

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 12(161) ♦ 2013

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России и в систему Российского индекса научного цитирования

Издается с 1999 г.

Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н, проф.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н, проф.

Шур М., д.ф.-м.н. (США)

Редакционный совет:

Аристов В. В., чл.-кор. РАН

Асеев А. Л., акад. РАН

Гапонов С. В., акад. РАН

Каляев И. А., чл.-кор. РАН

Квардаков В. В., чл.-кор. РАН

Климов Д. М., акад. РАН

Ковальчук М. В., чл.-кор. РАН

Нарайкин О. С., чл.-кор. РАН

Никитов С. А., чл.-кор. РАН

Рыжий В. И., чл.-кор. РАН

(Япония)

Сауров А. Н., чл.-кор. РАН

Сигов А. С., акад. РАН

Чаплыгин Ю. А., чл.-кор. РАН

Шевченко В. Я., акад. РАН

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И., д.ф.-м.н.

(Белоруссия)

Андреев А., к.ф.-м.н.,

(Великобритания)

Андреевский Р. А., д.х.н., проф.

Антонов Б. И.

Астахов М. В., д.х.н., проф.

Быков В. А., д.т.н., проф.

Волчихин В. И., д.т.н., проф.

Горнев Е. С., д.т.н., проф.

Градецкий В. Г., д.т.н., проф.

Гурович Б. А., д.ф.-м.н., проф.

Захаревич В. Г., д.т.н., проф.

Кальнов В. А., к.т.н.

Карякин А. А., д.х.н., проф.

Колобов Ю. Р., д.т.н., проф.

Кузин А. Ю., д.т.н., проф.

Мокров Е. А., д.т.н.

Панич А. Е., д.т.н., проф.

Панфилов Ю. В., д.т.н., проф.

Петросянц К. О., д.т.н., проф.

Петрунин В. Ф., д.ф.-м.н., проф.

Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва)

Путилов А. В., д.т.н., проф.

Пятышев Е. Н., к.ф.-м.н.

Серебрянников С. В., д.т.н., проф.

Стриханов М. Н., д.ф.-м.н., проф.

Телец В. А., д.т.н., проф.

Тимошенков С. П., д.т.н., проф.

Тодуа П. А., д.т.н., проф.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Григорин-Рябова Е. В.

Чугунова А. В.

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

- Лучинин В. В.** Мультидисциплинарные технологии. Гибкая электроника и фотоника 2
- Афанасьева О. В., Калинин С. Б., Лучинин В. В.** Сетевая интеграция образовательного сегмента национальной нанотехнологической сети — база данных научно-технической продукции, информационных и образовательных услуг 7
- Корляков А. В., Лучинин В. В., Марасина Л. А.** К вопросу о формировании профессиональных стандартов в интересах nanoиндустрии 14

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

- Зимина Т. М., Соловьев А. В., Лучинин В. В., Муратова Е. Н., Краева Л. А., Хамдулаева Г. Н.** Принципы создания гибридных миниатюрных приборов для выращивания колоний микробных клеток на основе пористого анодного оксида алюминия 19
- Голоудина С. И., Карагеоргиев П. П., Лучинин В. В., Пасюта В. М.** От молекулярного наслаивания к эпитаксии органических веществ методом Ленгмюра—Блоджетт 34

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

- Лучинин В. В., Муратова Е. Н., Шемухин А. А.** Матрицы из пористого оксида алюминия как капиллярные матрицы-шаблоны для локализации воздействия ионов высоких энергий 39
- Калёнов В. Е., Бройко А. П., Корляков А. В., Хмельницкий И. К., Чигирев Д. А., Быков Ю. О., Лагош А. В., Крот А. И.** Микродвижители для микроробототехники 41

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

- Афанасьев П. В., Ильин В. А., Козырев А. Б., Лучинин В. В., Смелов И. Н.** Рекуперация энергии из эфира 47
- Указатель статей, опубликованных в журнале "Нано- и микросистемная техника" в 2013 году 52**
- Contents 56**

Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайте журнала (<http://novtex.ru/nmst/>) и научной электронной библиотеки (<http://elibrary.ru>). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на сайте журнала: с 1999 по 2011 г. в разделе "АРХИВ".

ПОДПИСКА:
по каталогу Роспечати (индекс 79493);
по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)
в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10)

Адрес для переписки:
107076 Москва, Стромьинский пер., д. 4
e-mail: nmst@novtex.ru

УДК 621.3

В. В. Лучинин, д-р техн. наук, проф., зав. каф., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ГИБКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ФОТОНИКА

Поступила в редакцию 28.09.2013

Представлены базовые тенденции развития мультидисциплинарных технологий превосходства в области создания микро- и нанотехники.

Ключевые слова: микро- и нанотехнологии, междисциплинарность, гибкость, трехмерность, гетерогенность, электроника, фотоника

Введение

Современная экономика основана на концентрации знаний, умений, человеческих и информационных ресурсах. Она базируется на избирательной поддержке наиболее перспективных фундаментальных исследований, сетевой кооперации для обеспечения транснационального сотрудничества и эффективного взаимодействия с высокотехнологичным производством. Особое место в современной инновационной системе трансфера знаний и технологий безусловно занимает такое динамично развивающееся научно-техническое направление как **гибкая электроника и фотоника**, которые наиболее часто ассоциируются с комплексом понятий:



Рис. 1. Базовые тенденции развития современной микро- и нанотехники

гибкость и (или) трехмерность субстрата, гетерогенность или конвергентность, адаптивность и биосовместимость реализуемых композиций (рис. 1).

Цель данной работы — систематизация конструктивно-технологического базиса направления "Гибкая электроника и фотоника" как мультидисциплинарной прорывной технологии при создании изделий микро- и нанотехники.

Научно-технологические приоритеты — гибкая электроника и фотоника

У термина "**гибкая электроника**", отражающего конструктивно-функциональные особенности размещения элементов, компонентов и систем коммутации, а также процессов сборки и упаковки, имеется ряд синонимов. Они детализируют и характеризуют две составляющие данного научно-технического направления: **материаловедческий базис**, включая подложку и некоторые функциональные материалы (органическая, полимерная электроника), и **технологический базис** как способ формирования отдельных функциональных элементов и систем коммутации (печатная электроника). Обобщая совокупность представлений, относящихся к гибкой электронике и фотонике, определим ее следующие особенности:

- большие рабочие площади;
- относительно большие размеры элементов;
- невысокое латеральное разрешение (~5 мкм);
- использование мультислойных гетерогенных композиций;
- гибкость субстрата;
- конформность и интегрируемость в объект;
- использование высокопроизводительных печатных технологий;
- относительная простота и низкая стоимость изделий.

Наиболее распространенные специфические технологии гибкой электроники и фотоники, которые требуют в настоящее время определенных специальных компетенций при их адаптации в технологические маршруты, следующие:

- печатно-матричные (рулонные, трафаретные) механические;
- капельно-струйные (принтерные) механические;
- лазерные принтерные, конверсионные (поверхностные) и стереолитографические (объемные) физико-химические;

- аэрозольные.

Особое место занимают текстильные технологии с использованием микро- и нановолокон с различными физико-химическими свойствами, в том числе медико-биологического назначения.

Совокупность наиболее актуальных научно-технологических проблем в области гибкой электроники и фотоники может быть определена в рамках следующего перечня:

- материалы для струйных и матрично-трафаретных печатных микротехнологий;
- гибкие, многослойные гетерогенные и 3D-субстраты;
- струйные и зондовые печатные микро- и нанотехнологии;
- матрично-трафаретные и импринт- микро- и нанотехнологии;
- технологии 3D-микро- и нанотехнологии;
- 2D- и 3D-микросборка;
- оборудование, программные средства и технологические маршруты для производства изделий гибкой электроники и фотоники.

Основные задачи, которые приходится решать в рамках освоения технологий гибкой электроники и фотоники, следующие:

- внедрение современных технологий сквозного проектирования изделий, обеспечивающих эффективное конструкторско-технологическое масштабирование классических макропрототипов для динамичного перехода к изготовлению микро- и нанотехники с ранее недостижимыми параметрами;
- формирование и освоение современной технологической базы синтеза изделий микро- и нанотехники с преимущественной ориентацией на отечественную бескорпусную элементную базу, 3D-интеграцию элементов и использование гибких бесшаблонных принтерных и печатно-матричных технологий;
- освоение технологических маршрутов, реализуемых на основе конформной инфраструктурной модульной организации технологической линии при высокой степени автоматизации процессов, обеспечивающих динамичность перестройки и быстроту адаптации операций;
- экспресс-прототипирование и организация производства достаточно широкой номенклатуры изделий микро- и нанотехники нового поколения с ранее недостижимыми массогабаритными, энергетическими и техническими характеристиками при минимизации временных и экономических затрат на реализацию изделий в условиях возрастания роли интеллектуальной составляющей человеческого фактора на этапе подготовки производства.

Новый конструктивно-технологический облик изделий микро- и нанотехники

Представим далее упорядоченную совокупность конструктивно-технологических особенностей изделий микро- и нанотехники, реализуемых в рамках современных прогрессивных тенденций.

Использование многокристалльных модулей в рамках направления "системы в корпусе" (SIP — System in Package):

- стековая интеграция на основе технологии "кристалл на плате";
- 3D-интеграция на основе многослойных LTCC подложек (LTCC — Low Temperature Co-fired Ceramics);
- 3D-интеграция на основе технологии "вертикального стека полупроводниковых чипов и пластин";
- 3D-интеграция на основе технологии "чип на интерконнект-полупроводниковой подложке".

Использование сборочных технологий:

- поверхностный STM (Surface Mounted Technology) монтажа;
- обратный монтаж кристаллов (Flip-Chip) на основе шариковых (столбиковых) выводов;
- эвтектическая или адгезивная посадка.

Использование различных видов нетрадиционных подложек:

- гибко-жестких печатных микроплат;
- гибких полимерных и металлических субстратов;
- жестких и гибких керамических субстратов на основе широкозонных материалов с высокой теплопроводностью и низкими потерями на СВЧ;
- 3D-объемных полимерных и металлических субстратов, в том числе создаваемых высокоразрешающими лазерной принтерной и стереолитографической технологиями;
- 3D-объемных полимерных металлонаполненных субстратов поверхностно модифицируемых лазерным пучком.

Применение комплекса технологических операций формирования коммутирующих, изолирующих и функционально активных слоев материалов, в том числе локальными методами:

- капельно-струйных технологий;
- печатно-матричных технологий;
- лазерных технологий;
- ионно-плазменных технологий;
- вакуумно-термических технологий;
- газовых (CVD) технологий;
- электрохимических (гальванопластика) технологий;
- электроэрозионных технологий.

Применение комплекса технологических операций по герметизации, тепловой и электромагнитной защите:

- вакуумная герметизация;

- спрей-технологии;
- ламинирование;
- ионно-плазменное осаждение;
- осаждение из газовой фазы;
- заливка и погружение в жидкую фазу.

Для обеспечения автоматизации процесса конструкторско-технологической разработки предполагается использовать имеющийся комплект САПР: CoventorWare; SolidWorks; MentorGraphics; Cadence; TannerTools; T-CAD Synopsys; Phoenix; AutoCAD; AltiumDesigner.

Гибкая электроника и фотоника как базис широкой номенклатуры изделий микро- и нанотехники

Эволюция физико-химической природы материалов, их структурной организации и, как следствие, функциональных свойств в конечном итоге определяет возможность формулировки совокупности требований, которые могут быть предъявлены к изделиям современной микро- и нанотехники (рис. 2). Одной из важнейших тенденций развития микро- и нанотехники является обеспечение дружественного эффективного "человеко-машинного" биотехнического интерфейса. В рамках современных представлений это определяется выполнением совокупности таких требований, как миниатюрность, надежность, энергоэффективность и, безусловно, интегрируемость в рамках "in vivo" и "in vitro" биосовместимости.

Наряду с традиционными изделиями (гибкими оптическими излучателями и фотоприемниками) наиболее нетрадиционные направления реализации изделий микро- и нанотехники на основе технологий гибкой электроники и фотоники могут быть определены следующим образом:

- бионические микроробототехнические комплексы, включая миниатюрные навигационно-ориентационные системы для автономной навигации и позиционирования;
- интеллектуальная высокоинтегрированная мультифункциональная одежда, в том числе с эпидермальной распределенной сенсорно-информационной системой;
- микроаналитические системы типа "лаборатория на чипе" для высокочувствительного биомедицинского контроля и мониторинга биотехносферы;
- сверхминиатюрные инфокоммуникационные модули, в том числе интегрированные с сенсорными и исполнительными микросистемами для обеспечения сбора и передачи информации, идентификации личности и объектов;
- миниатюрные, в том числе распределенные и гибкие источники энергии, включая рекуператоры из эфира и окружающей среды.

В качестве традиционных базовых тенденций оптимизации технических характеристик изделий нового поколения определены следующие:

- снижение массогабаритных показателей;

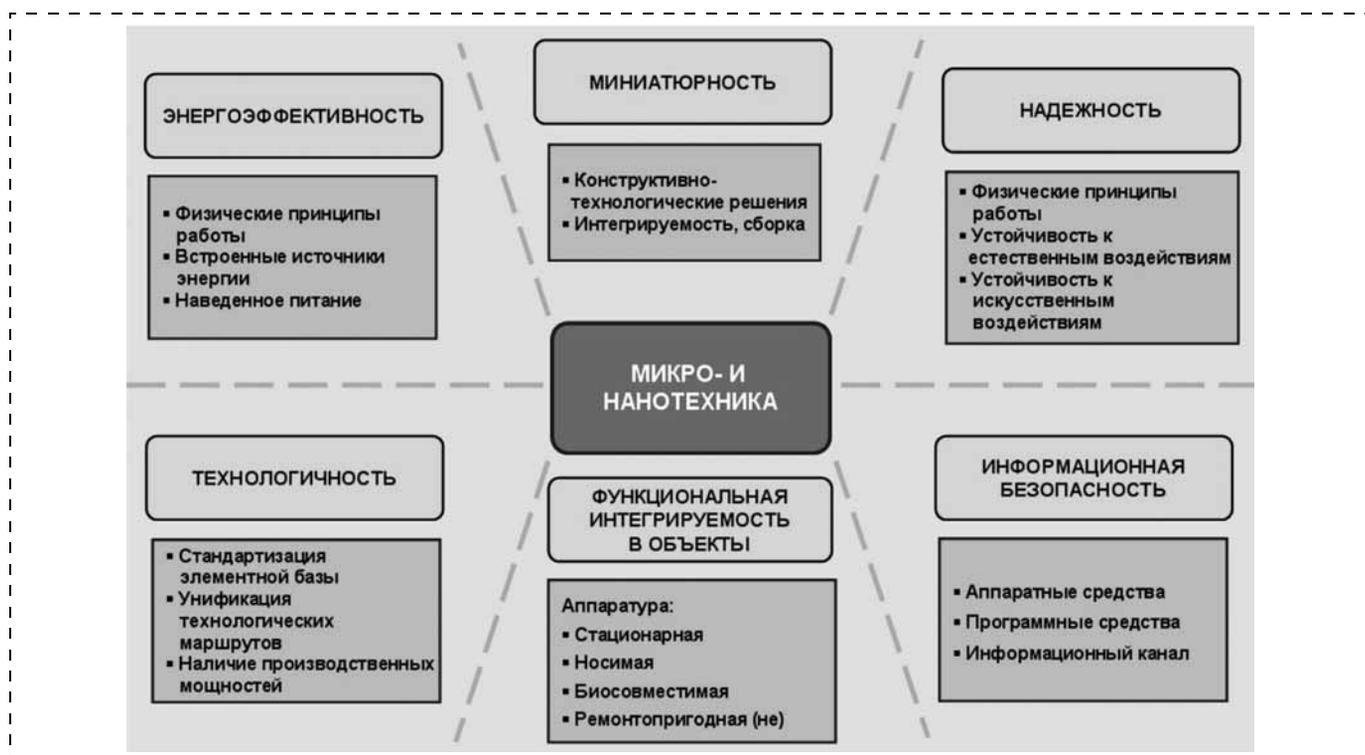


Рис. 2. Требования к современной микро- и нанотехнике

- уменьшение энергопотребления;
- увеличение времени автономного функционирования;
- повышение стойкости к внешним воздействиям;
- вариабельность конструктивного исполнения для оперативной адаптации изделия в минимальные сроки при изготовлении и использовании.

Современный биотехнический интерфейс. "Умная" одежда

Исходя из указанных ранее особенностей гибкой электроники и фотоники в качестве одного из приоритетных направлений реализации ее инновационного потенциала и высокой экономической эффективности технологий, следует, безусловно, выделить так называемую *"умную" одежду*. Развитие данного направления обеспечивает решение следующих приоритетных задач:

— интеграцию в одежде совокупности сенсорно-информационных миниатюрных систем для обеспечения жизнедеятельности человека и повышения уровня его коммуникабельности;

— реализацию концепции "человеко-машинного" биомедицинского интерфейса нового поколения, обеспечивающего внедрение принципов персональной оперативной телемедицины;

— реализацию персональных миниатюрных носимых медицинских систем — аналогов "лабораторий на чипе" или биосовместимых материалов, сочетающих контрольно-диагностические и исполнительно-терапевтические функции, включая оперативный контроль и поддержание определенных параметров внутренней среды организма;

— использование материалов и конструктивно-технологических решений, расширяющих функциональные возможности человека в экстремальных условиях.

В рамках научно-технического направления "умная" одежда могут быть реализованы три поколения изделий:

- поколение I основано на использовании карманов для размещения носимой электроники, объединенных совокупностью вшитых в одежду коммутирующих проводников;
- поколение II, или так называемый *"e-textile"*, представляет собой тканый материал со "вшитыми" антеннами, датчиками, источниками питания, для обеспечения соединений между которыми используется тканый материал с проводящими нитями;
- поколение III реализует концепцию *"systems on textile"* с системной интеграцией функциональных материалов и сверхминиатюрных модулей в

рамках так называемого интеллектуального интерфейса между телом и одеждой, включая возможность использования эпидермальных датчиков и преобразователей.

Функциональные возможности материалов и композиций, создаваемых для изготовления "умной" одежды с использованием технологий гибкой электроники и фотоники, могут быть определены следующим образом:

- химически-, тепло- и радиационностойкие;
- механопоглощающие;
- опто-, ИК- и СВЧ-маскирующие;
- тепловыделяющие, теплопоглощающие и теплогенерирующие;
- механически рекуперирующие и усиливающие;
- опто- и СВЧ-рекуперирующие;
- опто- и СВЧ-излучающие;
- оптически и радиоидентифицирующие;
- тактильно-чувствительные;
- биосенсорные.

Особый интерес проявляется к созданию так называемых сверхтонких микро- и нанокомпозиционных "перманентных" покрытий (опто- и СВЧ-хамелеонов); квантовых точек как базовых элементов средств идентификации и распознавания; волокон, выделяющих бактерицидные и противовоспалительные средства; распределенных источников и рекуператоров энергии.

В рамках текстильных технологий, наряду с традиционными, имеет место развитие направления, характеризующегося понятием *"информационный текстиль"*, в котором используются:

- кодирование переплетением;
- сочетание интегрального и локального кодирования рисунков;
- скрытые многослойные 3D-изображения;
- скрытые рельефные 2D-изображения;
- скрытые гетерогенные изображения, в том числе на основе перманентных свойств волокон.

Интегрированные биотехнические микросистемы — биороботы

Примером технической реализации биотехнической системы (*biobot*) с использованием технологий гибкой электроники является выполняемая Санкт-Петербургским государственным электротехническим университетом "ЛЭТИ" в рамках проекта 12-08-12029-офи_м РФФИ разработка сверхминиатюрной дистанционно-управляемой конвергентной биотехнической системы — биоробота на основе интеграции моторики насекомых и искусственных сенсорно-информационных микросистем. Проект направлен на создание базовой архитектуры миниатюрного биотехнического комплекса на основе дистанционно управляемого насекомого,

определение и оптимизацию функционального состава, исходя из достижения возможных массогабаритных, энергетических и информационных показателей. Отличительной особенностью проекта является поиск возможности применения при решении задач конструктивно-технологической интеграции искусственных и естественных систем, использования в качестве базовых элементов гибких инородных субстратов или природных конструктивно-функциональных элементов тела насекомого, на которых размещаются электронные чипы (рис. 3, см. четвертую сторону обложки).

Заключение

В настоящее время в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете реализуется комплексная программа работ по формированию и введению в эксплуатацию научно-технологического комплекса экспресс-прототипирования и производства нового поколения изделий микро- и нанотехники [1]. Это достигается организацией гибкой кластерной научно-производственной инфраструктуры (рис. 4, см. четвертую сторону обложки), обеспечивающей динамичную реализацию на создаваемой высокотехнологичной аппаратно-программной платформе совокупности технологических маршрутов изготовления широкой номенклатуры изделий, основой формирования которых являются:

- модульный принцип конструкторско-технологической реализации изделий;
- унификация и применение бескорпусной ЭКБ;
- использование многокристалльных модулей, многослойных керамических, гибких и 3D-подложек;
- внедрение 3D и межвидовой интеграции электронных, оптических и механических компонентов.

