель аппарата Военно-промышленной комиссии при Правительстве Российской Федерации — заместитель Руководителя Аппарата Правительства Российской Федерации

Велихов Е. П. — президент федерального государственного учреждения Российский научный центр "Курчатовский институт"

Голикова Т. А. — заместитель Министра финансов Российской Федерации

Горынин И. В. — генеральный директор федерального государственного унитарного предприятия "Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "Прометей"

Греф Г. О. — Министр экономического развития и торговли Российской Федерации

Григоров С. И. — директор ФСТЭК России

Давыдов В. А. — заместитель руководителя Роскосмоса

Дворкович А. В. — начальник Экспертного управления Президента Российской Федерации (по согласованию)

Евтушенков В. П. — член правления Российского союза промышленников и предпринимателей (работодателей), председатель совета директоров открытого акционерного общества "Акционерная финансовая корпорация "Система" (по согласованию)

Жуков А. Д. — Заместитель Председателя Правительства Российской Федерации

Каблов Е. Н. — генеральный директор федерального государственного унитарного предприятия "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов"

Кириенко С. В. — руководитель Росатома

Климашин Н. В. — руководитель Научно-технической службы ФСБ России

Коробов А. В. — генеральный директор открытого акционерного общества "Российская венчурная компания" (по согласованию)

Мазуренко С. Н. — руководитель Роснауки

Мезенцев Д. Ф. — заместитель Председателя Совета Федерации Федерального Собрания Российской Федерации (по согласованию)

Митин С. Г. — заместитель Министра сельского хозяйства Российской Федерации

Моисеев Н. Ф. — директор Департамента оборонной промышленности и высоких технологий Правительства Российской Федерации (ответственный секретарь совета)

Мордашов А. А. — член правления Российского союза промышленников и предпринимателей (работодателей), генеральный директор открытого акционерного общества "Северсталь" (по согласованию)

Осипов Ю. С. — президент Российской академии наук (по согласованию)

Попик В. М. — заместитель начальника Экспертного управления Президента Российской Федерации (по согласованию)

Прохоров М. Д. — председатель совета директоров открытого акционерного общества "Полюс Золото" (по согласованию)

Рейман Л. Д. — Министр информационных технологий и связи Российской Федерации

Реус А. Г. — заместитель Министра промышленности и энергетики Российской Федерации

Садовничий В. А. — ректор Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (по согласованию)

Сердюков А. Э. — Министр обороны Российской Федерации

Стародубов В. И. — заместитель Министра здравоохранения и социального развития Российской Федерации

Хлунов А. В. — директор департамента Минобрнауки России

Христенко В. Б. — Министр промышленности и энергетики Российской Федерации

Шаккум М. Л. — председатель Комитета Государственной Думы по промышленности, строительству и наукоемким технологиям (по согласованию)

Якунин В. И. — член правления Российского союза промышленников и предпринимателей (работодателей), президент открытого акционерного общества "Российские железные дороги" (по согласованию)

Москва,
14 июня 2007 г.,

Сообщение для печати

Постановление от 9 июня 2007 г. № 364 О Правительственном совете по нанотехнологиям
Правительство Российской Федерации постановляет:

1. Образовать Правительственный совет по нанотехнологиям.
2. Утвердить прилагаемое Положение о Правительственном совете по нанотехнологиям.

Председатель Правительства Российской Федерации М. Фрадков

УТВЕРЖДЕНО
постановлением Правительства
Российской Федерации
от 9 июня 2007 г. # 364

ПОЛОЖЕНИЕ о Правительственном совете по нанотехнологиям

1. Правительственный совет по нанотехнологиям (далее — Совет) является постоянно действующим совещательным органом, образованным в целях обеспечения взаимодействия федеральных органов исполнительной власти с представителями предпринимательского сообщества и научной общественностью по выработке предложений по реализации государственной политики в области нанотехнологий и nanoиндустрии в соответствии с президентской инициативой "Стратегия развития nanoиндустрии" (поручение Президента Российской Федерации от 24 апреля 2007 г. # Пр-688).

2. Совет в своей деятельности руководствуется Конституцией Российской Федерации, федеральными конституционными законами, федеральными законами, указами и распоряжениями Президента Российской Федерации, постановлениями и распоряжениями Правительства Российской Федерации, а также настоящим Положением.

3. Основными задачами Совета являются предварительное рассмотрение, проведение экспертной оценки и подготовка предложений, носящих рекомендательный характер, связанных с разработкой и практическим использованием достижений науки в области нанотехнологий, развитием nanoиндустрии, а также с формированием рынка нанопродукции и nanoуслуг с целью реализации интеллектуального, организационного и финансового потенциала страны.