Решение указанных задач позволит обеспечить:

- экспресс-проектирование изделий на основе эффективного масштабирования макропрототипов;
- унификацию технологических маршрутов изделий на основе модульного принципа конструирования;
- создание изделий микро- и нанотехники на основе интеграции совокупности процессов формирования базовых элементов с одновременной сборкой изделий при использовании сверхпрецизионных систем позиционирования и ориентации;

- создание миниатюрных гибридных систем на основе межвидовой интеграции электронных, оптических и механических компонентов;
- реализацию "бесшаблонного" синтеза изделий с использованием 2D- и 3D-интеграции;
- использование кремниевых субстратов как активной интерконнект подложки-базиса для размещения бескорпусных компонентов;
- внедрение многослойных коммутационных систем с оптическими каналами преобразования и передачи информации.

Для формирования в России профессиональных компетенций и обмена опытом в области быстро прогрессирующего направления "Гибкая электроника и фотоника" ЛЭТИ с 12 по 15 ноября 2013 г. провел на своей базе одноименную научно-техническую конференцию с международным участием и молодежную школу по данной тематике. Функцию одного из основных организаторов выполняет созданное с участием ЛЭТИ в соответствии с Ф3 217 ЗАО "Межвузовский центр прототипирования и контрактного производства микро- и нанотехники" [2], который специализируется в данной области и в настоящее время получил от ряда зарубежных фирм — поставщиков оборудования для гибкой электроники и фотоники право представлять их интересы в России.

Работа выполнена в рамках Программы стратегического развития университета (СПбГЭТУ "ЛЭТИ") "Развитие междисциплинарных исследований и инструментально-технологической базы как основы непрерывного инженерного образования по приоритетным направлениям российской экономики" на 2012—2016 годы и проекта РФФИ 12-08-12029-офи_м (2013—2014 гг.) "Разработка сверхминиатюрного дистанционно-управляемого гибридного биоробота на основе интеграции моторики насекомых и искусственных сенсорно-информационных микросистем".

Список литературы

1. Кутузов В., Лучинин В. Реализация инновационного потенциала вуза. Нанотехнологическая платформа ЛЭТИ // Наноиндустрия. 2012. № 7 (37). С. 34—39.
2. Афанасьев П., Бохов О., Кутузов В., Лучинин В., Шестопалов М. Реализация инновационного потенциала вуза. Центр прототипирования и контрактного производства микро- и нанотехники // Наноиндустрия. 2012. № 6 (36). С. 52—60.

О. В. Афанасьева, инж. 1-й категории,
e-mail: cmid_let1@mail.ru,
С. Б. Калинин, инж. 1-й категории,
В. В. Лучинин, д-р техн. наук, зав. каф.,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина)

СЕТЕВАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО СЕКМЕНТА НАЦИОНАЛЬНОЙ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ — БАЗА ДАННЫХ НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ, ИНФОРМАЦИОННЫХ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСЛУГ

Поступила в редакцию 01.10.2013

Представлены результаты формирования информационно-поисковой системы и базы данных научно-образовательных центров образовательного сегмента национальной нанотехнологической сети.

Ключевые слова: база данных, образовательный сегмент, научно-образовательный центр, национальная нанотехнологическая сеть

Введение

Эффективность системы научно-образовательных центров (НОЦ) как значимого элемента национальной нанотехнологической сети (ННС) определяется выбором целевых ориентиров и сетевых алгоритмов гибкого, экономически обоснованного использования инновационного потенциала НОЦ для реализации второго этапа развития nanoиндустрии в России. Облик и место nanoиндустрии в стране на среднесрочную перспективу на основании анализа всей совокупности руководящих документов и экспертной оценки специалистов можно обобщить следующим образом (табл. 1).

Одной из основных целей следующего этапа формирования ННС является введение в действие и функционирование системно-интегрирующих механизмов обеспечения эффективности использования инфраструктуры, информационно-аналитического, учебно-методического и кадрового потенциала НОЦ на базе ведущих вузов России.

В качестве базовых направлений развития образовательного сегмента ННС определены:

- сетевая интеграция НОЦ через формирование базы данных научно-технической продукции, информационных и образовательных услуг;

- создание системы мониторинга НОЦ для обеспечения кооперации и оценки эффективности их работы;
- организация сетевой дистанционной профессионально-ориентированной подготовки и переподготовки кадров с использованием инфор-

Таблица 1

Приоритеты отечественной nanoиндустрии

№	Приоритеты	Направления развития
1	Государственные приоритеты	<ul style="list-style-type: none"> • Безопасность человека и государства • Технологическая независимость • Конкурентоспособность продукции
2	Доминирующие технологии	<ul style="list-style-type: none"> • Информационные (обслуживающие, интегрирующие) • Бионические (заимствующие "живую" природу) • Когнитивные (думающие, интеллектуальные)
3	Социальная направленность технологий	<ul style="list-style-type: none"> • Медико-биологическая — сохранение народонаселения • Образовательная — сохранение и развитие культурного потенциала • Продовольственная безопасность
4	Технологическая политика	<ul style="list-style-type: none"> • Сохранение и создание уникальных отечественных технологий • Приобретение коммерчески эффективных технологий массового производства • Заимствование и внедрение социально значимых технологий
5	Инфраструктурная политика	<ul style="list-style-type: none"> • Обновление научно-производственной инфраструктуры • Нарастивание производства • Формирование научного задела • Развитие сетевых технологий • Сохранение и развитие профессионально ориентированного образования
6	Законодательно-нормативная база	<ul style="list-style-type: none"> • Стабильность принципов • Динамичность законов • Вариативность (свобода) решений
7	Приоритеты программы развития nanoиндустрии до 2015 г.	<ul style="list-style-type: none"> • Введение продукции nanoиндустрии в хозяйственно-экономический оборот государства • Коммерциализация продукции с доминирующей интеллектуальной составляющей • Позиционирование на международном рынке товаров и услуг в области nanoпродукции
8	Продукция nanoиндустрии	<ul style="list-style-type: none"> • Интеллектуальность (рынок патентов и "ноу-хау") • Новизна • Конкурентоспособность • Безопасность
9	Приоритеты рынка nanoиндустрии	<ul style="list-style-type: none"> • Интеллектуальность • Масштабность (много и доступно) — социально ориентированные продукция и услуги • Уникальность — специальная продукция

мационно-образовательного ресурса, интегрируемого в рамках создаваемой инновационной образовательной площадки;

- обеспечение сетевой интеграции и селекции кадрового потенциала вузов для участия в подготовке профессионально ориентированных стандартов и центров сертификации квалификаций в области наноиндустрии.

Целью данной работы является представление созданной по заказу Минобрнауки РФ базы данных научно-технической продукции информационных и образовательных услуг для обеспечения интеграции НОЦ образовательного сегмента ННС.

Базовые критерии эффективности сетевой интеграции НОЦ ННС

Эффективность работы сети определяется ее инфраструктурным потенциалом, гибкостью и адаптируемостью, а также организационно-информационным обеспечением реализации сетевых алгоритмов в целях достижения мобильности, экономичности, системности, инновационности [1]. Инновационная сеть должна ориентироваться на обеспечение эффективной системы поиска, отбора и коммерциализации объектов интеллектуальной собственности, формирование научно-технического и кадрового заделов для оперативного нара-

Таблица 2

Объекты оптимизации сетевого взаимодействия, созданные на базе НОЦ в рамках первого этапа Федеральной целевой программы (ФЦП) "Развитие инфраструктуры наноиндустрии в РФ"

№	Объект	Состав и описание объекта	Результат ФЦП, особенности
1	Аппаратный базис	Аналитическое и технологическое оборудование	Широкая номенклатура. Недостаточная экономическая эффективность использования
2	Методический базис	Методики, технологические маршруты, "ноу-хау"	Ограниченное развитие. Недостаточная правовая защита
3	Программно-алгоритмический базис	Программные средства моделирования и проектирования	Широкая номенклатура. Организационно-правовые вопросы доступности
4	Информационный базис	Базы данных и знаний, информационное обеспечение средств удаленного доступа	Значительные информационные ресурсы. Организационно-сетевые вопросы доступности
5	Система стандартизации, сертификации и метрологического обеспечения	Терминологическая база, стандарты и предстандарты	Реализуется план стандартизации. Вопросы гармонизации с международными стандартами
6	Образовательный базис	Учебно-методические комплексы, дистанционное обучение, маршрутное обучение	Введены ФГОС III поколения. Ограниченное использование учебно-методического обеспечения по направлениям ННС

Примечание: ФГОС — Федеральные государственные образовательные стандарты

Таблица 3

Организационные формы НОЦ в соответствии с приоритетными направлениями их деятельности

№	Организационная форма	Назначение	Современное состояние
1	Центры коллективного пользования	Обеспечение научного и образовательного процесса в режимах непосредственного и удаленного доступа	Недостаточная эффективность и слабое сетевое взаимодействие
2	Дизайн-центры	Обеспечение стадии моделирования и проектирования процессов и изделий в режимах непосредственного и удаленного доступа	Развиты, но не интегрированы в сеть
3	Центры контрактного производства	Обеспечение стадии прототипирования и мелкосерийного производства изделий в режиме удаленного доступа	Стадия развития
4	Центры превосходства	Интеграция (непосредственная и дистанционная) интеллектуального потенциала в области непредвиденных технологий	Проекты
5	Центры мобильной профессиональной переподготовки кадров	Экспресс-обеспечение предприятий кадрами в рамках переподготовки и повышения квалификации по профессионально-ориентированным образовательным программам	Накоплен опыт в реализации профессионально-ориентированных образовательных программ
6	Региональные образовательные центры нанотехнологической культуры	Профессиональная ориентация и формирование элементов нанотехнологической культуры у старшеклассников	На стадии формирования

щивания производства наукоемкой продукции. Для нее должны быть характерны:

- гибкая (в том числе — виртуальная) интеграция оборудования, знаний и кадрового потенциала;
- быстрая адаптация инфраструктуры при минимизации временных затрат;
- ее окупаемость с возможностью модернизации инфраструктуры и приобретения новых компетенций;
- новизна, конкурентоспособность и правовая защищенность интеллектуальной и материальной продукции.

Состояние объектов оптимизации сетевого взаимодействия, созданных на базе НОЦ в рамках ФЦП "Развитие инфраструктуры наноиндустрии в РФ", можно обобщить в виде табл. 2, при этом формируемые НОЦ приняли различные организационные формы, определяющие целенаправленность их функционирования (табл. 3).

Формирование базы данных НОЦ образовательного сегмента ННС

Особенности интеграции НОЦ в рамках ННС и повышение инфраструктурного, научно-образовательного и кадрового потенциалов отражены в формируемой базе данных научно-технической продукции, информационных и образовательных услуг. Инициатива Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ", как одного из координаторов образовательного сегмента ННС по формированию информационно-поисковой системы и базы данных для сетевой интеграции НОЦ, была поддержана в 2013 г. Министерством науки и образования РФ.

Ниже представлена структура и составные элементы вышеуказанной базы данных.

• Статус НОЦ:

- *Юридическое лицо.*
- *Структурное подразделение в составе организации (вуза).*
- *Иное.*

• Город, регион, федеральный округ.

• **ФИО руководителя НОЦ**, должность, ученые степень и звание, телефон, e-mail.

• **Организация учредитель:** ФИО руководителя, ученые степень и звание, телефон, e-mail.

• **ФИО контактного лица**, телефон, факс, e-mail.

• Базовые направления деятельности НОЦ в рамках ННС:

- *Наноэлектроника.*
- *Наноинженерия.*
- *Наноматериалы и высокочистые вещества.*
- *Наноматериалы для энергетики.*
- *Наноматериалы для космической техники.*
- *Нанобиотехнологии.*

— *Конструкционные наноматериалы.*

— *Композитные наноматериалы.*

— *Нанотехнологии для систем безопасности.*

• Реализуемые на базе НОЦ приоритетные направления развития науки, технологий и техники:

— *Безопасность и противодействие терроризму.*

— *Индустрия наносистем.*

— *Информационно-телекоммуникационные системы.*

— *Науки о жизни.*

— *Перспективные виды вооружения, военной и специальной техники.*

— *Рациональное природопользование.*

— *Транспортные и космические системы.*

— *Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика.*

• Реализуемые критические технологии РФ:

— *Базовые и критические военные и промышленные технологии для создания перспективных видов вооружения, военной и специальной техники.*

— *Базовые технологии силовой электротехники.*

— *Биокаталитические, биосинтетические и биосенсорные технологии.*

— *Биомедицинские и ветеринарные технологии.*

— *Геномные, протеомные и постгеномные технологии.*

— *Клеточные технологии.*

— *Компьютерное моделирование наноматериалов, наноустройств и нанотехнологий.*

— *Нано-, био-, информационные, когнитивные технологии.*

— *Технологии атомной энергетики, ядерного топливного цикла, безопасного обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом.*

— *Технологии биоинженерии.*

— *Технологии диагностики наноматериалов и наноустройств.*

— *Технологии доступа к широкополосным мультимедийным услугам.*

— *Технологии информационных, управляющих, навигационных систем.*

— *Технологии наноустройств и микросистемной техники.*

— *Технологии новых и возобновляемых источников энергии, включая водородную энергетику.*

— *Технологии получения и обработки конструкционных наноматериалов.*

— *Технологии получения и обработки функциональных наноматериалов.*

— *Технологии и программное обеспечение распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем.*

— Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения.

— Технологии поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи.

— Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

— Технологии снижения потерь от социально значимых заболеваний.

— Технологии создания высокоскоростных транспортных средств и интеллектуальных систем управления новыми видами транспорта.

— Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения.

— Технологии создания электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств.

— Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии.

— Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе.

● **Базовая профессионально-тематическая ориентация НОЦ:**

— Разработка и синтез наноматериалов.

— Процессы нанотехнологии.

— Методы нанодиагностики.

— Моделирование и проектирование наносистем.

— Нанoeлектроника.

— Нано- и микросистемная техника.

— Фотоника.

— Нанохимические компоненты.

— Нанoeнергетика.

— Нанобиотехнология.

— Нанобиомедицина.

— Метрологическое обеспечение нанопроизводства.

— Испытания и безопасность нанопроизводства.

● **Организационные формы функционирования НОЦ:**

— Центры: превосходства, прототипирования, контрактного производства, коллективного пользования, метрологического обеспечения, компетенций, информационно-аналитические, базовых образовательных технологий, повышения квалификации и переподготовки кадров.

● **Функциональная ориентация НОЦ:**

— Фундаментальные и поисковые исследования.

— Прикладные работы.

— Инновации, трансфер технологий и методов.

— Прототипирование, контрактное и мелкосерийное производство.

— Коллективное использование уникальным оборудованием, в том числе дистанционный доступ.

— Информационно-аналитическое обеспечение процессов.

— Лабораторно-методическое обеспечение и подготовка кадров в рамках основного образовательного процесса.

— Повышение квалификации, переподготовка кадров.

● **Вид выполняемых работ:**

— Научно-исследовательские работы.

— Опытно-конструкторские работы.

— Опытно-технологические работы.

— Контрольно-диагностическое и/или метрологическое обеспечение.

— Информационно-аналитическое обеспечение.

— Мелкосерийное производство.

— Образовательный процесс.

● **Основные источники финансирования:**

— Федеральные целевые программы.

— Российские гранты.

— Ведомственные программы.

— Хоздоговорная деятельность.

— Международные контракты.

— Международные гранты.

● **Вид наукоемкой продукции в рамках сетевого сотрудничества:**

— Производственные технологии и маршруты.

— Технологические операции.

— Аналитико-диагностические методы.

— Программные средства.

— Информационно-аналитические средства (базы данных).

— Образовательные технологии.

● **Три приоритетных результата (из выборки) научно-технической и образовательной деятельности:**

— Вещество (материал, культура, штамм, препарат).

— Эффект, явление.

— Конструкция.

— Способ.

— Метод.

— Модель (макет).

— Комплекс (система).

— Установка (стенд).

— Прибор (модуль, компонент, блок, устройство, электронная элементная база).

— Образец (эталон).

— Технологическая операция.

— Технологический маршрут.

— Методическое обеспечение.

— Ноу-хау.

— Селекционное достижение.

— Документация (КД, ПД, ТД).

— Алгоритм (инструкция, программа).

— Базы данных.

— Программное или информационное обеспечение.

- **Три приоритетных базовых направления** (из выборки) **создания объектов интеллектуальной собственности:**
 - Изобретение.
 - База данных.
 - Топология интегральной микросхемы.
 - Программа для ЭВМ.
 - Селекционные достижения.
 - Полезная модель.
 - Промышленный образец.
 - Прочее.
- **Реализуемые образовательные программы:**
 - Основные программы.
 - Программы повышения квалификации.
 - Программы переподготовки кадров.
 - Программы профессиональной ориентации школьников (названия направлений дисциплин).
- **Научно-образовательная полиграфическая продукция:**
 - Монография.
 - Справочник.
 - Учебник.
 - Учебное пособие, в том числе с грифом "УМО".
 - Лабораторные практикумы.
 - Статьи в реферируемых, иностранных, прочих изданиях.
 - Тезисы докладов.
 - Учебные фильмы.
- **Виды предоставляемых услуг:**
 - Удаленный доступ.
 - Оборудование и инфраструктура в аренду.
 - Совместные исследования и разработки.
 - Изготовление продукции на заказ.
 - Подготовка/переподготовка кадров.
- **Виды международной кооперации:**
 - Совместные научные исследования и производство продукции.

- *Использование (аренда) зарубежной научно-исследовательской и технологической базы.*
- *Стажировка сотрудников.*
- *Совместные образовательные программы.*
- **Собственная оценка уровня научно-технической деятельности:**
 - *Результат превосходит мировой уровень.*
 - *Соответствует мировому уровню.*
 - *Конкурентоспособен на российском рынке.*
 - *Обеспечение текущих потребностей отраслевого рынка.*
- **Собственная оценка уровня образовательной деятельности:**
 - *Результат превосходит мировой уровень.*
 - *Соответствует мировому уровню.*
 - *Конкурентоспособен на российском рынке.*
 - *Обеспечение текущих потребностей отраслевого рынка.*

Основные характеристики и фотографии специального оборудования

Структура базы данных основана на разделении хранимой информации по основным признакам (рис. 1):

- контактная информация;
- информация общего типа (из заранее определенных списков);
- индивидуальная информация (статьи, патенты, продукция).

Система управления встроенной базой данных реализована с использованием свободно распространяемой библиотеки SQLite. Графический интерфейс пользователя поисковой системы устроен как браузер с определенным набором web-страниц. Браузер реализован на языке программирования высокого уровня C++. Для создания web-страниц использовались HTML и JavaScript.

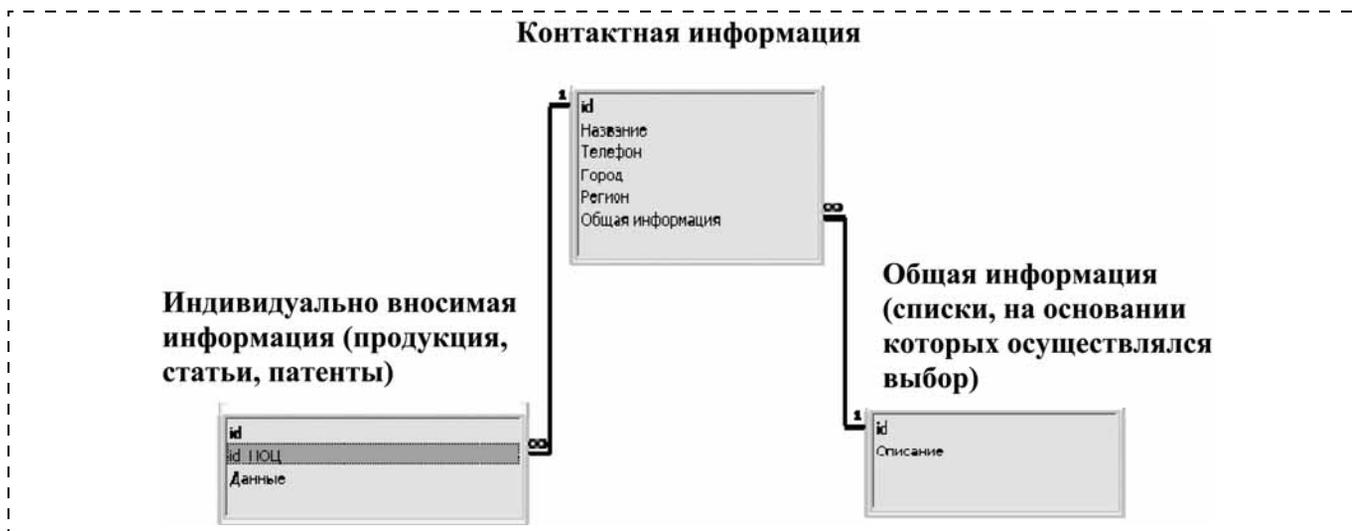


Рис. 1. Структура базы данных НОЦ ННС



Рис. 2. Представление результатов поиска — организации

Поисковый запрос, введенный пользователем, передается из web-интерфейса по средствам JavaScript в основную программу-браузер, далее транслируется в понятный для базы данных SQL-код. На основе полученного ответа формируется и выдается пользователю новая web-страница с отображением запрашиваемых данных.