4. Совет для реализации возложенных на него задач имеет право:

а) запрашивать в установленном порядке у федеральных органов исполнительной власти, органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, а также организаций материалы и информацию по вопросам, отнесенным к компетенции Совета;

б) заслушивать представителей федеральных органов исполнительной власти, органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, научных организаций и предпринимательского сообщества по вопросам, отнесенным к компетенции Совета;

в) создавать рабочие группы по отдельным направлениям деятельности Совета с привлечением представителей заинтересованных федеральных органов исполнительной власти, предпринимательского сообщества, ученых и независимых экспертов для проведения экспертной оценки принимаемых Советом решений в области развития нанотехнологий и nanoиндустрии.

5. Председателем Совета является Первый заместитель Председателя Правительства Российской Федерации. Председатель Совета имеет двух заместителей.

Состав Совета утверждается Правительством Российской Федерации.

Председатель Совета для оперативного решения задач вправе принять решение о создании президиума.

6. Совет и его президиум осуществляют свою деятельность в соответствии с регламентом и планами работ, которые принимаются на заседании Совета и утверждаются его председателем. Порядок работы Совета по отдельным вопросам определяется его председателем или по его поручению заместителем председателя Совета.

Планы работы рабочих групп утверждаются их руководителями в соответствии с планами работы Совета.

7. Заседания Совета или его президиума проводятся по мере необходимости, но не реже 1 раза в квартал. Внеочередные заседания Совета или его президиума проводятся по решению председателя Совета. Заседания Совета или его президиума проводит председатель Совета или по его поручению заместитель председателя Совета.

Заседание Совета считается правомочным, если на нем присутствуют более половины его членов. Члены Совета участвуют в его заседаниях без права замены. В случае невозможности присутствия члена Совета на заседании он имеет право заблаговременно представить свое мнение по рассматриваемым вопросам в письменной форме.

При необходимости на заседания Совета могут приглашаться представители федеральных органов исполнительной власти, органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, общественных объединений, организаций, предпринимательского сообщества, не входящие в состав Совета.

8. Решения Совета принимаются большинством голосов присутствующих на заседании членов Совета. При равенстве голосов решающим является голос председательствующего на заседании.

Решения, принимаемые на заседаниях Совета, оформляются протоколами, которые подписывает председательствовавший на заседании. Копии протоколов заседаний Совета рассылаются его членам.

9. Совет информирует заинтересованные федеральные органы исполнительной власти, органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органы местного самоуправления и организации о подготовленных предложениях в виде выписки из протокола заседания Совета.

10. Организационно-техническое обеспечение деятельности Совета осуществляет Аппарат Правительства Российской Федерации.

Москва,

14 июня 2007 г.,

N 0879

Нейлоновый нанокompозит бьет рекорды жесткости

Как сообщает Nanotechweb, ученые из США преуспели в создании нанокompозита на основе нанотрубок и нейлона, который характеризуется высокой прочностью.

Известно, что углеродные однослойные нанотрубки (SWNT) имеют достаточно высокие механические показатели сами по себе. Однако на сегодняшний день их размеры не превышают десятка миллиметров. Обычно их используют в качестве основы для различных нанокompозитов.

Карен Вини (Karen Winey) из Университета Пенсильвании (University of Pennsylvania) и ее коллеги из Университета Райса (Rice University) смогли создать новый тип нанокompозита, в котором углеродные нанотрубки и цепи нейлона связаны ковалентной связью, что делает его достаточно прочным материалом.

Нейлон 6, 10 — достаточно коммерчески успешный полиамид. Однако Карен и ее коллеги решили улучшить его прочность, используя нанотрубки.

Ученые начали с многослойных углеродных нанотрубок (MWNT), и им удалось увеличить эластичность материала на 214 % и его прочность на 162 %, добавив всего 2 % нанотрубок в качестве наполнителя.

Однако по сравнению с многослойными нанотрубками однослойные имеют более высокий модуль Юнга, поэтому ученые решили использовать и их в композите. В итоге, добавление в нейлон 1 % однослойных нанотрубок привело к увеличению его жесткости на 160 %, а вязкость нейлона увеличилась на 140 %.

Как говорит Карен, подобные нанокompозиты в недалеком будущем могут произвести революционные сдвиги в традиционной текстильной, аэрокосмической и строительной промышленности.

Источник: Nanotechweb: Nanotube-nylon composite breaks new record (<http://nanotechweb.org/articles/news/6/4/8/1>)

В наном мире вода превращается в патоку

Физики из Технического Института Джорджии (Georgia Tech) недавно установили, что в наноразмерном диапазоне вода ведет себя не так, как предписывают классические законы гидродинамики.

Как сообщили ученые во главе с Элизой Риедо (Elisa Riedo) в выпуске журнала Physical Review B, от 15 марта 2007 г.; вода в каналах нанометровых размеров ведет себя почти как твердое тело.

Как сообщает PhysOrg, эти исследования очень важны для молекулярных биологов и фармацевтов, которых интересует поведение жидкости в структуре клеток и медицинских препаратов.

Элиза и ее коллеги исследовали протекание жидкости через канал диаметром 2 нм (рис. 1). Это достаточно маленький канал. Напомним, что на отрезке в 1 нм можно расположить в длину восемь атомов кислорода.

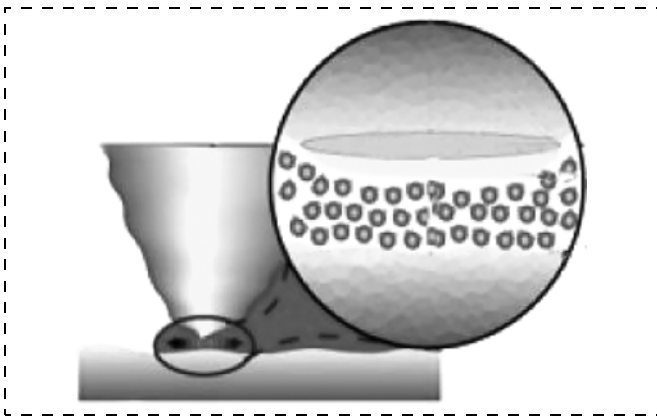


Рис. 1. Схематическое изображение структуры воды в канале (Georgia Tech)

Оказалось, что, протекая, а вернее, продавливаясь через наноканал, вода ведет себя как патока — вязкая субстанция. Кроме того, в канале вода организовалась в ряд слоев, что тоже ранее было неизвестно ученым.

Для проведения эксперимента Риедо использовала атомно-силовой микроскоп (АСМ) с наконечником в виде канала, который смог измерить гидрофизические параметры воды.

Увеличивая силу давления зонда АСМ на воду, Риедо также смогла установить, что при сжатии вода формирует многослойную структуру, близкую к морфологии жидких кристаллов.

Компьютерное моделирование подтвердило теоретические изыскания Риедо, поэтому на сегодняшний день ученые хотят пойти дальше и исследовать поведение воды с примесями в наноканалах.

Источник: PhysOrg: Water flows like molasses on the nanoscale (<http://www.physorg.com/news96694671.html>)

Нанорожки в доставке лекарств

Как сообщает Nanotechweb, ученым удалось узнать новые свойства ранее открытых наноструктур — углеродных нанорожков (carbon nanohorns — CNHs), которые будут чрезвычайно востребованы при доставке лекарств в медицине. Об открытии сообщил китайский ученый Фенгбоа Жан (Fengboa Zhang) из университета Тяньжин и его коллеги из университета Нанкай (Tianjin и Nankai) Китая.

Конгломерат из углеродных нанорожков хорошо растворим в воде и при их производстве легче избежать агломерации наноматериалов, чем при производстве аналогичных углеродных наноструктур — нанотрубок.

Отдельный нанорожок представляет собой конусообразную нанотрубку, закрытую с узкой стороны. Силы Ван-дер-Ваальса заставляют нанорожки собираться вместе в сферические структуры диаметром до 100 нм, похожие на цветы (рис. 2).

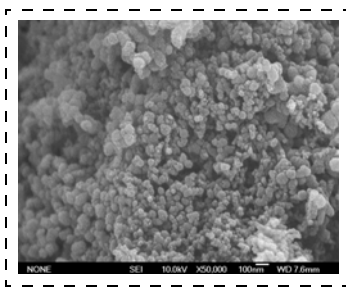


Рис. 2. Нанорожки формируют "цветок" (Fengboa Zhang)

Как говорит Жан, нанорожки имеют преимущества перед наночастицами и нанотрубками при внутриклеточной доставке медикаментов, распространенной в настоящее время в исследовательских работах по фармацевтическим средствам будущего.

Их конусообразная полость может хранить как цепочки ДНК для генной терапии, так и обычные медикаменты.

Для отделения нанорожков от "цветочной" формации ученым потребовалось всего-навсего обработать их водный раствор ультразвуком в течение 20 мин.

Теперь Жан и его коллеги исследуют нанорожки на биологическую совместимость с тканями человека и животных.

Источник: Nanotechweb: Carbon nanohorns shape up for delivery (<http://nanotechweb.Org/articles/news/6/4/20/1>)

Создан необычайно емкий конденсатор на основе нанокompозита

Команда исследователей из Технологического института Джорджии (Georgia Institute of Technology) разработала новую технологию производства полимерных пленок с включением наночастиц (рис. 3).

Как сообщает EurekAlert, эти нанопленки будут крайне важны для создания конденсаторов высокой емкости.