Поиск осуществляется по любым ключевым словам. Если запросу удовлетворяют несколько элементов, пользователь получит краткую информацию по каждому из них с возможностью сор-

тировки и ранжирования по значимости. Возможен также поиск только по заданным полям.

Основными полями для поиска в рамках вышеуказанных ключевых слов являются:

- Направления в рамках ННС.
- Профессионально-тематическая ориентация.
- Организационные формы функционирования.
- Функциональная ориентация.
- Предлагаемая продукция (в рамках сетевого сотрудничества).
- Результаты деятельности.

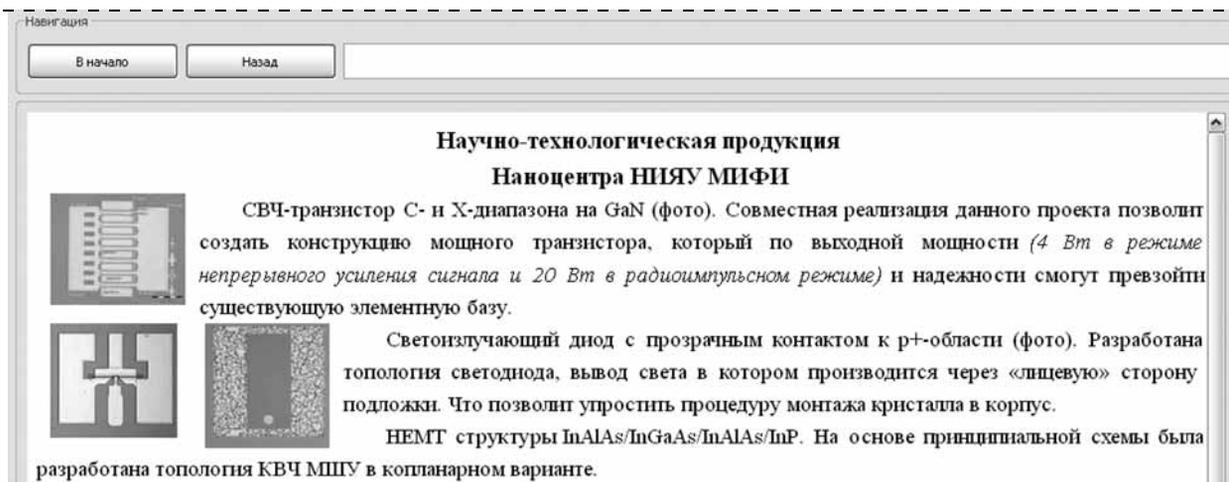


Рис. 3. Представление результата поиска — продукция (фрагмент)

— Предоставляемые услуги.

Представим пример поиска по нескольким ключевым словам в рамках совокупности полей:

● **Направления в рамках ННС:**

Наноинженерия.

● **Профессионально-тематическая ориентация:**

Нано- и микросистемная техника.

● **Организационные формы функционирования:**

Центр прототипирования.

● **Функциональная ориентация:**

Прикладные исследования.

● **Предлагаемая продукция (в рамках сетевого сотрудничества):**

Производственные технологии и маршруты.

Результаты поиска иллюстрируют рис. 2 и 3.

Заключение

Одним из базовых мероприятий формирования отечественной наноиндустрии — создание ННС (постановление Правительства РФ от 23 апреля 2010 года № 282). В состав образовательного сегмента ННС входят более 39 научно-образовательных центров (НОЦ) на базе вузов страны. В связи с завершением первого этапа программы развития наноиндустрии в России, следует отметить:

- значительное обновление парка лабораторно-экспериментального оборудования;
- формирование базовых элементов системы дистанционного доступа к дорогостоящему оборудованию для его эксплуатации в режиме коллективного пользования [2];
- подготовку и введение ряда федеральных государственных образовательных стандартов по базовым направлениям наноиндустрии [3];

Таблица 4

Базовые критерии оценки эффективности функционирования НОЦ ННС

№	Критерии	Достижимый результат
1	Системность	Формы гибкой (в том числе виртуальной) интеграции оборудования, знаний и кадрового потенциала
2	Экономичность	Механизмы окупаемости инфраструктуры, минимизация затрат в процессе эксплуатации
3	Мобильность	Алгоритмы быстрой адаптации инфраструктуры при решении разнообразных задач с достижением результата за минимальное время
4	Инновационность	Система отбора знаний и их интеграция с достижением новизны и конкурентоспособности интеллектуальной и материальной продукции

- решение задачи учебно-методического обеспечения подготовки кадров в рамках проекта формирования учебно-методических комплексов для магистров и бакалавров по основным направлениям ННС [4];
- повышение квалификации и переподготовки профессорско-преподавательского состава вузов и научно-инженерного персонала научных и производственных организаций [5];
- организационно-правовое упорядочение подготовки профессиональных стандартов, ориентированных на кадровое обеспечение производства нанопродукции [6].

Введение в действие информационно-поисковой системы для сетевой интеграции НОЦ образовательного сегмента позволит обеспечить системность работы образовательного сегмента ННС, направленной на формирование базовых элементов национальной инновационной системы, ориентированной на подготовку кадров, оказание услуг и производство наукоемкой нанопродукции с высоким уровнем интеллектуально добавленной стоимости. Наиболее значимые критерии оценки эффективности функционирования системы сетевого взаимодействия НОЦ ННС представлены в табл. 4.

Работа выполнена в рамках Программы стратегического развития университета СПбГЭТУ "ЛЭТИ": "Развитие междисциплинарных исследований и инструментально-технологической базы как основа непрерывного инженерного образования по приоритетным направлениям российской экономики" на 2012—2016 годы.

Список литературы

1. Лучинин В. В. Сетевое взаимодействие НОЦ "Нанотехнологии" вузов России // Наноиндустрия. 2011. № 5. С. 76—82.
2. Иванов А. С., Кузнецова М. А., Лучинин В. В., Панин А. В., Перепеловский В. В., Шкловер В. Я. Дистанционный доступ к многофункциональному аналитико-технологическому комплексу // Наноиндустрия. 2011. № 4. С. 56—61.
3. Корляков А. В., Лазарева Н. П., Марасина Л. А. Образовательные стандарты третьего поколения с приставкой "нано" // Сб. трудов "Физика и технология микро- и наносистем". СПб.: Русская коллекция, 2011. С. 161—177.
4. Лучинин В. В. Инженерная деятельность в области нанотехнологий // История инженерной деятельности и философия инженерной реальности / Под ред. В. П. Котенко. СПб: Технолит, 2010. С. 390—416.
5. Иванов А. С., Корляков А. В., Лучинин В. В., Тайров Ю. М. Профессионально ориентированное кадровое обеспечение наноиндустрии // Наноиндустрия. 2009. № 4. С. 76—81.
6. Корляков А. В., Лучинин В. В., Марасина Л. А. От образовательного стандарта к профессиональному // Наноиндустрия. 2013. № 3. С. 56—66.

А. В. Корляков, д-р техн. наук, директор НОЦ "Нанотехнологии", e-mail: akorl@yandex.ru,
В. В. Лучинин, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,
Л. А. Марасина, канд. техн. наук, доц.,
 Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ В ИНТЕРЕСАХ НАНОИНДУСТРИИ

Поступила в редакцию 01.10.2013

Представлены базовые положения, определяющие формирование и введение в действие в России профессиональных стандартов. Определены особенности профессиональных стандартов для сферы наноиндустрии.

Ключевые слова: профессиональный стандарт, наноиндустрия, компетенции, оценка и сертификация квалификации

Введение

Используемые в настоящее время в системе управления трудовыми ресурсами квалификационные справочники постепенно устаревают, описание профессий в развивающихся областях деятельности (например, для наноиндустрии [1, 2]) не соответствует действительности, а новые профессии в них отсутствуют. Этим обусловлена потребность в изменении действующей системы квалификации, в замене Единого тарифно-квалификационного справочника (ЕТКС) работ и профессий рабочих, Единого квалификационного справочника (ЕКС) должностей руководителей, специалистов и служащих профессиональными стандартами (ПС), обсуждаемыми сейчас профессиональным, образовательным и академическим сообществами.

Целью данной работы является изложение базовых положений и особенностей, формирование профессиональных стандартов в интересах наноиндустрии.

Профессиональный стандарт — базовый компонент инновационной экономики

История появления ПС хорошо известна. В конце 80-х годов прошлого века в США и странах Европы был осознан кризис профессионального и университетского образования, которые отставали от потребностей бизнеса, выпускники не были готовы к быстрому включению в трудовую деятельность. Задача состояла в том, чтобы сформулировать требования работодателей к работникам, по-

казать тем, кто хотел начать профессиональную деятельность, что они должны освоить, чтобы сдать квалификационный экзамен в профессиональном сообществе. Такая практика широко использовалась в США, Японии, ряде стран Европы для таких профессий, как архитектор, юрист, нотариус. Было принято решение экстраполировать этот подход и на другие виды деятельности. В течение последних 20 лет более чем в 100 странах идет работа по созданию и внедрению национальных квалификационных систем, структур и стандартов [3, 4].

В результате поиска оптимальных параметров для описания уровней и содержания квалификаций установлено, что разграничение уровней следует осуществлять по таким параметрам, как характер знаний, умений и широких компетенций, под которыми понимается уровень ответственности, самостоятельности и сложности деятельности. Естественно, выделение этих параметров носит условный характер. Поскольку отношения между квалификациями устанавливают связи между такими меняющимися объектами, как результаты обучения, деятельность, необходимая предприятиям, профессиональные сертификаты/дипломы, общее и профессиональное образование, сами существующие рамки квалификаций находятся в постоянной динамике. Более того, взаимоотношения между вышеуказанными элементами объединяют и систематизируют существующие квалификации и соответствующие им дипломы/сертификаты, а также стимулируют разработку новых квалификаций.

Центральное понятие рамки квалификаций — результаты обучения как достижения обучающихся по освоению знаний, умений, отношений, способов действия и моделей поведения, необходимых для трудовой деятельности, которые устанавливаются в сфере труда в форме ПС. В международной практике разработка таких стандартов как основы образовательных стандартов (ОС) и программ чаще всего регулируется государством и осуществляется субъектами сферы труда.

Принципы формирования, назначение и структура профессиональных стандартов

ПС — это многофункциональный нормативный документ, систематизирующий функции работников и требования к необходимым компетенциям. Он — основной элемент создаваемой Национальной системы квалификаций Российской Федерации (НСК РФ) — комплекса документов, обеспечивающих взаимосвязь труда и профессионального образования в целях повышения качества подготовки работников и их конкурентоспособности на российском и международном рынке. НСК РФ призвана обеспечить признания результатов обучения независимо от его места, способствовать переходу от рынка дипломов к рынку квалификаций.

Основа НСК РФ — Национальная рамка квалификаций (НРК) — каталог квалификаций, ранжированных по уровням, с указанием необходимых параметров образования и обучения. Она позволяет измерять результаты обучения и устанавливать соотношение дипломов, свидетельств/сертификатов об образовании и обучении.

В разных странах ПС различаются по структуре и содержанию. В одних стандартах описаны только трудовые функции и входящие в них в рамках конкретной профессии действия, другие включают перечень требуемых компетенций или дополнительные их описания. В некоторых странах ПС содержат информацию об организационном контексте, в котором осуществляется трудовая деятельность. В отдельных стандартах указывается оборудование и инструменты, которыми должен уметь пользоваться работник. Эти отличия обусловлены разным пониманием компетенции и принятым макетом ПС.

Анализ зарубежного опыта показывает, что развитые страны ведут целенаправленную и последовательную работу по формированию системы обеспечения устойчивого социально-экономического развития, в основе которой лежат партнерские взаимовыгодные отношения между различными сферами общества. Создание конструктивных механизмов взаимодействия труда и образования, повышающих эффективность и снижающих издержки при подготовке и использовании кадров, является одним из элементов такой системы.

Использование ПС, по мнению зарубежных экспертов, вносит весомый вклад в развитие и функционирование сферы труда и образования.

Работодателям ПС позволяет:

- формировать и поддерживать высокий профессиональный уровень рабочей силы, соответствующий потребностям производства, повышать производительность, улучшать качество производства и услуг, усиливать конкурентоспособность;
- проводить проверки, аттестацию и сертификацию сотрудников;
- снижать затраты на подбор кадров и внутрифирменное профессиональное обучение, повышать знания, умения и компетенцию персонала.

Работникам использование ПС дает возможность:

- определять умения и знания для конкретной профессии;
- оценивать потребности и возможности профессиональной подготовки;
- определять и реализовывать четкие пути карьерного роста;
- получать рекомендации для прохождения сертификации;
- повышать мобильность на рынке труда.

Образовательным учреждениям ПС позволяет:

- определять базовые ориентиры для формирования образовательных программ;

- формировать эффективные методы оценки результатов профессионального обучения (сертификации выпускников);
- учитывать основные требования ПС при формировании федеральных государственных образовательных стандартов.

Формирование культуры разработки и применения профессиональных стандартов в России

Основные принципы формирования ПС определены следующими документами:

- Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2012 г. № 597.
- ФЗ № 236 от 3.12.2012 "О внесении изменений в Трудовой кодекс Российской Федерации и статью 1 ФЗ "О техническом регулировании".
- Постановление правительства РФ от 22 января 2013 г. № 23 "О Правилах разработки, утверждения и применения профессиональных стандартов".
- Приказ Минтруда России от 12 апреля 2013 г. № 148н "Об утверждении уровней квалификации в целях подготовки профессиональных стандартов".
- "Макет профессионального стандарта", утвержден приказом Минтруда России от 12 апреля 2013 г. № 147н, определяющий состав и структуру документа.
- "Методические рекомендации по разработке профессионального стандарта" (утверждены приказом Минтруда России от 29 апреля 2013 г. № 170н).

В конце 2012 г. вышло Распоряжение Правительства РФ № 2204-р от 29 ноября, касающееся подготовки проекта Постановления, предусматривающего утверждение порядка разработки, утверждения и применения ПС. Ответственными исполнителями назначены Минтруд, Минэкономразвития, Минобрнауки, Минздрав и Минфин России с участием общероссийских объединений работодателей, "Агентства стратегических инициатив по продвижению новых проектов". Таким образом, разработка, утверждение и использование ПС будет контролироваться государством.

В соответствии с последним Постановлением Правительства РФ от 22 января 2013 г. № 23 Министрство труда и социальной защиты Российской Федерации координирует разработку профессиональных стандартов:

- создает экспертный совет по профессиональным стандартам;
- обеспечивает деятельность экспертного совета;
- принимает для рассмотрения проекты ПС от разработчиков;
- организует общественное обсуждение проектов ПС;

- принимает решение об утверждении (отклонении или доработке) ПС на основании решения экспертного совета;
- устанавливает и ведет реестр ПС.

Проекты профессиональных стандартов могут разрабатываться объединениями работодателей, работодателями, профессиональными сообществами, саморегулируемыми организациями и иными некоммерческими организациями с участием образовательных организаций профессионального образования и других заинтересованных организаций.

В соответствии с "Макетом профессионального стандарта" ПС должен содержать следующую информацию:

- в рамках вида экономической деятельности (ВЭД) общие сведения о данном виде трудовой деятельности;
- описание трудовых функций, входящих в профессиональный стандарт (функциональная карта вида профессиональной деятельности);
- примеры наименования должностей работников, выполняющих данные обобщенные трудовые функции;
- требования к профессиональному образованию и опыту работы, наличие особых условий допуска;
- перечень основных трудовых действий, обеспечивающих выполнение трудовой функции;
- умения и знания, обеспечивающие выполнение всех трудовых действий;
- сведения об организациях-разработчиках профессионального стандарта.

Разработка проектов ПС *за счет средств федерального бюджета* осуществляется в соответствии с перечнем групп занятий (профессий), утверждаемым Министерством труда и социальной защиты Российской Федерации с учетом приоритетных направлений развития экономики и предложений экспертного совета (нанотехнология не вошла в данный перечень).

Особенности ПС для nanoиндустрии

Главная особенность ПС для сферы nanoиндустрии — это ее междисциплинарный характер направления, поэтому сложно выделить область деятельности, связанную конкретно и только с нанотехнологией, из более общей сферы профессиональной деятельности. Отсутствие четкой классификации инженерных профессий вызывает трудности формулировки ПС для nanoиндустрии.

Фонд инфраструктурных и образовательных программ (ФИОП) Роснано выступил в качестве активного разработчика ПС в области nanoиндустрии (имеет план разработки ПС до 2015 г.).

В классификации ФИОП (Роснано) выделены укрупненные направления:

- Наноматериалы.
- Нанoeлектроника и нанoфотоника.
- Нанобиотехнологии и наномедицина.
- Методы и инструменты исследования и сертификации наноматериалов и нанoустройств.
- Технологии и специальное оборудование для опытного и промышленного производства наноматериалов и нанoустройств.

К настоящему времени ФИОП разработано более 10 ПС в области nanoиндустрии. Основные разработки ПС в этой области представлены лишь наноматериалами, нанoeлектроникой и методами исследования. Разрабатываются ПС в области нанoфотоники.

К настоящему времени по инициативе ФИОП разработаны проекты следующих профессиональных стандартов в области nanoиндустрии:

1. Производство наноразмерных полупроводниковых приборов и интегральных схем с использованием нанотехнологий (2012 г.).
2. Метрологическое обеспечение разработки, производства и испытаний нанотехнологической продукции (2012 г.).
3. Инженер в области проектирования и сопровождения интегральных схем и систем на кристалле.
4. Инженер по верификации и тестированию наноразмерных интегральных схем.
5. Специалист по проектному управлению в области разработки и постановки производства полупроводниковых приборов и систем с использованием нанотехнологий.
6. Инженер-конструктор в области производства наногетероструктурных СВЧ монолитных интегральных схем.
7. Инженер-технолог в области производства наногетероструктурных СВЧ монолитных интегральных схем.
8. Специалист в области технологического обеспечения полного цикла производства объемных нанокерамик, соединений, композитов на их основе и изделий из них.
9. Специалист в области материаловедческого обеспечения технологического цикла производства объемных нанокерамик, соединений, композитов на их основе и изделий из них.
10. Специалист в области технологического обеспечения полного цикла производства объемных нанометаллов, сплавов, композитов на их основе и изделий из них.
11. Специалист в области материаловедческого обеспечения технологического цикла производства объемных нанометаллов, сплавов, композитов на их основе и изделий из них.

12. Специалист в области технологического обеспечения полного цикла производства изделий с наноструктурированными керамическими покрытиями.

Особенности разработанных ПС в связи с профессиональной подготовкой в области наноиндустрии:

- области деятельности в ПС не согласуются с существующими направлениями профессиональной подготовки;
- выделенные трудовые функции (ТФ) в ПС слабо (или редко) пересекаются с нанотехнологией;
- требования к уровню образования (знания, умения) часто сужены до уровня отдельной, узко ориентированной магистерской программы;
- очевидны пересечения областей деятельности (особенно в области технологии), что связано с чрезмерно узкой направленностью ПС и типовыми трудовыми функциями и требованиями к уровню образования;
- не выделены компетенции как требования к уровню квалификации (макет Минтруда можно трактовать как способность выполнять трудовые функции, что затрудняет согласование с образовательными стандартами);
- конкретная производственная направленность требований ПС.

Наряду с перечисленными особенностями ПС следует отметить их возможное влияние на формирование образовательных стандартов и программ:

- ряд разработанных ПС однозначно вписываются в траекторию профессиональной подготовки в рамках конкретных образовательных программ и стандартов и могут стать основой для производственно-ориентированной магистерской программы или бакалаврского профиля (специализации);
- разработанные ПС в области наноиндустрии могут служить основой для формирования магистерских программ по целям, направлениям и соответствующим программам повышения квалификации.

Для разработки ПС в интересах наноиндустрии, согласованных со сложившимися направлениями научно-производственной и образовательной деятельности, необходимо:

- составить обоснованный перечень областей профессиональной деятельности в сфере наноиндустрии, характеризующийся полнотой использования профессиональных компетенций, обособленных по продукту и способам его производства, согласованный с существующими направлениями и профилями образовательных стандартов (ОС);
- осуществить анализ востребованности направлений профессиональной подготовки и стандартизации требований к специалистам.