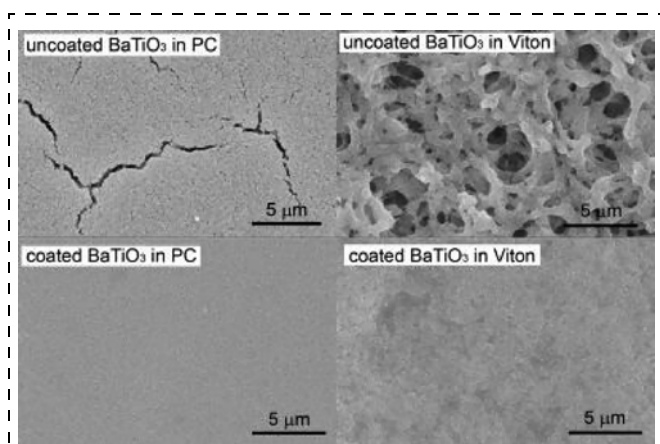


Рис. 3. Нанокompозит на основе наночастиц титаната бария (Joseph W. Perry)

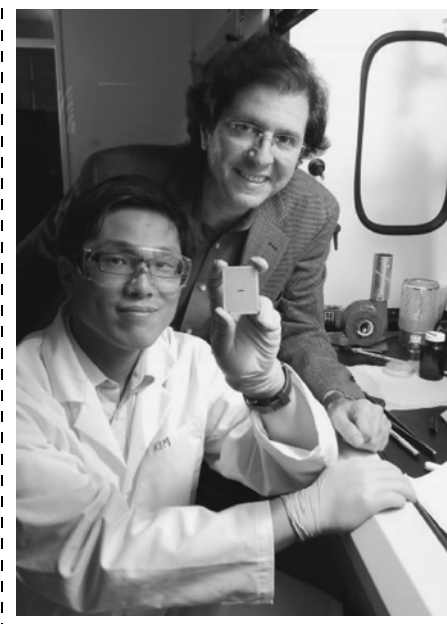


Рис. 4. Конденсаторный массив, полученный учеными (Joseph W. Perry)

И это станет возможным благодаря наночастицам титаната бария (BaTiO_3), которые могут хранить вдвое больше электричества, чем в современных сверхемких конденсаторах. Особенно это открытие пригодится в разработке мощных батарей для мобильных телефонов.

Профессор Йозеф Перри (Joseph W. Perry) говорит, что полученный им нанокompозит характеризуется высокой диэлектрической постоянной и высоким барьером электрического пробоя, в результате чего этот материал как нельзя лучше подходит для конденсаторов высокой емкости.

Новый наноматериал был протестирован на частотах до 1 ГГц. Как говорит Перри, по результатам исследования видно, что нанокompозит будет работать при частотах, превышающих это значение.

Так как композит представляет интерес для производителей электронных устройств, то уже идет речь о его коммерциализации. Однако перед этим пройдет еще несколько тестовых экспериментов, в которых Перри и его коллеги попытаются еще улучшить емкостные параметры будущего суперконденсатора (рис. 4).

Источник: EurekAlert: New nanocomposite processing technique creates more powerful capacitors (http://www.eurekalert.org/pub_releases/2007-04/giot-nnp042507.php)

Получены нанотрубки рекордной длины

Учеными-материаловедами совершен прорыв в области наноматериалов. Им удалось синтезировать цельную нанотрубку длиной 12 мм, и этот "наноматериал" уже видно невооруженным глазом.

Как сообщает EurekAlert, углеродные нанотрубки уже давно попали в поле зрения ученых благодаря своим уникальным механическим характеристикам. Длинные нанотрубки могут открыть новую эру в разработке сверхпрочных материалов.

Также нанотрубки — отличные проводники электричества, а это позволяет использовать их в составе различных сенсоров.

Правда, до сегодняшнего дня можно было синтезировать только небольшие участки нанотрубок — самый большой из которых был 3 мм. Полученная нанотрубка в 900 000 раз длиннее, чем ее диаметр, который составляет около 20 нм.

Для того чтобы ее получить, ученым из Университета Цинциннати (University of Cincinnati — UC) и их коллегам из частной компании First Nano пришлось разработать дополнения к традиционному методу парового осаждения углерода в вакууме (CVD). Большинство нанотрубок получают с помощью именно этого метода.

На этот раз ученые Весселин Шанов (Vesselin Shanov) и Марк Шульц (Mark Schulz) использовали специальную установку EasyTube 3000 и катализаторы на основе тонких слоев керамики и металла. "Этот процесс производства нанотрубок особен тем, что катализатор в течение долгого времени остается в установке, в то время как в традиционной CVD-камере он со временем не достает до зоны активного образования наноматериала", — говорит Шанов.

Таким образом, на подложке из кремния ученые получили 10-сантиметровый "ковёр" из нанотрубок 12 мм высотой.

О своем достижении ученые сообщили на апрельском заседании Single Wall Carbon Nanotube Nucleation and Growth Mechanisms workshop, организованный НАСА и Институтом Райса (Rice University).