Представляется, что к первоочередным задачам при разработке ПС следует отнести необходимость

формирования единого общероссийского классификатора профессий на основе принципов, позволяющих увязать требования работодателей к работникам в разных областях деятельности с укрупненными направлениями подготовки специалистов и уровнями квалификации.

Центры сертификации квалификаций

Основными нормативными документами по формированию независимой системы оценки и сертификации квалификаций являются:

- Федеральный закон "О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в целях предоставления объединениям работодателей права участвовать в разработке и реализации государственной политики в области профессионального образования" от 1 декабря. 2007 г. № 307-ФЗ.
- Постановление Правительства Российской Федерации от 24 декабря 2008 г. № 1015 "Об утверждении Правил участия объединений работодателей в разработке и реализации государственной политики в области профессионального образования".
- Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 г., утвержденная Распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 ноября 2008 г. № 1662-р.
- Основные направления деятельности Правительства Российской Федерации на период до 2012 г., утвержденные Распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 ноября 2008 г. № 1663-р.
- Положение о формировании системы независимой оценки качества профессионального образования, утвержденное Министром образования и науки Российской Федерации и Президентом Российского союза промышленников и предпринимателей (РСПП) от 31 июля 2009 г. № АФ-318/02.
- Положение об оценке и сертификации квалификации выпускников образовательных учреждений профессионального образования, других категорий граждан, прошедших профессиональное обучение в различных формах, утвержденное Министром образования и науки Российской Федерации и Президентом РСПП от 31 июля 2009 г. № АФ-317/03.

Структура системы оценки и сертификации квалификаций включает:

- базовую организацию АНО "НАРК" РСПП (Национальное агентство развития квалификаций Российского союза промышленников и предпринимателей) [5];

- *экспертно-методические центры* в областях (видах) профессиональной деятельности (разработка методического обеспечения, подбор и обучение экспертов), формируемые на конкурсной основе;
- *центры оценки и сертификации квалификаций* (ЦОСК) — организации, формируемые по региональному принципу, уполномоченные осуществлять оценку и сертификацию квалификаций и выдавать квалификационные сертификаты.

Характеризуя современное состояние в области формирования ПС и сети Центров сертификации для наноиндустрии следует отметить:

- центры оценки и сертификации должны быть приближены к реальным производствам нанопроизводства (регионально);
- экспертно-методические центры в области наноиндустрии должны быть представлены ведущими научными (научно-методическими) центрами;
- научно-образовательные центры как потенциальные разработчики ПС, владеющие научно-производственными и методическими вопросами, могут выступить в качестве экспертно-методических центров в области наноиндустрии, а также базой для формирования центров оценки и сертификации по соответствующим направлениям;
- головные организации ННС и НОЦ как работодатели выпускников по направлениям, связанным с нанотехнологиями, могут и должны выступить в качестве разработчиков ПС по направлениям наноиндустрии, решая задачи гармонизации ПС в научно-производственной сфере с действующими федеральными государственными образовательными стандартами (ФГОС).

Выводы

- ♦ В настоящее время сформирована основная правовая и методическая база для разработки ПС и создания Центров оценки и сертификации. Основным координатором разработки и утверждения ПС является Минтруда РФ.
- ♦ Разработка ПС для наноиндустрии не поддерживается бюджетным финансированием и инициативно развивается ФИОП (Роснано) с привлечением вузов и промышленных предприятий смежных отраслей.

- ♦ Разработанные ФИОП Роснано ПС для наноиндустрии не гармонизированы с действующими ФГОС, но могут быть учтены в образовательном процессе в рамках магистерских программ и повышения квалификации.
- ♦ Целесообразно использовать потенциал головных предприятий ННС и НОЦ для стимулирования разработки ПС по направлениям их деятельности в сфере наноиндустрии.
- ♦ Целесообразно формировать группу региональных экспертно-методических центров, а также центров оценки и сертификации квалификаций по направлению наноиндустрии на базе головных организаций ННС и НОЦ "Нанотехнологии" ведущих вузов РФ.

С учетом инновационного потенциала наноиндустрии для обеспечения конкурентоспособности и технологической безопасности России необходимы четкие организационные, институциональные и правовые механизмы сотрудничества между профессиональным образованием и сферой труда, придающие такому сотрудничеству системный и устойчивый характер и конкретизирующие существующие соглашения об участии и роли работодателей в формировании профессионально ориентированного образования.

Работа выполнена в рамках Программы стратегического развития университета (СПбГЭТУ "ЛЭТИ") "Развитие междисциплинарных исследований и инструментально-технологической базы как основы непрерывного инженерного образования по приоритетным направлениям российской экономики" на 2012-2016 годы.

Список литературы

1. Лучинин В. В. Наноинженерия — основа шестого технологического уклада // Мир физики и техники: электроника, материалы, структуры / Под ред. Дж. Дэвиса, М. Томпсона: Пер. с англ. А. Е. Грахова под ред. П. П. Мальцева. М.: Техносфера, 2011. С. 329—354.
2. Лучинин В. В. Инженерная деятельность в области нанотехнологий // История инженерной деятельности и философия инженерной реальности / Под ред. В. П. Котенко. СПб: Технолит, 2010. С. 390—416.
3. Коулз М., Олейникова О. Н., Муравьева А. А. Профессиональные стандарты как основа подготовки конкурентоспособных работников. М.: Альфа-М, 2007.
4. Прянишникова О. Д., Лейбович А. Н. Профессиональные стандарты: краткий обзор зарубежного опыта // Промышленник России. Март 2008. С. 37—41.
5. URL: <http://www.nark-rspp.ru>.

УДК 621.3.049.7.002

Т. М. Зимина, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.,
А. В. Соловьев, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
В. В. Лучинин, д-р техн. наук, проф.,
директор ЦМИД,
Е. Н. Мурагова, ассистент,
Центр микротехнологии и диагностики,
Санкт-Петербургский электротехнический
университет "ЛЭТИ" им В. И. Ульянова (Ленина)
(СПбГЭТУ), e-mail: cmid_leti@mail.ru,
Л. А. Краева, д-р мед. наук, вед. науч. сотр.,
Г. Н. Хамдулаева, науч. сотр.,
Институт эпидемиологии и микробиологии
им. Пастера, г. Санкт-Петербург,
e-mail: tsenevapasteur@yandex.ru

ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ГИБРИДНЫХ МИНИАТЮРНЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ КОЛОНИЙ МИКРОБНЫХ КЛЕТОК НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Поступила в редакцию 04.10.2013

Обсуждаются результаты расчетов, физико-технологических исследований и конструирования лабораторий на чипе и портативного устройства для работы с лабораториями на чипе для микробиологического анализа. Представлены примеры макетной реализации такого устройства. Устройство может быть использовано при исследовании микробиологических клинических проб, особенно при микробиологической экспресс-диагностике, включая определение чувствительности бактерий к антибиотикам, в лабораторных и полевых условиях, и в соответствующих телеметрических системах. Задачей устройства является снижение времени выращивания колоний микробных клеток и автоматизация процессов подачи питательного раствора и процессов отделения и переноса выросших колоний, возможность интегрирования в миниатюрные переносные приборы и использования в лабораториях на чипе.

Ключевые слова: лаборатория на чипе, анодный оксид алюминия, бионанотехнология, гетерогенное интегрирование, микробиологический анализ, мобильные диагностические приборы

Ведение

Технологии лабораторий на чипе позволяют решать сложные актуальные аналитические проблемы современного общества [1—4]. Так, микробио-

логическая экспресс-диагностика, включая определение чувствительности бактерий к антибиотикам, становится актуальной проблемой, в связи с ростом числа видов и распространенности бактериальных инфекций [5]. Успешная борьба с возникновением и распространением новых устойчивых штаммов патогенных бактерий определяется оперативностью установления их вида и выбора эффективной антибактериальной терапии. Современные методы предлагают время анализа 2—7 суток. Такое время анализа не позволяет начать лечение своевременно, что приводит к хронизации, а иногда и гибели пациентов. Решение данной проблемы на основе гибридных технологий микроэлектроники и принципов лаборатории на чипе в составе портативных аналитико-диагностических систем позволяет ускорить процесс анализа в 10 раз и довести его до 6—8 ч. Портативные системы микробиологического контроля с лабораториями на чипе могут работать в лабораторных и полевых условиях, в соответствующих телеметрических системах. Система должна легко перенастраиваться для работы с различным клиническим материалом и для поиска возбудителей различных групп инфекций: респираторных, желудочно-кишечного тракта, урогенитального тракта, внутрибольничных инфекций, оценки бактериальной обсемененности внешней среды.

Анализ микробиологических проб включает изолирование микробных клеток, накопление биомассы и идентификацию штаммов микробных клеток, определение их количества, а также определение их чувствительности к антибиотикам. Это необходимо для диагностики инфекционных бактериальных заболеваний и правильного назначения антибактериальной терапии. Данная проблема особенно актуальна в связи с ростом заболеваемости населения инфекционными бактериальными заболеваниями и увеличением числа устойчивых ко многим антибиотикам штаммов патогенных бактерий. В 2010 г. число инфекционных и паразитарных заболеваний в России достигло 30 069 567 случаев (по данным Роспотребнадзора [6]). Традиционное микробиологическое исследование является трудоемким и, что более существенно, длительным (2—7 дней). Оно проводится только в специализированных учреждениях и, как правило, для стационарных больных. Известны автоматические и полуавтоматические инструментальные способы микробиологического анализа, реализуемые с помощью

Технико-эксплуатационные характеристики прибора с использованием заявляемого устройства и промышленных аналогов

Характеристика прибора	Техническое решение		
	Способ Кирби—Бауэра	Автоматический прибор VITEK® 2 compact 60 (bioMérieux SA, Франция)	Лаборатория на чипе, в которой могут быть использованы предлагаемые способ и устройство
Состав прибора	Чашки Петри с питательной средой, наборы дисков, импрегнированных антибиотиками, инкубатор микробиологический с охлаждением KB-23 (Binder, Германия), биологический микроскоп	Считывающий прибор, одноразовые карточки для анализа микробных клеток, персональный компьютер	Портативный автоматический считывающий прибор, одноразовые лаборатории на чипе, содержащем модули: пробоподготовки, инкубирования и роста бактерий, идентификации, определения жизнеспособности, микрокомпьютер на борту, модуль навигации, связи
Условия эксплуатации	Специализированная лаборатория (ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2000)	Специализированная лаборатория (ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2000)	Не требуется аккредитация по ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2000, автономные условия
Назначение	Исследование чувствительности микроорганизмов к антибиотикам	Идентификация бактерий и дрожжей. Определение чувствительности микроорганизмов к антибиотикам	Обработка проб, создание условий для роста микроорганизмов, дифференциация и учет количества микроорганизмов, определение чувствительности микроорганизмов к антибиотическим препаратам
Способ считывания информации по идентификации	Отсутствует	Колориметрия	Распознавание образов по трем и более признакам
Способ считывания информации по чувствительности к антибиотикам	Ручной способ измерения про света вокруг дисков, импрегнированных антибиотиками, с помощью линейки	Турбидиметрия	Микротурбидиметрия, положение границы в микроканале: видеокамера, распознавание образов
Габаритные размеры, мм	433 × 516 × 618	590 × 715 × 6725	< 150 × 200 × 200
Масса, кг	44	75	< 3
Мощность, Вт	340	1025	30
Число модулей	3	2 (к одному компьютеру)	1
Уровень автоматизации	Низкий	Высокий	Высокий
Производительность: образцов в сутки	40	60	20
Время 1 анализа, час	48—72	26—34	6—8
Идентификация	Не проводится	До вида	До вида
Число антибиотиков	6 (на одну чашку Петри)	20	20
Достоверность, %	95	90	91
Гибкость в переналадке	Да	Нет	Да
Эксплуатационные расходы на 1 пробу, руб.	1000	1000	350
Цена, млн руб	0,175 (импорт в РФ)	6,0 (импорт в РФ)	0,03

стационарных приборов, однако они также являются длительными и требуют первичного накопления клеток. Сравнительные данные технико-эксплуатационных характеристик прибора с использованием заявляемого устройства и промышленных аналогов представлены в табл. 1.

Наиболее длительной (лимитирующей) стадией проведения культурального микробиологического анализа (наиболее достоверного способа диагностики при инфекционных заболеваниях) является накопление микроорганизмов на питательных средах. Именно эта стадия требует усовершенствования для повышения скорости анализа. Длительность этой стадии определяется необходимостью накопления видимых глазом колоний с явными визуальными характеристиками. После первичного инкубирования и накопления материал вручную отбирают для дальнейших исследований, а именно, идентификации, выделения и накопления чистой культуры патогена, постановки чувствительно-

сти к антибиотикам. Работы в направлении создания экспрессных методов микробиологического анализа ведутся в ряде лабораторий.

Так, известен полуавтоматический метод микробиологического анализа (табл. 1, колонка 2), в котором используют посев биологических образцов в чашки Петри с питательной средой, инкубацию проб в целях накопления колоний микробных клеток, выделение отдельных колоний и проведение исследования их чувствительности к антибиотикам по методу Кирби—Баера. В данном методе многие операции проводятся вручную, что существенно снижает производительность метода. Применяют инкубатор высокой стоимости и габаритных размеров, что делает метод принципиально непригодным для работы в удаленных местах. Требуется большое количество расходных материалов. Метод не пригоден для автоматизации и может выполнять техническую задачу, поставленную в данном изобретении. Известный автоматический микробиологический

анализатор "VITEK® 2 compact 60" (табл. 1), разработанный фирмой bioMérieux SA (Франция), проводит автоматическую идентификацию вида патогенных микробных клеток и определение их чувствительности к антибиотикам на отдельных микробиологических карточках для каждого из этих типов анализов. Для работы требуется предварительное накопление и выделение штамма патогенной бактерии. Время анализа по данным производителя составляет до одних суток, а с учетом предварительного накопления патогенных микробных клеток двое и более суток. Прибор является стационарным и не приспособлен для работы в удаленных местах оказания помощи, в том числе в поликлиниках. Его высокая стоимость определяет необходимость размещения в крупных централизованных микробиологических лабораториях. В приборе не автоматизирована процедура предварительного накопления и сортировки микробных клеток с выделением штаммов патогенных или диагностически значимых микробных клеток. Таким образом, данный известный промышленный прибор не может выполнять задачи, поставленные в данной работе.

Достижения технологий микроэлектроники, микросистемной техники и принципы миниатюризации в инструментальном анализе открыли возможности развития нового поколения технических средств — микроаналитических систем, называемых также: μ -TAS, lab-on-a-chip (лаборатории на чипе), микрофлюидные системы и др. [1]. Представляя собой миниатюрные устройства, изготовленные с помощью планарных и гибридных технологий, микроаналитические системы предназначены для проведения различного рода химических анализов и биомедицинских испытаний. Такие системы позволяют повысить производительность при осуществлении биомедицинского и экологического анализа, при изучении живых организмов. Разработка микроаналитических систем позволяет решать задачи снижения стоимости, материало- и энергоемкости изделий, повышать производительность анализа. Эти усовершенствования возможны благодаря формированию таких устройств с помощью микро- и нанотехнологий, позволяющих реализовывать прецизионную геометрию, обеспечивающую возможность геометрической комплементарности компонентов на молекулярном уровне, повышение скорости анализа без дополнительных затрат, управление массопереносом и автоматическое регулирование в микромасштабе стадий аналитического процесса в интегрированных функциональных модулях и подсистемах. Перенос биологических объектов в таких системах может осуществляться с помощью проточного анализа, с использованием принципов микрофлюидики. Усовершенствование способов традиционного микробиологического анализа может быть осуществлено

именно с использованием возможностей технологий микро- и нанoeлектроники.

Известны способы выращивания колоний, осуществляемые с помощью миниатюрных ячеек для роста клеток, сформированных путем нанесения пленок из полимеров и/или оксидов и фторидов металлов толщиной 0,01...0,2 мм, и затем формирования путем частичного удаления пленок участков заданной геометрии, и со свойствами поверхности, обеспечивающими контроль за ростом клеток. В указанных способах отсутствует возможность автоматического отрыва и переноса колоний в узел идентификации и сортировки во внешних устройствах в целях выделения колоний микробных клеток и тестирования их чувствительности к антибиотикам.

Наиболее современным является способ культивирования и анализа индивидуальных культур клеток, в котором после предварительной очистки пробы, содержащей разнообразные клетки, клетки помещают в ростовые ячейки (или площадки) для проведения одновременного их роста при заданных условиях (влажность, температура, состав жидкой среды) с получением индивидуальных микроколоний. Способ осуществляется с применением ростовых ячеек, например, сформированных с помощью микротехнологий, очень малого размера, так, чтобы обеспечить рост индивидуальных клеток размером, сопоставимым с размером ростовой зоны. В данном способе суспензию клеток помещают в ростовые зоны после разделения суспензии на отдельные объемы, достаточно малые, чтобы в дальнейшем обеспечить рост гомогенной культуры в каждом объеме, проводят их посев и инкубирование в отдельных микролунках, имеющих цилиндрическую форму и расположенных друг от друга на расстоянии не менее 1,8 мм; поверхность между ними покрыта водоотталкивающим слоем и является общей для всех "микрокультур" или индивидуальных микроколоний, причем по время инкубирования к культурам поступают необходимые питательные вещества через мембраны с размером пор $0,1 \cdot 10^{-7} \dots 4 \cdot 10^{-6}$ м и толщиной $0,2 \cdot 10^{-7} \dots 10 \cdot 10^{-6}$ м [7]. Однако и в данном способе не решена задача быстрого отделения индивидуальных микроколоний и их переноса во внешние устройства идентификации и сортировки. Способ является сложным и не приспособлен для экспресс-анализа, а соответствующее устройство не может быть использовано в портативном приборе ввиду сложной конструкции и низкой прочности дозаторов, оно не предусматривает возможность выделения и идентификации патогенных штаммов в целях их последующего накопления и исследования чувствительности к антибактериальным препаратам.

Наиболее интересным представляется способ, описанный в работе [7]. Способ осуществляют на

пористой пластине из анодного оксида алюминия, на поверхности которой сформированы специальные зоны для роста микроорганизмов, ограниченные стенками полимерной сетки, выполненной способом ламинирования с последующей фотолитографией и плазменным травлением. При реализации такого способа выращивания колоний микробных клеток питательный раствор подают путем просачивания за счет капиллярных сил через поры пластины из пористого анодного оксида алюминия, сопряженной со слоем агара. Далее вручную подают микробные клетки, распределяя их по зонам роста. Инкубируют в анаэробных условиях при 37 °С или иных заданных условиях, наблюдая за ростом колоний до необходимого размера с помощью микроскопа. После достижения достаточного размера колонии микробных клеток отсоединяют от зон роста вручную, используя острую стерильную зубочистку, и также вручную осуществляют их перенос во внешние средства идентификации. Основными недостатками данного способа является использование ручного труда при подаче клеток в зоны роста, а также при отсоединении выросших колоний и их переносе в средства идентификации и невозможность автоматизации процесса.

Экспериментальная часть

Задачей данной статьи является обсуждение способа выращивания колоний микробных клеток, позволяющего создать условия для обеспечения автоматизации процесса выращивания, отрыва и переноса микроколоний, что дает возможность применения способа в лабораториях на чипе. Для его осуществления используется пористый анодный оксид алюминия. Питательный раствор подается снизу вверх через отверстия в пластине и расположенные в них пористые мембраны в зоны роста колоний микробных клеток, сформированные на пористых мембранах. Микробные клетки подаются на верхнюю поверхность пластины до их равномерного распределения в зонах роста. Обеспечивается создание условий для роста микроорганизмов в виде колоний в условиях контроля параметров среды (температуры, влажности, парциального давления кислорода и др.). Проводится наблюдение за ростом колоний; осуществляется отрыв выращенных микроколоний микробных клеток от зон роста путем гидроудара и перенос их во внешние средства идентификации в потоке. Существенными отличиями заявляемого способа являются соизмеримость зон роста и микроколоний, что предполагает выделение сразу чистой культуры микроорганизмов, возможность контроля подачи питательной среды, возможность контроля роста колоний *in situ*, возможность создания условий гидроудара с применением ударного давления на входе отверстий в пористой пластине для отрыва колоний от поверхности зон роста на пористой

мембране, расположенной в отверстии, в целях их автоматического перемещения без механического повреждения микроколоний во внешние устройства для их дальнейшего исследования, а также возможность осуществления способа в лаборатории на чипе. Подача питательного раствора осуществляется за счет перепада давления при подаче раствора снизу вверх, что позволяет контролировать процесс подачи раствора к зонам роста, а также автоматизировать его (например, подача насосом). Подача суспензии с помощью автоматизированных средств (насоса) позволяет равномерно распределять ее по поверхности. Нанесение гидрофобной пленки на поверхность пластины с отверстиями препятствует прикреплению к ней микроорганизмов, которые будут задерживаться зонами роста с повышенной концентрацией питательных веществ, подаваемых снизу. Благодаря регулируемой подаче питательного раствора в зоны роста обеспечивается рост колоний. При достижении благодаря делению размера порядка $N = 100...1000$ клеток в колонии микроколонии отделяют от зон роста для перенесения во внешние средства идентификации. Отрыв микроколоний в заявляемом методе проводят с помощью гидроудара. Создание режима гидроудара позволяет автоматизировать процесс отрыва колоний для их последующего переноса.