Источник: EurekAlert: The longest carbon nanotubes you've ever seen (http://www.eurekalert.org/pub_releases/2007-05/nst-tlc051007.php)

Жуки подсказали новый материал для оптики

Как оказалось, нанотехнологиям можно учиться у природы. Южноамериканский жук *Plusiotic resplendens* использует их для того, чтобы "красиво" выглядеть. Ученые же хотят использовать его "красоту" для создания различных оптических устройств.

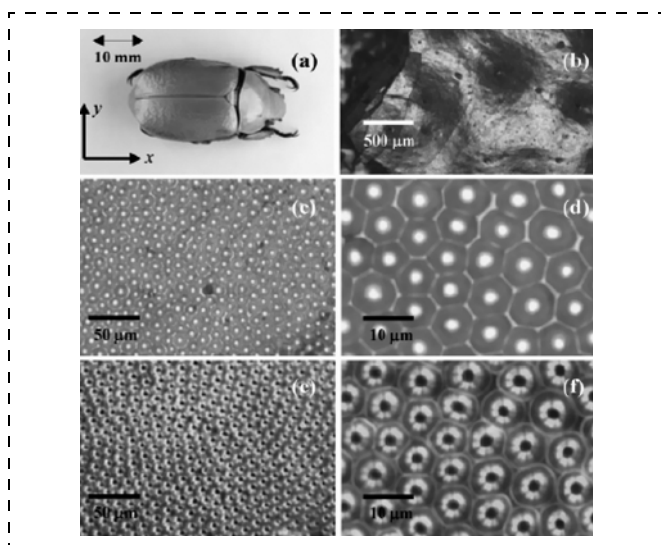


Рис. 5. Жук *Plusiotic resplendens* и микрофотографии его панциря

Команда ученых во главе с Шэрон Джевелл (Sharon Jewell) из Университета Эксетера (University of Exeter), Великобритания, установила, что панцирь жуков семейства *Plusiotic* покрыт специальными наноразмерными образованиями, отражающими свет только с левосторонней круговой поляризацией. Этот удивительный эффект создается благодаря наличию в составе панциря насекомого сложной структуры фибриновых волокон, находящихся в составе протеиновой матрицы. Эта структура очень похожа на спиральную микроструктуру жидких кристаллов холестерина (рис. 5).

Ученые смогли детально исследовать структуру панциря только с помощью сканирующей электронной микроскопии. Как говорят исследователи, детальное изучение панциря жука позволит создать новый класс оптических устройств, в частности дисплеев, избирательно отражающих свет. Кроме этого, жук поможет улучшить современные матрицы микрозеркал, используемых в оптоволоконной технике.

Источник: Nanotechweb: Beetles turn to nanotechnology (<http://nanotechweb.org/articles/news/6/5/15/1>)

Blu-ray под прицелом наночастиц

Физики из Соединенного Королевства впервые изготовили оптический элемент памяти, информация в которых зависит от фазового состояния наночастиц галлия (рис. 6).

Как сообщает Nanotechweb, новый элемент памяти создан Бруно Соаресом (Bruno Soares) и его коллегами из Университета Саусхэмптона (University of Southampton). Как установили ученые, наночастицы галлия могут находиться в четырех различных оптических состояниях, в то время как для записи информации в традиционных DVD-дисках используются только два. Поэтому нет ничего удивительного в том, что новый метод позволяет, как минимум, вдвое увеличить емкость оптических дисков.

С помощью коротких оптических импульсов мощностью 1,5 пДж от лазера небольшой мощности ученым удалось добиться устойчивого "переключения" фаз наночастицы (рис. 7). Для переключения

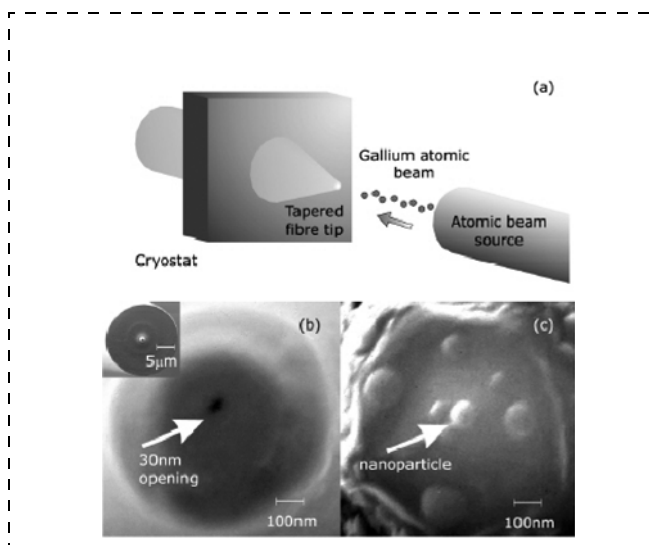


Рис. 6. Наночастица Ga

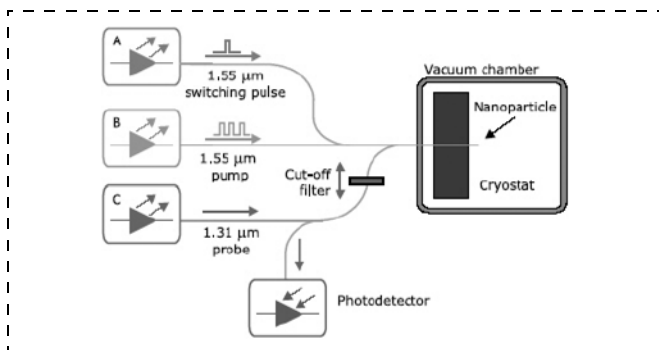


Рис. 7. Переключение наночастицы

фазового состояния наночастицы требуется гораздо меньше энергии, чем в аналогичном случае для ячеек памяти в DVD-дисках.

Размер наночастицы галлия, которую использовали ученые, составляет 80 нм. Их ученые смогли вырастить на оптическом волокне, покрытом золотой пленкой.

Как комментирует Соарес, поскольку с наночастицей Ga можно обращаться так же, как и с обычной ячейкой памяти, и фазовые состояния можно "пролистать" с помощью лазера, то, возможно, у flash-памяти появился простой оптический аналог.

Как оценивают ученые, "оптическая память" может достигать плотности до 0,2 Тбайт на квадратный дюйм. Емкость современных дисков Blu-ray DVD — 0,015 Тбайт на квадратный дюйм. Оказывается, что "диски на наночастицах" могут хранить в 12 раз больше высокотехнологичных Blu-ray. А это очень и очень много.

Как отметил Соарес, серьезных технологических преград для развития Ge-дисков не наблюдается, поэтому можно ожидать появления в недалеком будущем подобные средства хранения данных.

В дальнейшие планы ученых входит изучение других типов наночастиц для того, чтобы выбрать максимально "информационные" наноматериалы, пригодные для оптической записи данных.

Источник: Nanotechweb: New look for optical data storage (<http://nanotechweb.org/articles/news/6/5/13/1>)

Нанобабочки помогут в создании магнитной логики

Учеными созданы магнитные материалы наноразмерного диапазона, которые могут быть использованы при создании нанопамати и логических цепей, работающих при комнатных температурах.

Как сообщает Nanotechweb, Торстен Хеседаль (Thorsten Hesjedal) и его коллегами из Университета Ватерлоо, Канада (University of Waterloo) были проведены исследования магнитных свойств наноразмерных точек. Как оказалось, наноструктуры в виде галстука-бабочки характеризуются особыми магнитными свойствами.

Элементарным блоком любой магнитологического устройства — памяти или логики — является наноразмерный магнит. Эта наноструктура кроме магнитных свойств должна при внешнем воздей-

ствии "переключать" свое состояние с логического "0" на логическую "1" и наоборот.

Эти отдельные нанодомены собираются затем в логику необходимой структуры, которая выполняет требуемые операции, проходящие благодаря магнитостатическому взаимодействию между доменами (рис. 8). Эти внутренние взаимодействия между магнитными доменами наиболее всего интересуют ученых.

Торстен и его коллеги провели ряд исследований с помощью компьютерного моделирования, взяв за основу наноточки из специального сплава Permalloy (это никелево-железный сплав, часто применяющийся в радиотехнической индустрии под кодом LLG).

Компания IBM использует сплав LLG довольно часто для производства элементов с гигантским магнитосопротивлением. Ученым хотелось точно узнать, как будут вести себя в составе логики наноманиты разной формы: прямоугольной, эллипсоидной и в виде галстука-бабочки. Все наноструктуры были одинакового объема и имели толщину 12 нм (рис. 9).

Исследуя петлю гистерезиса всех типов наноструктур, Хеседаль и его коллеги вычислили их коэрцитивную силу и остаточную намагниченность. Как оказалось, комбинация эллипсов и прямоугольников дает уменьшение коэрцитивной силы, а "нанобабочки" вообще характеризуются ее наименьшим значением.

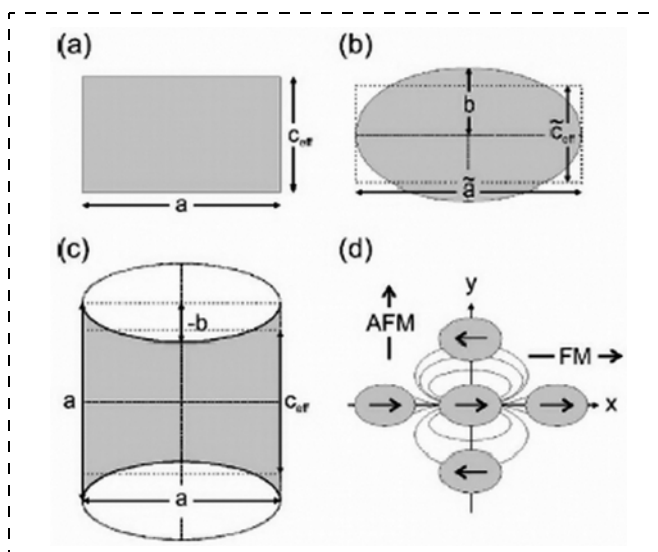


Рис. 8. Различные формы магнитных наноструктур (University of Waterloo)