Известны попытки создания переносных устройств для выращивания колоний клеток. Например, устройства, содержащие кассеты с емкостью для роста клеток, контейнер для ростовой среды, контейнер для слива отходов, узел для сбора выросших колоний, соединенные в единое устройство, не связанное с внешней средой. Устройство может сопрягаться с различными внешними устройствами, например, узлом для перемешивания клеток, процессором, термостатом, узлом массопереноса, фильтрами для регулирования состава среды и узлом отбора и концентрирования клеток. Узел массопереноса в устройстве обеспечивает подачу среды, смену направления ростовой поверхности потока для оптимизации роста клеток и повышения выхода культуры, а также подачу стерильной ростовой среды и удаления ингибирующих веществ [8]. Устройства такого типа не обеспечивают возможности автоматизации и оптимизации процесса роста и сбора клеток, при этом являются сложными, громоздкими и не предусматривают возможность автоматического перемещения отдельных микроколоний клеток во внешние устройства для их идентификации и дальнейшего определения их чувствительности к антибиотикам, т. е. не выполняют условия, необходимые для решения задач экспресс-анализа. Кроме того, принцип устройства не позволяет интегрировать его в лабораторию на чипе.

Другой подход — использование в качестве субстрата для роста штаммов клеток полупроницаемой мембраны, через поры которой поступает питательный раствор, например, устройство для выращивания культур клеток и бактерий, которое помещают в чашку Петри, содержащую жидкость или питательный раствор. Устройство представляет собой кольцо или рамку, на котором закреплена пористая решетка, покрытая пористой мембраной так, чтобы ее нижняя поверхность находилась в полном контакте с жидкостью, а на верхнюю плоскость мембраны помещают клетки, бактерии или иные организмы, которые получают питание из пор мембраны [9]. Известно также устройство для анализа клеток, в котором микролунки изготовлены из фоторезистивной пленки, толщиной 15...60 мкм, образующей стенки лунок [10]. Такие устройства не обладают потенциалом автоматизации и возможностью отбора микроколоний, т. е. не могут быть использованы для получения в короткий срок чистой культуры микроорганизмов.

Известны устройства для выращивания колоний клеток, в которых содержатся узел массопереноса, фильтры для регулирования состава среды и узел отбора и концентрирования клеток. Узел массопереноса в таких устройствах обеспечивает подачу среды для оптимизации роста клеток и повышения выхода культуры, а также подачу стерильной ростовой среды и удаления ингибирующих веществ [11, 12]. Все эти устройства, обеспечивающие возможность автоматизации и оптимизации процесса роста клеток, являются сложными, громоздкими и не предусматривают возможность автоматического перемещения индивидуальных микроколоний клеток во внешние устройства для идентификации и определения чувствительности полученных культур к антибиотикам.

Наиболее перспективным является подход, описанный в статье [9]. Описанное в статье устройство состоит из пористой пластины из анодного оксида алюминия, на поверхности которой сформирована сетка из полимерных перегородок, образующая зоны роста колоний с характерным размером 7...200 мкм. Пористая пластина расположена на слое агара с питательным раствором в чашке Петри с достижением полного жидкостного контакта устройства с поверхностью агара для смачивания нижней поверхности пористой пластины. Основными недостатками этого устройства является то, что оно не обеспечивает возможность автоматизации процесса культивирования и роста клеток, при работе с ним используется ручной труд при подаче клеток в зоны роста, а также при отсоединении выросших колоний и их переносе в средства идентификации и контроля с помощью микроскопа. Устройство проводит анализ с малой скоростью, не портативное, не обеспечивает возмож-

ность интегрирования в миниатюрные переносные приборы и использования в лабораториях на чипе.

Представляется важной задача разработки устройства, позволяющего обеспечить условия автоматизации процессов подачи питательного раствора, процессов отделения и переноса выросших колоний, возможность интегрирования в миниатюрные переносные приборы, использования в лабораториях на чипе и обеспечение портативности устройства. В таком устройстве для выращивания колоний микробных клеток, содержащем пористую пластину из анодного оксида алюминия со сформированными на ее верхней поверхности зонами роста колоний микробных клеток, нижняя поверхность пластины сопряжена со средством подачи питательного раствора. Эта пластина расположена в корпусе и разделяет его на верхнюю и нижнюю емкости, которые снабжены входом и выходом для жидких сред. Указанная пористая пластина имеет отверстия цилиндрической формы, сформированные ортогонально ее большей плоскости и топологически кодированные, при этом в каждом отверстии расположены мембраны с порами, не пропускающими микробные клетки. Верхняя поверхность корпуса устройства не проницаема для влаги и частиц внешней среды, но выполнена с возможностью пропускания газов и наблюдения за ростом колоний. Зоны роста могут иметь вид либо площадки при расположении пористой мембраны вровень с поверхностью пористой пластины из анодного оксида алюминия, либо лунки при расположении пористой мембраны ниже уровня поверхности пластины. Поверхность пористой пластины из анодного оксида алюминия между зонами роста может иметь покрытие слоем материала, препятствующего прикреплению к нему клеток, например, металла, полимера, гидрофобного материала. Пористые мембраны могут быть изготовлены, например, из анодного оксида алюминия, керамики, полимера, металла. Крышка верхней емкости может быть снабжена центральным окном с закрепленным в нем оптическим стеклом для наблюдения за ростом колоний, а также двумя окнами, закрытыми полупроницаемыми мембранами, служащими для пропускания газов, но являющимися непроницаемыми для влаги и частиц внешней среды.

Образование зон роста в отверстиях пористой пластины путем размещения пористых мембран в них и наличия покрытия между зонами роста позволяют концентрированно и быстро выращивать колонии без специальных средств ограничения зон роста (полимерная сетка в прототипе). Пористые мембраны в отверстиях исполняют роль барьеров, задерживающих клетки в зонах роста после подачи суспензии перед ростом колоний. Отверстия в пластине выполнены в виде цилиндров с гладкими стенками ортогонально большей плоскости порис-

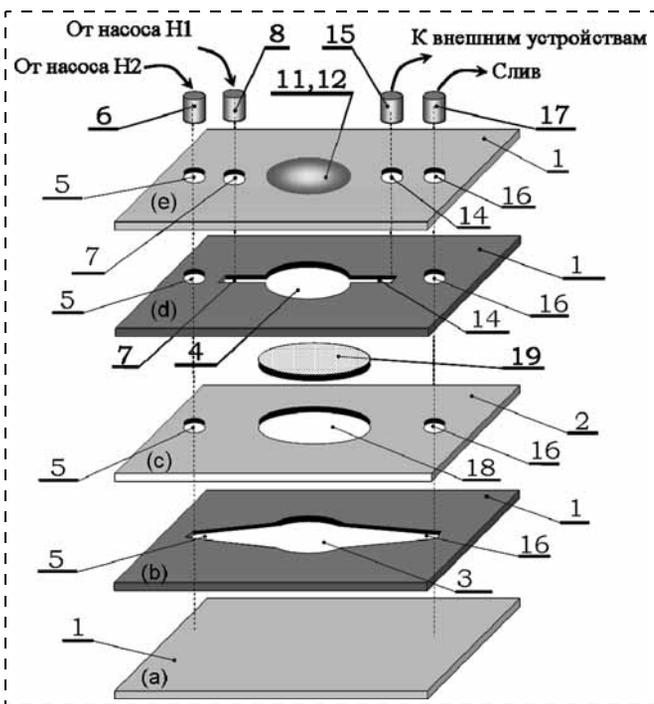


Рис. 3. Пример устройства для выращивания колоний микробных клеток, выполненного в виде сэндвич структуры

ные с соответствующими отверстиями на слое (а). На слое 2 размещен слой 1(д), содержащий отверстие, образующее емкость 4 (см. рис. 1), и каналы, соединяющие его с отверстиями 5 и 16, используемыми также для подачи суспензии микроорганизмов и вывода выросших колоний во внешние устройства, соответственно. На слое 1(д) расположен слой 1(е), содержащий отверстия 5 и 16, сопряженные с соответствующими отверстиями в слоях (б), (с) и (д), которые образуют канал для подачи питательного раствора в емкость 3 и его вывода, а также отверстия 7 и 14, сопряженные с соответствующими отверстиями в других слоях, предназначенные для подачи суспензии микробных клеток в емкость 4 и вывода колоний во внешние устройства. В слое 1(е) расположено также окно 11 с оптическим стеклом 12. На слое 1(е) расположены клапаны 6 и 17, сопряженные с отверстиями 5 и 14, предназначенные для регулирования подачи питательного раствора, и клапаны 8 и 15, сопряженные с отверстиями 7 и 14, предназначенные для регулирования подачи суспензии микробных клеток и вывода выросших колоний.

Пористая пластина 19 толщиной 80 мкм изготовлена из анодного оксида алюминия с образованием цилиндрических отверстий и расположенных в них пористых мембран методом обратной фотолитографии и анодирования. Слой 2 устройства толщиной 80 мкм изготовлен из лавсановой пленки методом лазерной обработки. Слои 1(б) и 1(д) изготовлены из полихлорвиниловой пленки толщиной 400 мкм методом лазерной обработки. Слои 1(а) и 1(е) изготовлены из экструзионной акриловой пленки толщиной 1 мм. Отверстия диаметром

1 мм выполнены механической обработкой. Клапаны 6 и 17 изготовлены путем прецизионного литья, а клапаны 8 и 15 — механической обработкой поликарбоната. Герметизацию устройства осуществляли сжатием болтами в специально изготовленной рамке.

Пористая пластина 19 имеет топологически кодированные отверстия 20 (рис. 4, а), в которых расположены пористые мембраны 21 (рис. 4). Диапазон диаметров отверстий в пористой пластине составляет 2...20 мкм. Колонии растут на пористых мембранах 21, расположенных в отверстиях 20 (рис. 4). Пористые мембраны 21, сформированные из анодного оксида алюминия, характеризуются значениями пористости $\chi = S_{\text{мем}}/S_{\text{пор}} = 0,1...0,7$, где $S_{\text{мем}}$ — площадь мембраны, $S_{\text{пор}}$ — площадь пор на поверхности мембраны.

Работа устройства может быть описана следующими фазами.

Фаза 1 (рис. 5, а) — заполнение емкости 3 и через отверстия пластины из пористого анодного оксида

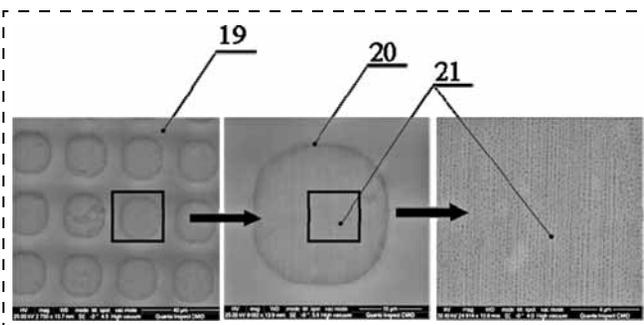


Рис. 4. Фотографии фрагмента пористой пластины из анодного оксида алюминия и пористой мембраны

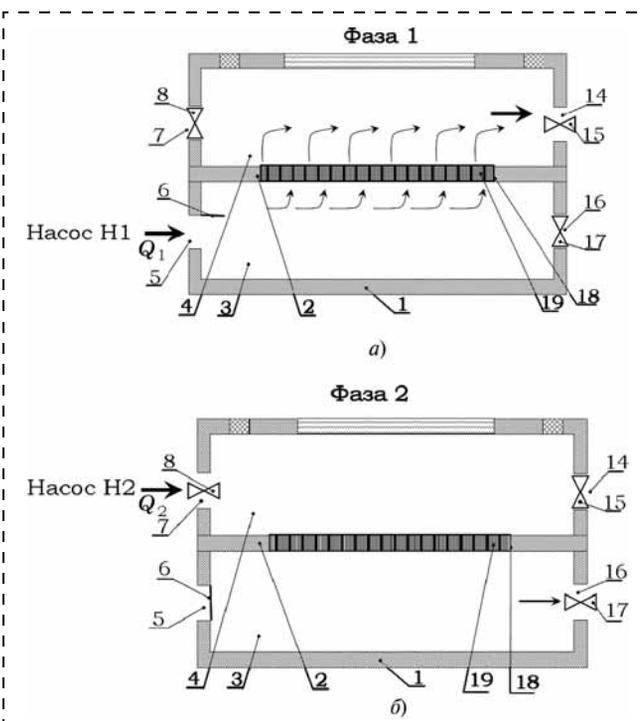


Рис. 5. Фаза 1 (а); фаза 2 (б) работы устройства

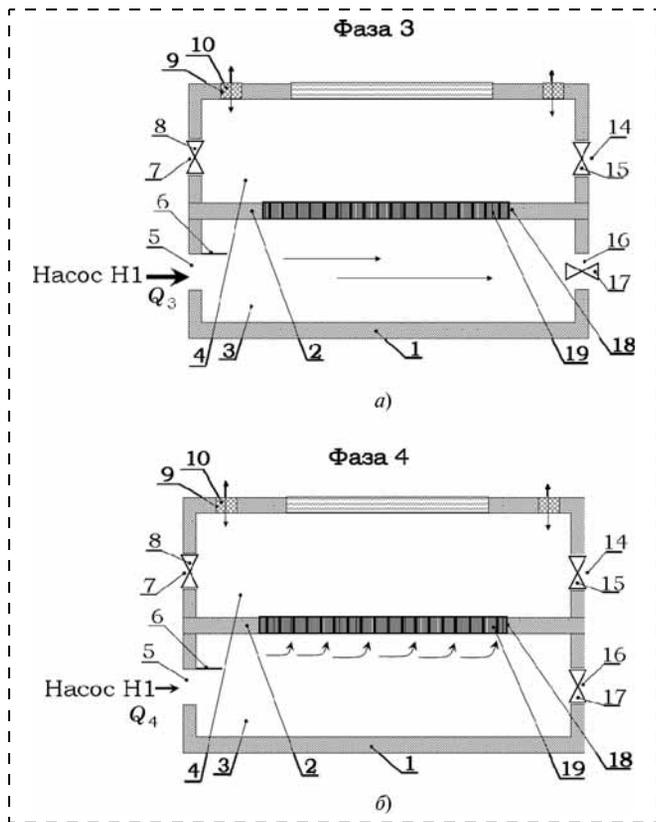


Рис. 6. Фаза 3 (а); фаза 4 (б)

алюминия 19 емкости 4 жидкой средой, например питательным раствором, с вытеснением воздуха из емкостей и пор. Насос Н1 создает поток питательной среды с объемной скоростью Q_1 , обратный клапан 6 и клапан 15 открыты, клапаны 8 и 17 закрыты.

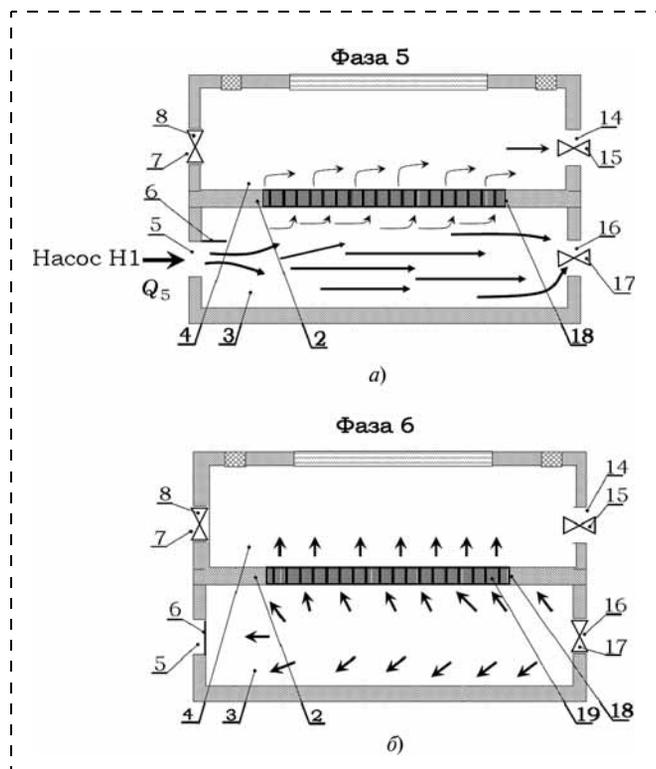


Рис. 7. Фаза 5 (а); фаза 6 (б)

Фаза 2 (рис. 5, б) — заполнение емкости 4 суспензией микробных клеток, клапаны 8 и 17 открыты, обратный клапан 6 и клапан 15 закрыты. Насос Н2 подает в емкость 4 поток суспензии микробных клеток с объемной скоростью Q_2 .

Фаза 3 (рис. 6, а) — промывка полости 3; обратный клапан 6 и клапан 17 открыты, клапаны 8 и 15 закрыты, насос Н1 подает поток промывочного раствора в емкость 3 с высокой объемной скоростью потока Q_3 .

Фаза 4 (рис. 6, б) — рост колоний микробных клеток; обратный клапан 6 открыт, а клапаны 8, 15, 17 закрыты, насос Н1 создает поток питательной среды в емкость 3 с малой объемной скоростью Q_4 , обеспечивающей подпитку зон роста в емкости 4.

Фаза 5 (рис. 7, а) — создание условий для возникновения гидроудара; обратный клапан 6 открыт, клапаны 15 и 17 открыты, клапан 8 закрыт, насос Н1 создает поток питательной среды в емкости 3 с высокой объемной скоростью Q_5 .

Фаза 6 (рис. 7, б) — создание гидроудара, обратный клапан 6, клапаны 8 и 17 закрыты, клапан 15 открыт, ударная волна, создающая дополнительное давление $P_{уд}$, проходя через питательную среду в емкости 3 и через отверстия и поры в пластине отрывает выросшие колонии из зон роста.

Фаза 7 (рис. 8) — перенос выросших колоний микробных клеток во внешние устройства, обратный клапан 6 и клапаны 8 и 17 закрыты, насосы Н1 и Н2 создают поток питательной среды с объемной скоростью Q_6 , обеспечивающей перенос выросших колоний микробных клеток во внешние устройства через клапан 15.