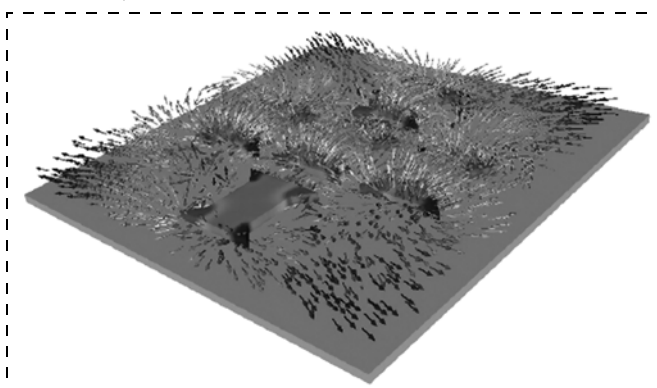


Рис. 9. Математическое моделирование магнитных свойств нанобабочек (University of Waterloo)

Далее ученые начали комбинировать наноструктуры в составе магнитной матрицы, для того, чтобы найти их оптимальное расположение в составе магнитологического устройства. В результате команда подобрала наиболее удобоваримое сочетание форм наночастиц и их расположения на плоской поверхности.

Как говорит Хеседаль, следующим шагом исследователей будет создание конкретного логического устройства на основе магнитных нанобабочек.

Источник: Nanotechweb: Nano "bow ties" for logic gates (<http://nanotechweb.org/articles/news/6/4/17/1>)

Ученые раскрывают секреты нанотрубок

Исследователи из Университета Саррея (University of Surrey) показали, что недостаточно знать морфологию поверхностного строения углеродных одностойных нанотрубок для того, чтобы говорить об их электрофизических свойствах.

Как сообщает PhysOrg, крайне важно знать физические свойства нанотрубки, чтобы проектировать нанoeлектронные устройства, такие как нанотранзисторы или соединительные проводники.

О своей работе профессор Равви Сильва (Ravi Silva) сообщил в журнале Nano Letters (DOI: 10.1021/nl070072p), отметив, что исследования физики внутренней поверхности нанотрубок будет важно для дальнейшего развития нанoeлектроники и материаловедения.

Однослойные углеродные нанотрубки сегодня довольно часто используют в различных отраслях нанoeлектроники. Это и гибкие дисплеи на УНТ, и нанoeлектронные транзисторы, и соединительные проводники в составе микросхем, и ячейки памяти. Однако их физические свойства в составе этих нанoeлектронных приборов до конца не изучено.

В особой степени ученых интересует исследование многослойных углеродных нанотрубок, в которых до сих пор основными физическими параметрами являлись число слоев и хиральность. Теперь же ученым нужно детально исследовать электрические свойства внутренних слоев, так как они играют важную роль в процессе переноса электронов нанотрубками.

Источник: PhysOrg: Probing the inner secrets of multi-layer carbon nanotubes (<http://www.physorg.com/news96123442.html>)

Составил Ю. Г. Свидиненко, главный аналитик компании Nanotechnology New Network

V Научно-практическая конференция "МИКРОТЕХНОЛОГИИ В АВИАЦИИ И КОСМОНАВТИКЕ" 18—19 сентября 2007 г.

Организаторы:

Межотраслевой Научно-технический совет "Микротехнологии в космосе"
и Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения (ФГУП "РНИИ КП")

Ежегодная конференция "МИКРОТЕХНОЛОГИИ В АВИАЦИИ И КОСМОНАВТИКЕ" (проводится с 2002 г.) посвящена решению актуальных проблем миниатюризации космических аппаратов (КА) и приборов, проектам новых космических систем на базе сверхмалых спутников и средств малозатратного выведения сверхмалых КА, а также вопросам применения космической информации, получаемой системами, создаваемыми на базе микротехнологий.

В прошедших конференциях приняли участие представители более 60 производственных и научно-исследовательских организаций Роскосмоса и других ведомств, институтов Российской академии наук, университетов, вузов и иных организаций.

Тематические секции:

- Новые проекты КА и систем, создаваемых на основе микротехнологий
- Технологические аспекты разработки сверхмалых КА и систем на их основе (конструирование, производство, испытания)
- Малозатратные средства выведения сверхмалых КА; авиационные системы на базе микротехнологий
- Миниатюризация бортовых подсистем и элементов КА; применение устройств микро- и наносистемной техники
- Области применения и экономические аспекты развития авиакосмических систем на базе микротехнологий.