Временная диаграмма, представленная на рис. 9, иллюстрирует работу устройства, а именно состояние клапанов (закрыт — "0", открыт — "1") 6, 8, 15 и 17, зависимость объемных скоростей потоков, создаваемых насосами Н1 и Н2, состояние датчика (видеокамеры), зависимость давления P в емкости 3 в режиме гидроудара от времени. На оси абсцисс выделены временные промежутки, соответствующие фазам работы устройства. На диаграмме (рис. 9) приняты следующие обозначения: Q_1 — объемная скорость, создаваемая внешним насосом Н1, который обеспечивает поток питательной среды для промывки емкостей 3 и 4, и переноса выросших коло-

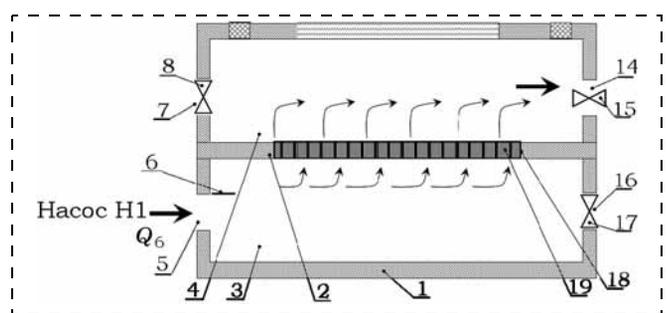


Рис. 8. Фаза 7

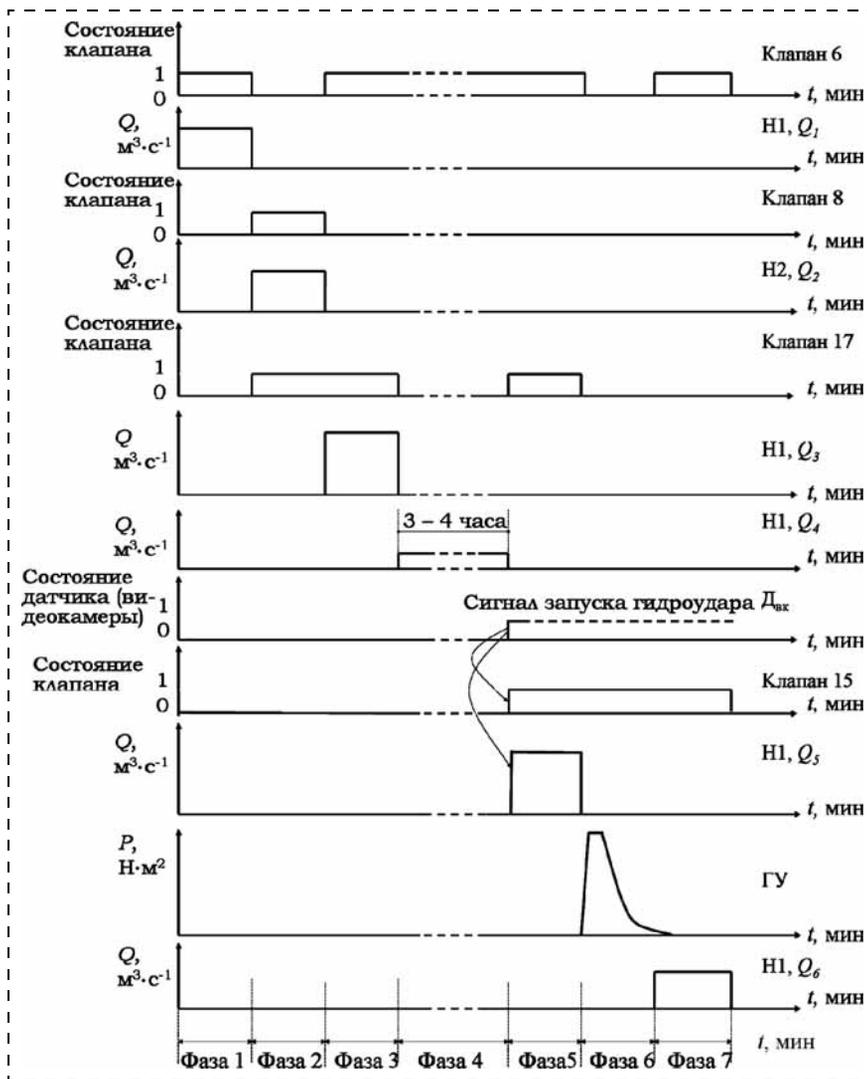


Рис. 9. Временная диаграмма работы устройства

ний микробных клеток; Q_2 — объемная скорость, создаваемая внешним насосом Н2, обеспечивающим поток суспензии микроорганизмов; Q_3 — высокая объемная скорость потока, создаваемая насосом Н1, обеспечивающим промывание камеры 3 и гидроудар; Q_4 — малая объемная скорость, создаваемая насосом Н1, обеспечивающим смачивание зон роста; $D_{вк}$ — датчик (видеокамера, см. рис. 1), обеспечивающий сигнал для начала работы насоса Н1 в режиме гидроудара (ГУ) для отрыва выросших колоний; P — давление в емкости 3.

Для заполнения устройства питательной средой во время фазы 1 (см. рис. 5, а) в емкость 3 подают питательный раствор с объемной скоростью потока Q_1 с помощью, например, внешнего насоса Н1. Насос Н1 обеспечивает давление, достаточное для протекания питательной среды через отверстия 20 пластины 19 и поры 22 мембраны 21, смачивания и дегазации емкостей 3 и 4. Во время фазы 2 (см. рис. 5, б) подают суспензию микробных клеток определенной концентрации в емкость 4 с объемной скоростью Q_2 , например, с помощью внешнего насоса

Н2, микрошприца или автоматической пипетки. Суспензию подают до ее равномерного распределения по поверхности пластины 19 (при необходимости удаления воздушного пузыря используют полупроницаемые мембраны 10 (см. рис. 1) или клапан 15, который временно открывают. За распределением питательного раствора ведут наблюдение через окно 11 с закрепленным в нем оптическим стеклом 12, над которым расположен объектив 13 видеокамеры. Затем перед началом роста в фазе 3 (см. рис. 6, а) состав питательной среды в емкости 3 приводят в стандартное состояние промыванием с помощью насоса Н1 при скорости Q_3 . Начинается фаза 4 (см. рис. 6, б) роста колоний, во время которой обеспечиваются необходимые условия для деления микроорганизмов: питание, температура, влажность (путем размещения устройства в инкубаторе либо путем установки датчиков режимов и обеспечения поддержания параметров). Необходимые условия для роста аэробных клеток обеспечивает наличие окон 9 с мембранами 10, которые проницаемы для газов, но не проницаемы для влаги и частиц внешней среды. Питательный раствор поступает из полости 3 через отверстия 20 в пластине 19 и поры 21 с помощью внешнего насоса Н1,

обеспечивающего объемную скорость Q_4 . Наблюдение за ростом колоний ведут также через окно 11. После достижения достаточного размера (порядка $N = 100 \dots 1000$ клеток в колонии), который фиксируется либо с помощью видеокамеры $D_{вк}$, выполняющей роль датчика, с подачей соответствующего управляющего сигнала, либо по времени, определенному экспериментально, колонии микробных клеток отсоединяют от зон роста гидроударом. Для этого в фазе 5 внешний насос Н1 переводят в режим высокой объемной скорости Q_5 (см. рис. 7, а). После установления в емкости 3 заданной объемной скорости потока Q_5 резко закрывают на время t клапаны 17 и 6 (фаза 6). В емкости 3 у клапана 17 нарастает ударное давление и возникает ударная волна, направленная от клапана 17 (см. рис. 7, б). Ударная волна распространяется в отверстия 20 и поры 22, обеспечивая скачок давления без существенного перемещения жидкости, в результате чего колонии отсоединяются от зон роста.

Благодаря прохождению в зоне роста ударной волны, имеющей повышенное давление, вырос-

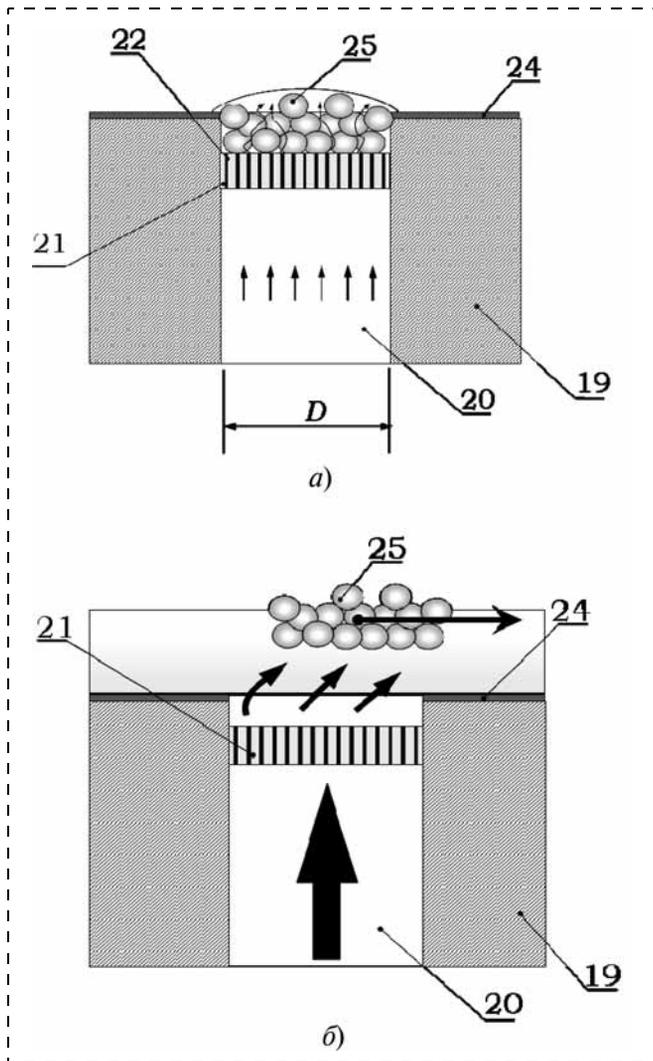


Рис. 10. Сечение пластины с отверстием и пористой мембраной: а — с микроколонией, прикрепленной к зоне роста; б — с микроколонией в начальной стадии перемещения микроколонии во внешние устройства после отрыва от зоны роста

шие микроколонии отрываются от зон роста (снимаются с площадок или выталкиваются из лунок). Затем поток с объемной скоростью Q_6 переносит колонии во внешние устройства, например в устройство идентификации (см. рис. 8).

Выросшие во время фазы 4 колонии микробных клеток закрепляются в зонах роста, в лунках (рис. 10, а), так как остальная поверхность пластины 19 покрыта слоем материала 24, препятствующего прикреплению к нему клеток. При реализации фазы 6 колонии 25 отсоединяются от зон роста, как показано на рис. 10, б.

Оценка технических параметров устройства

Для уточнения параметров работы устройства необходимо оценить следующие параметры:

1) характерную энергию и силу связи бактерии (и соответственно, колонии) с поверхностью зоны роста;

2) значение давления $P_{уд}$, необходимого для отрыва бактерии (справедливо для колоний);

3) параметры гидроудара (скорость в разгонной камере, скорость закрытия клапана 17), обеспечивающие давление $P_{уд}$;

4) параметры потока, обеспечивающего перенос колоний во внешние устройства.

Рассмотрим перечисленные выше технические характеристики 1—4 работы устройства.

1. Рассмотрим пористую мембрану из анодного оксида алюминия (рис. 11), на поверхности которой расположена микробная клетка в виде диска диаметром $D_{м.кл} = 10^{-6}$ м (предположим, что клетка принимает форму диска на поверхности). Из рис. 11 видно, что поры мембраны расположены достаточно регулярно (рис. 11, а, в), характеризуются узким распределением по размерам и в зависимости от условий анодирования могут иметь заданный средний диаметр, например $d_{ср} = 105$ нм или $d_{ср} = 208$ нм. Более того, из рис. 11, б, г видно, что поры характеризуются высоким аспектным отношением и формой, близкой к цилиндрической. Поэтому для оценки силы сцепления микробных клеток с поверхностью мембраны используем модель в виде пластины с цилиндрическими порами, как показано на рис. 12, а, б. Тогда, если площадь контакта $S_{конт}$ бактерии на сплошной плоской поверхности составляет

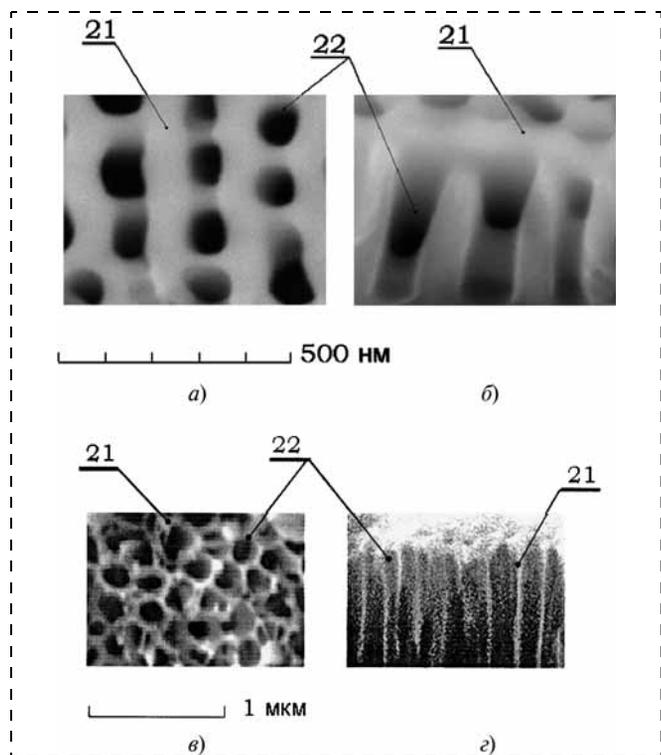
$$S_{конт} = \pi D_{м.кл}^2 / 4 = 3,14(10^{-6})^2 / 4 = 7,8 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2,$$


Рис. 11. SEM фотография пористой мембраны из анодного оксида алюминия: а — вид сверху, средний размер пор 105 нм, пористость $\psi = 0,1$; б — скол; в — вид сверху, средний размер пор 208 нм, пористость $\psi = 0,71$; г — скол

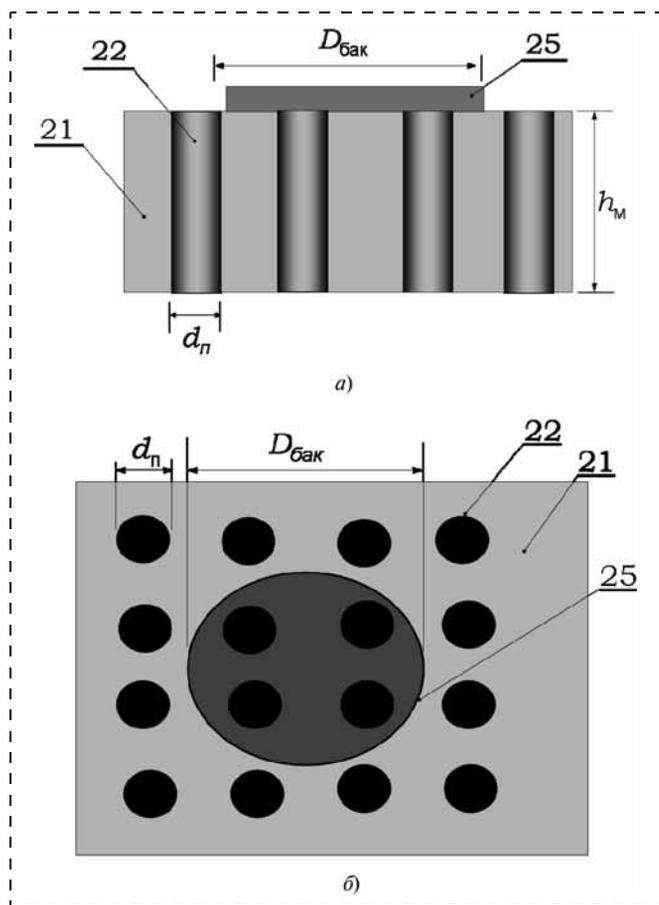


Рис. 12. Модель фрагмента пористой мембраны с клеткой, присоединенной к ее поверхности:

a — сечение вдоль оси пор; *б* — вид сверху

а площадь поперечного сечения поры пористой мембраны $S_{\text{поры}}$ (рис. 12, *б*) диаметра $d = 2 \cdot 10^{-7}$ м будет $S_{\text{поры}} = \pi d^2/4 = 3,14(2 \cdot 10^{-7})^2/4 = 3,14 \cdot 10^{-14}$ м², что, в свою очередь, для четырех пор, которые перекрывает типичная бактерия (рис. 12, *a, б*), составляет площадь $S = 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-14}$ м² = $1,26 \cdot 10^{-13}$ м², тогда площадь контакта бактерии на пористой поверхности составит

$$S_{\text{конт/пор}} = 7,8 \cdot 10^{-13} - 1,26 \cdot 10^{-13} = 6,54 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2.$$

Для оценки силы сцепления бактерии с поверхностью зон роста (см. рис. 10, рис. 12) предположим, что средняя плотность связей составляет три связи на $1 \cdot 10^{-18}$ м². Тогда число связей $N_{\text{св}}$ на всю площадь контакта бактерии составит $N_{\text{св}} = 3(6,54 \cdot 10^{-13}/10^{-18}) = 2 \cdot 10^6$ связей.

Максимальная энергия одной связи Ван-дер-Ваальсова (В-д-В) типа (эти связи преобладают при условиях реализации метода) по литературным данным составляет $E_{\text{В-д-В}}(\text{max}) = 1,36 \cdot 10^{-23}$ Дж, а суммарная энергия В-д-В связей на всю бактерию составит $E = N_{\text{св}} \cdot E_{\text{В-д-В}} = (1,36 \cdot 10^{-23})(2 \cdot 10^6) \approx 3 \cdot 10^{-17}$ Дж.

Тогда силу связи всей бактерии F_1 (приняв Ван-дер-Ваальсово взаимодействие за основное) можно оценить как

$$F_1 = E/R_{\text{В-д-В}} = 3 \cdot 10^{-17}/0,6 \cdot 10^{-9} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ Н.}$$

Здесь $R_{\text{В-д-В}} = 0,6 \cdot 10^{-9}$ м — характерная длина В-д-В связи.

2. Значение давления, необходимого для отрыва бактерии от зоны роста, можно получить, поделив F_1 на площадь S из п. 1, получаем $P_{\text{отр}} = F_1/S = 5 \cdot 10^{-8}\text{Н}/1,26 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2 = 3,9 \cdot 10^{-5}$ Па.

В общем случае для бактерии (колонии) произвольной формы можно вывести следующий критерий определения давления, необходимого для их отсоединения от зон роста:

$$P_{\text{отр}} \geq \frac{(1-\varphi)}{\varphi} n_{\text{В-д-В}} F_{\text{В-д-В}} \quad (1)$$

Здесь $\varphi = 0,6$ — значение пористости участков мембраны, содержащих поры, определяемая как отношение площади сечения цилиндрических пор к площади мембраны.

Поскольку давление, необходимое для отрыва бактерий (при максимальной оценке), имеет достаточно высокое значение — 3,9 атм., то целесообразно использовать для отрыва колоний (см. рис. 10, *б*) от зон роста гидравлический удар, или скачок давления, вызванный быстрым изменением скорости потока жидкости за очень малый промежуток времени [14]. Применение гидроудара позволит при использовании миниатюрных насосов низкого давления, наиболее подходящих для портативной диагностической аппаратуры, достигать в короткие промежутки времени достаточно высоких значений ударного давления, необходимых для осуществления заявленной функции устройства — отрыва и перемещения колоний.

В ряде работ проводили численное исследование распространения ударной волны в тонком капилляре. Например, в работе [15] проводили численное моделирование процессов входа и распространения ударной волны в тонкий капилляр для газовой среды с учетом вязкости с использованием, в том числе, околоконтинуального подхода. Для последнего случая в численном эксперименте получено незначительное затухание ударной волны по мере движения в капилляре. Таким образом, можно предположить, что ударная волна, сформированная при резком перекрывании клапана 17, входя в отверстия 20 и поры 21, распространяется к выходу, постепенно затухая. В данной статье описан эксперимент, проведенный для газа при $Re = 400$. Используя принцип подобия по числу Рейнольдса, получим, что для достижения условий, подобных используемым в численном эксперименте для газа, в предлагаемом устройстве поток жидкости в емкости 3, выполняющей функцию разгонной каме-

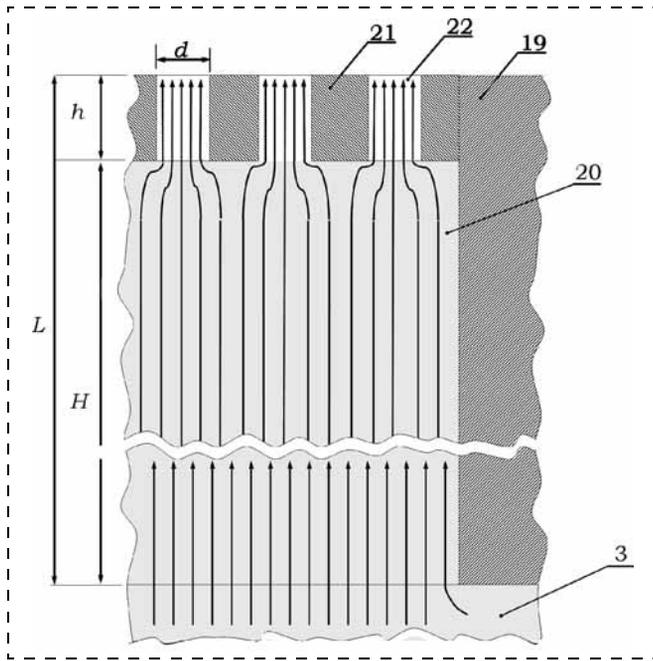


Рис. 13. Модель фрагмента пористой пластины с отверстиями и пористыми мембранами в них для гидравлического расчета

ры, должен приобретать скорость около $4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, что соответствует диапазону допустимых скоростей функционирования устройства. Тогда использование данных, полученных в работе [15], правомерно. В этом случае можно предположить, что при распространении в отверстиях 20 и порах 22 (рис. 13) ударная волна постепенно затухает, теряя не более 30 % энергии. Таким образом, с учетом затухания на входе в отверстия необходимо развить давление не менее $5,57 \cdot 10^5 \text{ Па}$ для получения на выходе из капилляра давления $P \geq P_{\text{отр}}$.

3. Увеличение давления при прямом гидравлическом ударе, т. е. таком, при котором фаза удара T короче времени закрытия τ клапана 17, определяется в идеальном случае для жестких стенок камеры и низкой сжимаемости жидкости по формуле

$$P_{\text{уд}} = \rho(v_0 - v_1)c, \quad (2)$$

где $P_{\text{уд}}$ — увеличение давления, Па; ρ — плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; v_0 и v_1 — средние скорости потока жидкости в канале до и после закрытия клапана 17 (см. рис. 6, а, б), $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$; c — скорость распространения ударной волны в жидкости, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Для оценки величины v_0 , необходимой для получения давления $P_{\text{уд}} \geq P_{\text{отр}} = 5,57 \cdot 10^5 \text{ Па}$, обеспечивающего отрыв бактерии, будем считать скорость звука в емкости устройства, равной скорости звука в неограниченной водной среде $c_{\text{вода}} = 1,348 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, а скорость $v_1 = 0$.

Оценим характер гидроудара, т. е. соотношение фазы ударной волны и времени закрытия клапана. Характерный размер разгонной камеры l в заявляемом устройстве примем равным 2 мм, тогда фаза удара $T = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}$. Если время закрытия клапа-

на 17 $\tau < 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, то осуществляется прямой гидроудар, рассчитываемый по формуле (1). Тогда, подставляя в формулу (1) в качестве $P_{\text{уд}}$ соответствующее значение, получаем

$$v_0 = P_{\text{уд}}/(\rho c_{\text{вода}}) = 5,57 \cdot 10^5 / (10^3 \cdot 1,348 \cdot 10^3) = 4,13 \cdot 10^{-1} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Если $\tau > 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, то гидроудар называется непрямым и применяется формула

$$P_{\text{уд}} = \frac{2\rho v_0 l}{\tau}. \quad (3)$$

Тогда при $\tau = 10^{-3} \text{ с}$, $l = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, получим $v_0 = P_{\text{уд}}\tau/(2\rho l) = 3,9 \cdot 10^5 \cdot 10^{-3} / (2 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-2}) = 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, а при $\tau = 10^{-4} \text{ с}$, $v_0 = 1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

В общем случае из выражений (1) и (3) для непрямого гидроудара можно получить формулу

$$v_0 \geq \frac{(1-\varphi)}{\varphi} n_{\text{В-д-В}} F_{\text{В-д-В}} \frac{\tau}{2\rho l}. \quad (4)$$

Таким образом, для применения в лабораториях на чипе, где значения объемной подачи рабочих жидкостей ограничены миниатюрностью насосов и гидравлическим сопротивлением труб малого диаметра (капилляров), практические соображения требуют применения гидравлического удара (как прямого, так и не прямого). В любом случае для реализации такого гидроудара потребуется применение скоростных запирающих микроклапанов, наподобие описанных в известном патенте [16].

Для более точного расчета критической скорости v_0 необходимо учитывать зависимость скорости c распространения ударной волны в жидкости от размеров и характеристик материалов разгонной камеры.

При мгновенном срабатывании клапана критическую скорость v_0 можно найти, используя формулы (1) и (2). Из условия $P_{\text{уд}} \geq P_{\text{отр}}$ при $v_1 = 0$, получаем

$$\rho v_0 c \geq \frac{(1-\varphi)}{\varphi} n_{\text{В-д-В}} F_{\text{В-д-В}}; \quad (5)$$

$$v_0 \geq \frac{(1-\varphi)}{\varphi} \frac{1}{\rho c} n_{\text{В-д-В}} F_{\text{В-д-В}}, \quad (6)$$

где

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho \left(\frac{1}{E_{\text{вода}}} + \frac{a_{\text{внутр}}}{b E_{\text{корпус}}} \right)}}. \quad (7)$$

Тогда для скорости в разгонной камере v_0 получим

$$v_0 \geq \frac{(1-\varphi)}{\varphi} n_{В-д-В} F_{В-д-В} \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{E_{\text{вода}}} + \frac{a_{\text{внутр}}}{b E_{\text{корпус}}}\right)}{\rho}}, \quad (8)$$

где $a_{\text{внутр}}$ — диаметр разгонной камеры 1 мм; b — толщина стенок разгонной камеры (толщина тонкой стенки — пластины с отверстиями 100 мкм, другие стенки толстые — 2...5 мм); $E_{\text{вода}}$ — модуль упругости воды $2 \cdot 10^9$ Па; $E_{\text{корпус}}$ — модуль упругости материала корпуса (например, для анодного оксида алюминия — $0,6 \cdot 10^{11}$ Па, для алюминия — $0,71 \cdot 10^{11}$ Па, для полимера — $0,032 \cdot 10^{11}$ Па).

4. Оценим объемную скорость Q_1 потока, проходящего через пористую мембрану при постоянном перепаде давления $\Delta P = 10^5$ Па, создаваемом насосом Н1 в фазе 1 и фазе 7. Поток Q_1 будет определяться количеством N , радиусом r и длиной h пор (рис. 13), так как они будут создавать наибольшее гидродинамическое сопротивление проходящей жидкости. Расчет объемной скорости Q в одной поре можно выполнить с помощью формулы (2) Пуазейля [17]:

$$Q = \frac{\pi r^4}{8 \eta h} \Delta P, \quad (9)$$

где η — динамическая вязкость жидкости. Для воды при температуре $T = 20$ °С, $\eta = 10^{-3}$ Па·с.

При $\Delta P = 10^5$ Па, $r = 10^{-7}$ м, $h = 10^{-5}$ м. Подставляя эти значения в формулу (9) получим

$$Q = \frac{3,14(10^{-7})^4}{8 \cdot 10^{-3} 10^{-5}} 10^5 \cong 4 \cdot 10^{-16} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}.$$

Оценим общее число пор пористых мембран на всей пористой пластине. Для оценки плотности пор на поверхности (n_S) можно воспользоваться следующим выражением:

$$n_S = \varphi/(\pi r^2) = 0,6/(3,14 \cdot (10^{-7})^2) = 1,91 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}.$$

Площадь поверхности, покрытую порами, можно оценить по формуле $S = N_1 \pi R^2 = 1,6 \cdot 10^3 \cdot 3,14 \times (5 \cdot 10^{-6})^2 = 1,26 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$, где $N_1 = 1,6 \cdot 10^3$ — число отверстий на пластине, $R = 5 \cdot 10^{-6}$ м — радиус отверстия.

Тогда общее число пор пористых мембран на всей пористой пластине можно рассчитать по формуле $N = n_S S = 2,4 \cdot 10^6$.

Полный поток через поры пористых мембран на всей пористой пластине будет равен $Q_1 = NQ = 2,4 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 10^{-16} \cong 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$.

Рассчитаем линейную скорость v_n переноса микробных клеток в фазе 7 под действием потока Q_6 . Для этого необходимо оценить линейную скорость потока в емкости 4 и сопряженных коммуникациях с внешними устройствами (рис. 8) при объемном потоке Q_6 . При размере разгонной камеры $10^{-4} \times 10^{-3}$ м (площадь сечения $s = 10^{-7} \text{ м}^2$), средняя линейная скорость потока v_n определится выражением

$$v_n = Q/s = 3 \cdot 10^{-9}/10^{-7} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Данное значение скорости Q_6 достаточно для поддержания колоний в потоке и компенсации седиментации на пористую пластину, а также для переноса колоний во внешнее устройство. Для дополнительного регулирования потока во внешние устройства можно также использовать насос Н2 в режиме Q_2 .

Результаты и их обсуждение

1. Для исследования была приготовлена суспензия штамма микробных клеток в концентрации 10^7 КОЕ·мл⁻¹ (КОЕ — колония образующих единиц), ее последовательно разбавляли до концентраций $1 \cdot 10^2$, $1 \cdot 10^3$, $1 \cdot 10^4$, $1 \cdot 10^5$, $1 \cdot 10^6$ КОЕ·мл⁻¹ с получением шести образцов суспензии *S. aureus*. Для заполнения устройства жидкой средой (фаза 1, рис. 5, а) в емкость 3 подавали физиологический раствор с объемной скоростью потока $Q_1 = 1$ мкл·мин⁻¹ с помощью шприцевого насоса Н1. Таким образом, обеспечивали смачивание и дегазацию емкостей 3 и 4. Затем суспензию микробных клеток каждого из образцов объемом 20 мкл подавали в емкость 4 с помощью микрошприца с объемной скоростью $Q_2 = 5$ мкл·с⁻¹ (фаза 2, рис. 5, б) до ее равномерного распределения по поверхности пластины 19. За распределением суспензии наблюдали в окно 11 с помощью внешней видеокамеры. Затем перед началом роста состав питательной среды в емкости 3 приводили в стандартное состояние промыванием с помощью насоса Н1 при скорости $Q_3 = 100$ мкл·мин⁻¹ (фаза 3). Затем начинали фазу инкубирования и роста колоний микробных клеток. Питательный раствор подавали с помощью насоса Н1 с объемной скоростью $Q_1 = 10$ нл·мин⁻¹ и установили температурный режим для роста 37 °С с помощью внешнего термостата (фаза 4). Использовали пористую пластину, содержащую 400 зон роста диаметром 20 мкм, пор диаметром 200 нм и пористостью $\chi = 0,6$. После инкубирования в течение 3 ч (фаза 4) исследовали пористую пластину с отверстиями с помощью микроскопа. Микроскопическое исследование показало, что в зависимости от концентрации исходной суспензии на части зон роста (0,5...60 %) наблюдаются выросшие колонии *S. Aureus* (рис. 14). Исследовали влияние исходной концентрации *S. aureus* на долю зон роста, в кото-

Таблица 3

Зависимость числа выросших (N_0) и отделенных (N_d) от зон роста колоний от скорости потока (v) в разгонной камере устройства для пластин с 400 зонами роста и различным диаметром (D) отверстий для суспензии с содержанием *S. aureus* $1 \cdot 10^7$ КОЕ мл⁻¹

Скорость потока $v, \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	Число выросших N_0 и перемещенных в канал 14 (рис. 3, б) (N_d) колоний					
	$d = 20 \text{ мкм}$		$d = 10 \text{ мкм}$		$d = 7 \text{ мкм}$	
	N_0	N_d	N_0	N_d	N_0	N_d
0,01	220	10	178	10	97	10
0,1	235	50	179	100	105	19
1	250	150	189	160	104	25
2	245	210	185	183	99	70
3	256	225	190	180	100	80
4	239	230	176	175	101	99
5	241	240	180	195	95	94

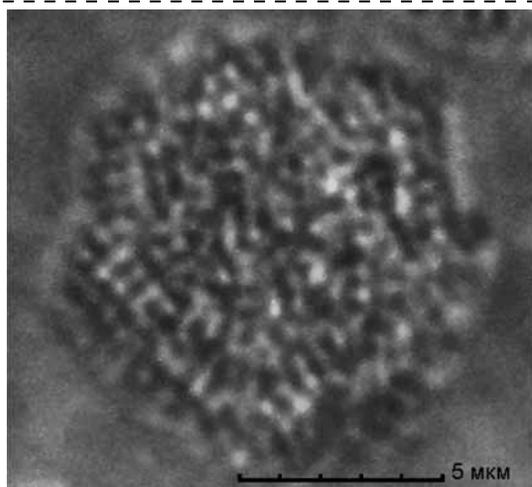


Рис. 14. Вид Колоний *Staphylococcus aureus* после двух часов роста на пористой пластине, содержащей порядка 800 колоний образующих единиц (КОЕ)

рых происходил рост колоний, наблюдая результаты проведения инкубирования с помощью микроскопа. Результаты наблюдений приведены в табл. 2.

Опыт повторяли с пластинами, имеющими по 400 ростовых зон с размером отверстий 2, 7 и 10 мкм, средним диаметром пор 200 нм и пористостью $\chi = 0,6$. Результаты приведены в табл. 2.

Затем было проведено отсоединение и перенос выросших колоний микроорганизмов во внешние устройства для пластин с отверстиями 7, 10 и 20 мкм. Перенос осуществляли гидравлическим способом с помощью гидроудара. Для получения гидроудара внешний насос Н1 был переведен в режим высокой объемной скорости $Q_5 = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (фаза 5), что соответствовало линейной скорости $1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ (площадь сечения разгонной камеры 3 на рис. 3 составляет $0,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$), затем перекрывали на время t клапаны 6 и 17 (см. рис. 3) в соответствии с фазой 6 работы устройства. В результате чего в емкости 3 возникла ударная волна, распространяющаяся в направлении ростовой пластины 19. Затем клапан 8 от-

крывали и насос Н1 переводили в режим $Q_1 = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$. Далее перенос колоний осуществляли переводом насоса Н2 в режим $Q_6 = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ и наблюдали с помощью микроскопа в канале 14 устройства и проводили их подсчет. Данные приведены в табл. 3.

Далее эксперимент повторяли для пластин с отверстиями диаметром 7 и 10 мкм. Данные приведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что при скоростях ниже $1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ наблюдается существенное снижение доли перемещенных в канал 14 колоний. При скорости более $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ наблюдается разрушение пористой пластины с отверстиями.

2. Таким же способом, как описано выше, проводили посев микроорганизмов пробы пациента с подозрением на поражение носоглотки *S. aureus*. Был взят мазок слизи носоглотки пациента и путем смыва пробы слизи с ватного тампона в физиологический раствор объемом 1 мл и осаждения волокон и частиц седиментацией в течение 5 мин готовили суспензию популяции микроорганизмов. Были приготовлены образцы суспензии разных концентраций путем ступенчатого десятикратного разбавления, получили разбавления в 10, 100 и 1000 раз. Перенесли 20 мкл суспензии из каждого образца в устройство. Использовали пластину, содержащую 400 отверстий, размером 10 мкм. После проведения фаз 1–3 процесса инкубации при условиях как в п. 1 исследовали результат с помощью микроскопа. Общее заполнение ростовых зон устройства составило 10...40 %, причем по данным визуальной экспертной оценки наблюдались колонии четырех типов: *S. Aureus*, *Neisseria meningitidis*, *S.pneumoniae*, *Enterococcus*. Результаты приведены в табл. 4.

Затем, в таких же условиях и в той же последовательности как в п. 1, проводили отсоединение и

Таблица 2

Влияние концентрации микробных клеток (*S. Aureus*) в суспензии и размера зон роста пористой пластины на эффективность роста колоний

Концентрация микробных клеток <i>S. aureus</i> в суспензии, КОЕ мл ⁻¹	Число микробных клеток <i>S. aureus</i> в пробе	Размер зон роста пористой пластины, мкм			
		2	7	10	20
		Доля выросших колоний в зонах роста, %			
$1 \cdot 10^2$	2	0	0	0,25	0,5
$1 \cdot 10^3$	20	0,25	1,2	1,5	4,5
$1 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^2$	0,5	4	6,25	12,5
$1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^3$	2,5	10	25	35
$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^4$	15	20	32	45
$1 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^5$	20	25	45	60

Таблица 4

Влияние разбавления клинической пробы пациента с подозрением на *S. Aureus* на долю выросших в зонах роста колоний N_0 и доля перемещенных к канал 14 колоний N_d

Разбавление клинической пробы	Вид микробных клеток							
	<i>S. aureus</i> , %		<i>Neisseria meningitidis</i> , %		<i>S.pneumoniae</i> , %		<i>Enterococcus</i> , %	
	N_0	N_d	N_0	N_d	N_0	N_d	N_0	N_d
1:10 ⁶	0	0	0	0	0	0	0	0
1:10 ⁵	0	0	0	0	0	0	0	0
1:10 ⁴	0	0	0	0	0	0	0	0
1:10 ³	3	3	0	0	0	0	1	1
1:10 ²	8	8	0	0	2	2	3	3
1:10	50	48	2	2	10	9	15	15

перенос выросших колоний микроорганизмов во внешние устройства (канал 14) для пластин с отверстиями 7, 10 и 20 мкм, и проводили их подсчет. Данные приведены в табл. 3.

Выводы

Создание миниатюрных мобильных устройств для экспресс-идентификации патогенов и определения их чувствительности к антибиотикам позволит правильно выбирать тактику лечения инфекционных заболеваний, повысить его эффективность, децентрализовать микробиологический анализ и сделать его доступным для всего населения, включая удаленные районы. Низкая стоимость и доступность проведения анализа позволят с его помощью улучшить лабораторную диагностику при инфекционных заболеваниях и повысить качество лечения.

Предложен способ выращивания колоний микробных клеток, включающий подачу питательного раствора снизу вверх через пористую пластину из анодного оксида алюминия в зоны роста колоний, сформированные на ее верхней поверхности, подачу микробных клеток на верхнюю поверхность пористой пластины из анодного оксида алюминия. Способ позволяет автоматизировать процесс микробиологического анализа и в несколько раз повысить его скорость. Отсоединение выращенных колоний от зон роста осуществляется с помощью микрогидродара, а перенос отсоединенных колоний осуществляют созданным принудительно потоком жидкости.

Работа выполнена в рамках Программы стратегического развития университета (СПбГЭТУ "ЛЭТИ") "Развитие междисциплинарных исследований и инструментально-технологической базы как основы непрерывного инженерного образования по приоритетным направлениям российской экономики" на 2012—2016 гг. и при финансировании Минобрнауки РФ

в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2010—2013 гг.: 1) ГК № 16.740.11.0211 от 24.09.2010, 2) ГС 14.В37.21.0568 от 01.09.2012, 3) ГС 14.В37.21.0793 от 01.09.2012.

Список литературы

1. Manz A., Graber N., Widmer H. M. // Sensors and Actuators. 1990. В. 1. Р. 244—248.
2. Зими́на Т. М. Миниатюрные аналитические системы биомедицинского назначения — лаборатории на чипе // Биотехносфера. 2009. № 1. С. 11—17.
3. Зими́на Т. М. Лаборатории на чипе для телемедицины // Биотехносфера. 2012. № 1. С. 29—40.
4. Зими́на Т. М. Микро- и наноаналитические системы // Нанотехнология. Физика. Процессы. Диагностика. Приборы / Под ред. В. В. Лучинина и Ю. М. Таирова. М.: Физматлит. 2006. С. 517—551.
5. Инфекционная заболеваемость в Российской Федерации. 01.09.2010. URL: http://www.rosпотребнадзор.ru/epidemiologic_situation/40414/
6. Метод и устройство для выращивания колоний микробных клеток / Т. М. Зими́на, А. В. Соловьев, В. В. Лучинин, Е. Н. Муратова, Л. А. Краева, Г. Я. Ценева, Н. И. Мухуров. Заявка на изобретение РФ. 2011.
7. Ingham C. J., Sprenkels A., Bomer J., Molenaar D., van den Berg A., van Hylckama Vlieg J. E. T., de Vos W. M. The micro-Petri dish, a million-well growth chip for the culture and high-throughput screening of microorganisms. URL: <http://www.pnas.org/content/104/46/18217.full>
8. Пат. № EP1425384 (A2). Methods for cultivating and analyzing microbial individual cell cultures / Mueller P.-J., Roth M., Groth I. et al. Заявка № EP20020776674; 13.09.2002.
9. Пат. № US 6096532. Processor apparatus for use in a system for maintaining and growing biological cells / Armstrong R. D., Maluta J., Roecker D. W. Заявка № US19970921847, 02.09.1997.
10. Пат. № RU 2298798 РФ. Метод и аналитическая система для контроля биологической пробы в реакции латекс-агглютинации / Зими́на Т. М., Лучинин В. В., Мигунова В. Е., Краева Л. А. и др. // Заявка № 2006101355/15, 17.01.2006.
11. Пат. № US 6127141. Culture device and method. Korf H. Заявка № US19990307932. 10.05.1999.
12. Пат. № US 7320889 B2. Cell cultivation device and method / Kahlert W., Wilhelm B. U., Salzmann R. et al. // Заявка № US20040841029. 07.05.2004.
13. Каплан И. Г. Введение в теорию межмолекулярных взаимодействий. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. литературы, 1982. 312 с.
14. Калищун В. И., Дроздов Е. В., Комаров А. С., Чижик К. И. Основы гидравлики и аэродинамики. М.: Стройиздат, 2002.
15. Иванов М. С., Шоев Г. В., Бондарь Е. А., Хотяновский Д. В., Кудрявцев А. Н. Моделирование распространения ударной волны в микроканале с учетом эффектов вязкости // Материалы Междунар. конф. "Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика", Новосибирск, Россия, 30 мая—4 июня 2011 г. URL: http://conf.nsc.ru/files/conferences/niknik-90/fulltext/47499/47500/Ivanov_full_paper.pdf
16. Заявка № US 20110073788. Microvalve for control of compressed fluids. Marcus M. A., Mehta R. V., Ng K. C. 2011.
17. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. Л., 1950. 676 с.

С. И. Голоудина¹, канд. хим. наук, ст. науч. сотр.,
e-mail: goloudina@mail.ru,

П. П. Карагеоргиев²,

В. В. Лучинин¹, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,

В. М. Пасюта¹, канд. техн. наук, науч. сотр.,

¹ "Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина)"

² Universität Regensburg, Germany

ОТ МОЛЕКУЛЯРНОГО НАСЛАИВАНИЯ К ЭПИТАКСИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ МЕТОДОМ ЛЕНГМЮРА—БЛОДЖЕТТ

Поступила в редакцию 04.10.2013

Пленки органического вещества гексадецилфосфатидилхолина — аналога фосфолипида, входящего в оболочку клеточных мембран, наследуют структуру пленки Ленгмюра—Блоджетт стеариновой кислоты, что свидетельствует о возможности эпитаксии органических молекул на поверхности твердого субстрата.