Место проведения: Москва, ул. Пречистенка, д. 16, Центральный дом ученых РАН.

Зам. председателя Оргкомитета **Вишняков Валерий Модестович** — т. (495) 517-92-07
Секретарь **Эджумян Галина Владимировна** — т. (495) 673-97-45

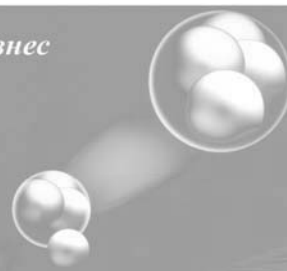
Четвертая международная конференция из серии *Наука и бизнес*



Нанобио- и другие новые и перспективные биотехнологии

15 – 18 октября 2007 года

Пушино
Московская область
Россия



Четвертая международная конференция из серии *Наука и бизнес*

Нанобио- и другие новые и перспективные биотехнологии

15 – 18 октября 2007 года

Пушино, Центр биологических исследований Российской Академии наук,
Московская область, Россия

Первое информационное сообщение

Наука и высокие технологии открыли широкие ворота в наномир. Одно из самых перспективных направлений развития науки и техники - нанотехнология, уже готово проникнуть во все сферы деятельности человека, кардинально изменить производство, экономику, и жизнь человека в целом. Из всех разновидностей нанотехнологии наиболее быстрыми темпами сейчас развивается *нанобиотехнология*, а именно использование нанообъектов и наноструктур биологического происхождения. Это могут быть отдельные органические молекулы или даже клетки, из которых состоит все живое. Нанобиотехнологии нацелены на разработку принципиально новых методов диагностики и лечения, новых лекарств и способов их доставки, на создание высокоэффективных пород сельскохозяйственных животных и сортов растений, гибридных биоэлектронных устройств, сенсоров, анализаторов химического состава воздуха и воды, на нейтрализацию отходов и охрану окружающей среды.

К сожалению, однако, пока никто не может сказать наверняка, что сулит нам новая глобальная технологическая революция. Некоторые последствия ее можно предсказать уже сейчас, другие менее очевидны и требуют серьезных исследований. Где гарантия, что, например, самовоспроизводящиеся искусственные наноорганизмы не будут использованы в военных целях для создания супервируса, способного вывести из строя любую армию, или что не сбудутся мрачные пророчества фантастов, уже описавших восстание машин? Будет ли в будущем человечество благодарно создателям нанобиотехнологий?

Цель Конференции - создание возможности для диалога ученых, политиков, бизнесменов и тех, кто принимает решения, в надежде, что это поможет найти ответы на поставленные вопросы. Предполагается, что Конференция внесет вклад в более ясное понимание путей развития и перспектив нанобиотехнологии. Имея уже состоявшуюся историю успеха, мы готовы сотрудничать и помогать в установлении и продолжении деловых и научных контактов в вышеперечисленных областях биотехнологических исследований и разработок.

Место проведения конференции



Пушино – центр биологических исследований Российской Академии наук, расположенный в 100 км к югу от Москвы в одном из самых красивых районов Московской области.

Осенью (как и в другие времена года) Пушино – очень приятный город: тихий, зеленый и дружелюбный. Весь город можно легко обойти пешком.



Пушинский научный центр состоит из восьми институтов Российской Академии наук, что делает его весьма привлекательным для посещения.



Конференция будет проводиться в здании Института биохимии и физиологии микроорганизмов Российской Академии наук.

CONTENTS

Luchinin V. V. <i>Introduction into the Industry of Nanosystems</i>	2
Vetrov A. A., Komissarov S. S., Korlyakov A. V., Sergushichev A. N. <i>Fiberoptical Vibrosensor Based on Microoptomechanical Transducer</i>	8
Afanasiev A. V., Ilyin V. A. <i>Photodiode and MIS UV-sensors Based on Monocrystalline and Porous Silicon Carbide</i> . . .	13
Korlyakov A. V. <i>Ultrathin Membranes in Microsystem Technics</i>	17
Zimina T. M. <i>Nano- and Microanalytical Systems in Analysis Liquids and Gases</i>	27
Gaikovich K. P. <i>Scanning Near-Field Electromagnetic Tomography</i>	50
Kostsov E. G., Fadeev S. I., Kolesnikov A. A. <i>High – Energy Microelectromechanical Microcommutators</i>	66

For foreign subscribers:

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

The journal bought since november 1999.

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

ISSN 1813-8586.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(495) 269-5510.

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

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4/1. Телефон редакции журнала **(495) 269-5510. E-mail: nmst@zknet.ru**

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства

в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер *Т. Н. Погорелова*. Технический редактор *О. А. Ефремова*. Корректор *Е. Г. Волкова*

Сдано в набор 22.06.2007. Подписано в печать 25.07.2007. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 11,99. Заказ 1058. Цена договорная

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