Ключевые слова: метод Ленгмюра—Блоджетт, эпитаксия, фосфолипиды, стеариновая кислота

Введение

В настоящее время активно развиваются методы молекулярного наслаивания, такие как молекулярно-лучевая эпитаксия и атомно-слоевое осаждение, позволяющие получать наноконпозиции неорганических веществ. Однако в связи с развитием молекулярной электроники особый интерес приобретает формирование на твердой подложке слоев органических молекул и управление их структурой. Метод Ленгмюра—Блоджетт (ЛБ) позволяет последовательно наносить на твердую подложку мономолекулярные слои поверхностно-активных веществ, молекулы которых ориентированы по нормали к поверхности субфазы [1]. Метод ЛБ в наибольшей степени по сравнению с другими методами подходит для исследования структурообразования органических молекул на твердой подложке (неорганической и органической) и изучения возможности наследования пленкой структуры подложки, по аналогии с матричным синтезом биоорганических веществ.

Целью настоящей работы является исследование возможности перехода от процессов молекулярного наслаивания к эпитаксии, обуславливающей упорядочение органических молекул в латеральной плоскости на поверхности инородного субстрата.

В ходе работы пленки ЛБ стеариновой кислоты (1—4 слоя) наносили на подложки из разных материалов (кремний, лейкосапфир, стекло, слюда) в условиях изменения ионного состава субфазы и при воздействии УФ излучения на систему монослой—субфаза—подложка. Кроме того, метод ЛБ использовали для нанесения на подложку монослоев ограниченно растворимых веществ — аналогов природных фосфолипидов. Исследование структуры пленок проводили методами дифракции быстрых электронов на отражение и малоугловой рентгеновской дифрактометрии.

Экспериментальная часть

Монослой стеариновой (HSt) кислоты наносили на поверхность субфазы разного состава: деионизованной воды с удельным сопротивлением $\rho = 18 \text{ МОм} \cdot \text{см}$ и водных растворов $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ М Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ М Al}(\text{NO}_3)_3$, $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ М SbCl}_3$. Раствор стеариновой кислоты готовили в смеси этанол-гексан (1:9) с концентрацией 2 мг/мл. Пленки ЛБ формировали на подложках из кремния (111) *n*-типа, лейкосапфира (0001), стекла марки К-8 и слюды (мусковит). Поверхностное давление в монослое при переносе составляло 20 мН/м, скорость движения подложки — 1 мм/мин. Для УФ облучения области осаждения монослоя на подложку использовали лампу типа ДРШ при плотности потока мощности на образец 0,1 Вт/см².

Для получения адсорбционных слоев на поверхности водной субфазы использовали гексадецилфосфатидилхолин (ГФХ) $\text{C}_{16}\text{H}_{33}\text{—NPO}_4\text{—C}_2\text{H}_4\text{—N}(\text{CH}_3)_3$. Исследование структуры прилегающих к подложке слоев проводили с помощью метода дифракции электронов высоких энергий на отражение (ДЭВЭО) на автоматизированном дифрактометрическом комплексе на базе электронографа ЭМР-102 при ускоряющем напряжении 75 кВ. Ток пучка составлял 15 мкА, диаметр пучка на образце — 0,3 мм [2]. В геометрии на отражение, реализуемой в данном методе, "слоевые линии", соответствующие шагу алифатической цепи (0,254 нм), хорошо разделены, что позволяет рассчитать параметры, характеризующие степень упорядоченности молекул в плоскости. Порядок "слоевой линии" обозначается символом l' . Взаимосвязь между характером распределения интенсивности на дифракционных картинах и степенью структурных нарушений в пленках определяли на основе модели Хоземана [3]. Были получены значения параметров ε , γ , характеризующие флуктуацию периода в плоскости слоя и смещение молекул вдоль оси z соответственно. Кроме того, определяли корреляционную длину в направлении (hk) (L_{hk}).

Более "толстые" пленки, содержащие восемь слоев, исследовали методом малоугловой рентгеновской дифрактометрии на приборе "Rigaku" с использованием излучения CuK_α (40 кВ, 120 мА).

На дифракционных картинах наблюдались брэгговские рефлексы от плоскостей $00l$, позволяющие судить об особенностях межслоевой упаковки молекул.

Результаты и их обсуждение

Приведенные на рис. 1, *a–г* электронограммы демонстрируют различную степень упорядоченности слоев в зависимости от типа подложки, состава пленки и числа слоев. Диффузные полукольца, наблюдаемые на электронограмме рис. 1, *a*, свидетельствуют об отсутствии дальнего порядка в упаковке молекул. Радиальное размытие полуколец связано с нарушениями периодичности алифатической цепи, что имеет место при изгибах молекул. Угловое распределение интенсивности (или угловая ширина дугообразного рефлекса) определяется угловым разбросом длинных молекулярных осей относительно преимущественного направления их ориентации. На электронограмме, приведенной на рис. 1, *б* наблюдается уменьшение угловой и радиальной ширины дуги, появляются элементы, расположенные в экваториальном направлении,

характеризующие ближнее молекулярное окружение в плоскости слоя, т. е. степень разориентации молекул в структуре снижается. Наличие ориентационного порядка в исследуемых структурах характеризуют электронограммы на рис. 1, *в–д*: дугообразные рефлексы трансформируются в слоевые линии, что связано с дифракцией от плоскостей $00l'$, образованных метиленовыми группами параллельно ориентированных алифатических цепей. Для всех исследуемых пленок переход структуры в состояние с наличием ориентационного порядка сопровождается структурированием молекул в плоскости слоя, что выражается в перераспределении интенсивности в первой слоевой линии. Электронограммы на рис. 1, *г, д* были получены от структур с выраженным дальним порядком. Увеличение структурного совершенства пленок сопровождается разрешением рефлексов и в слоевых линиях с индексами $l' > 1$ (рис. 1, *д*).

Определение трех независимых параметров L , ε и γ , характеризующих степень искажения решетки пленок, проводили на основе измеренных для каждого образца профилей интенсивности I слоевых линий с индексами $l' = 1$ и $l' = 2$ (рис. 2) [2]. На рис. 3 пред-

ставлены расчетные значения корреляционной длины L и параметра ε для структур, обладающих дальним порядком в плоскости слоя (область: $L > 2,5$ нм, $0,014 < \varepsilon < 0,024$ нм^{1/2}), а также среднее квадратичное отклонение Δ_W угла наклона длинных осей молекул для структур, не имеющих дальнего порядка (область: $L < 2,5$ нм; $0 < \Delta_W < \pi/2$). Среднее квадратичное отклонение Δ_W определялось по угловому распределению интенсивности дугообразных рефлексов (см. рис. 1, *a, б*). На подложках из кремния и стекла наблюдалась тенденция к возрастанию структурного упорядочения пленок HSt с увеличением числа нанесенных монослоев. При этом пленки на стекле с числом слоев до четырех не достигают состояния с дальним порядком в плоскости слоя. В отличие от них пленки на кремнии, состоящие из двух и четырех монослоев, уже имеют дальний порядок. Иная картина наблюдается для пленок HSt на сапфире: с увеличением числа слоев их структура деградирует. Однако наиболее высокой степенью упорядоченности среди всех образцов пленок HSt обладали мономолекулярные пленки именно на сапфире.

Расчет плоской ячейки слоя показал, что для пленок HSt и стеарата свинца (PbSt₂) эта ячейка соответствует ромбической ячейке насыщенных парафинов [4]. Параметры ячейки оказались идентичными для всех подло-

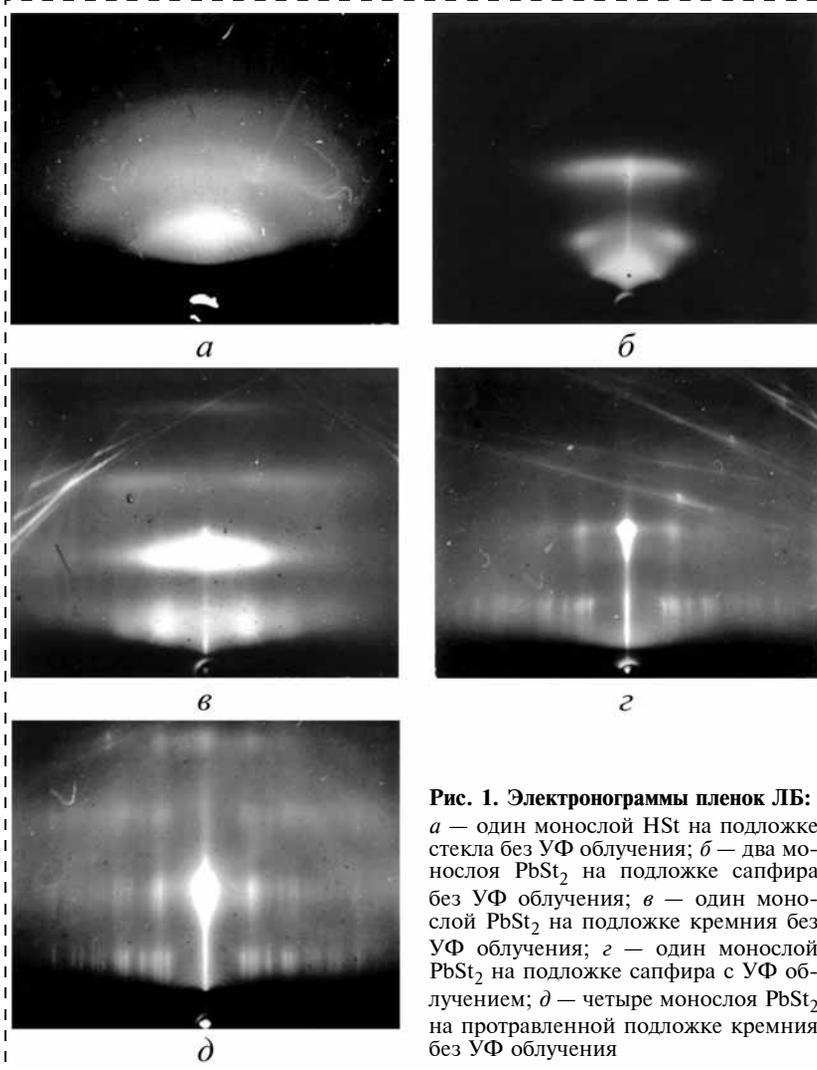


Рис. 1. Электронограммы пленок ЛБ:
a — один монослой HSt на подложке стекла без УФ облучения; *б* — два монослоя PbSt₂ на подложке сапфира без УФ облучения; *в* — один монослой PbSt₂ на подложке кремния без УФ облучения; *г* — один монослой PbSt₂ на подложке сапфира с УФ облучением; *д* — четыре монослоя PbSt₂ на протравленной подложке кремния без УФ облучения

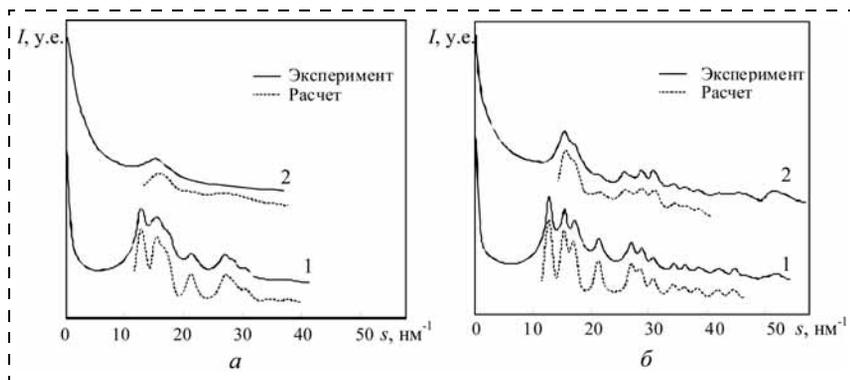


Рис. 2. Профили интенсивности I вдоль первой (1) и второй (2) слоевых линий двух образцов:

a — один монослой PbSt_2 на подложке сапфира без облучения ($\varepsilon = 0,022 \text{ нм}^{1/2}$, $\gamma = 0,032 \text{ нм}^{1/2}$, $L = 6,2 \text{ нм}$); b — четыре монослоя PbSt_2 на протравленной подложке кремния без облучения ($\varepsilon = 0,013 \text{ нм}^{1/2}$, $\gamma = 0,018 \text{ нм}^{1/2}$, $L = 8,3 \text{ нм}$)

жек и зависели лишь от наличия (или отсутствия) ионов свинца (см. таблицу). То есть, как отмечалось ранее [5], влияние подложки сводится к инициированию дефектов второго рода в структуре пленки.

Полученные результаты показывают, что степень структурных нарушений в пленке зависит как от степени соответствия плоских решеток подложки и монослоя, так и от сил взаимодействия между молекулами стеариновой кислоты и поверхностью подложки. Мы полагаем, что для инициирования структурных нарушений в монослое наиболее значимым является взаимодействие депротонированных молекул стеариновой кислоты с кислотными центрами Льюиса (КЦЛ) [6] подложки, так как в этом случае возникает ковалентная связь между молекулами стеариновой кислоты и подложки, что препятствует структурному упорядочению в монослое за счет взаимодействия алифатических цепей. Активность таких центров ($a_{\text{КЦЛ}}$) в подложках соотносится следующим образом: $a_{\text{КЦЛ}}(\text{сапфир}) > a_{\text{КЦЛ}}(\text{стекло}) > a_{\text{КЦЛ}}(\text{слюда}) > a_{\text{КЦЛ}}(\text{кремний})$ [6, 7]. В работе [8] отмечается, что сходство подрешеток слюды в плоскости спайности и пленок ЛБ HSt в базисной плоскости приводит к возникновению дальнего порядка в монослоях, но при этом наблюдается небольшое отличие от параметров плоской ячейки. В нашем эксперименте монослои HSt, нанесенные на слюду, также обладали дальним порядком, но при этом не наблюдалось изменения параметров плоской ячейки HSt. Высокую степень упорядоченности мономолекулярного слоя на поверхности сапфира также можно объяснить корре-

ляцией между структурой поверхности сапфира (0001) и плоской ячейкой HSt. В отличие от сапфира, поверхностные центры SiO_2 обладают низкой активностью, в результате с увеличением числа нанесенных монослоев структурное совершенство пленок HSt на кремнии возрастает.

Структурная упорядоченность пленок ЛБ заметно увеличивалась при наличии в субфазе соли свинца. Так, пленки PbSt_2 на подложках кремния и стекла имеют значительно меньшую флуктуацию периода и больший размер кристаллитов по сравнению с пленками HSt на этих же подложках. На подложках сапфира такое структурирующее действие ионов свинца не наблюдалось, скорее наоборот — ε возрастает, L уменьшается.

Пленки ЛБ наносили также на подложки из кремния, стекла и сапфира, которые предварительно обрабатывали гексаметилдисилазаном. Гидрофобизация подложек приводила к нейтрализации ее поверхностных центров, в результате пленки на разных подложках имели примерно одинаковые размеры кристаллитов и одинаковые значения ε , при этом наблюдалось резкое увеличение L (до 8 нм) и уменьшением флуктуации периода в базисной плоскости (до $0,014 \text{ нм}^{1/2}$).

Как видно из рис. 3, еще одним фактором, оказывающим структурирующее действие на пленки, является УФ облучение. Облучение проводили в процессе переноса монослоя с поверхности субфазы на твердую подложку. Увеличение степени структуризации пленок HSt на кремнии было заметно выше, чем для пленок PbSt_2 . В то же время на подложке из сапфира наоборот, пленка PbSt_2 структурировалась в большей степени, чем пленка стеариновой кислоты. Для пленок, нанесенных на стеклянную подложку, влияние облучения на их структурную упорядоченность было незначительным. По-видимому, степень влияния УФ излучения на структуру пленок зависит от энергии взаимодействия первого монослоя с подложкой. Воздействие излучения на подложку приводит к изменению степени ионизации ее поверхности, т. е. заселенности локальных поверхностных уровней. Если при этом снижается заселенность тех локальных энергетических уровней, которые способны захватывать электроны депротонированных молекул стеариновой кислоты, то вероятность образования сильных связей между подложкой и монослоем также будет снижаться. Будет ли облучение приводить к возрастанию или снижению заселенности этих уровней, зависит от материала подложки и состава субфазы. В результате в одних случаях происходит структуризация под действием облучения, а в других — нет.

Параметры плоской ячейки пленок

Вещество	a , нм	b , нм	α , °	A , нм ²
HSt	$0,492 \pm 0,006$	$0,736 \pm 0,006$	90	0,181
PbSt_2	$0,487 \pm 0,006$	$0,712 \pm 0,006$	90	0,173
AlSt_3	$0,780 \pm 0,006$	$0,76 \pm 0,02$	74,8	0,191

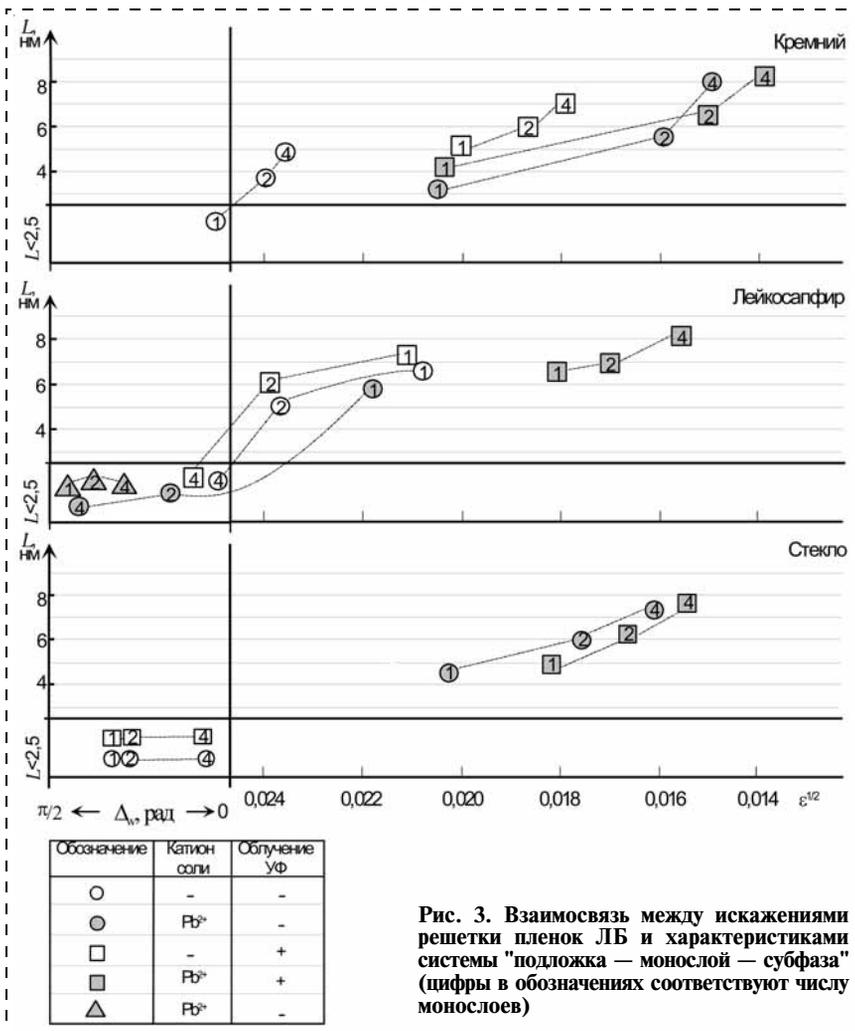


Рис. 3. Взаимосвязь между искажениями решетки пленок ЛБ и характеристиками системы "подложка — монослой — субфаза" (цифры в обозначениях соответствуют числу монослоев)

твердыми и обладают собственной структурой, молекулы ГФХ образуют на поверхности воды адсорбционный слой, находящийся в равновесии с молекулами в жидкой фазе. Для компенсации ухода молекул ГФХ в воду в процессе переноса их на твердую подложку требовалось непрерывное перемещение барьера, при этом подложка погружалась в воду и выходила из воды под углом $\approx 30^\circ$ к поверхности. Исследование полученных пленок методом ДЭВЭО показало, что их структура копирует структуру субстрата (пленок HSt), таким образом, наблюдается явление псевдоморфизма, поскольку структура полученных пленок отличается от структуры кристаллов ГФХ. На рис. 6 приведены электронограммы пленок, содержащих 6 и 12 монослоев ГФХ, из которых видно, что с увеличением толщины пленки ее структурная упорядоченность нарушается. При использовании подложки кремния без структурирующих слоев формирование упорядоченной структуры ГФХ не наблюдалось. Таким образом, можно говорить о структуризации пленок ГФХ на поверхности пленки HSt, возникающей в результате жидкостно-молекулярной эпитаксии.

Что касается пленок AlSt_3 и SbSt_3 , то независимо от типа используемых подложек данные электронографии не выявили дальнего порядка в плоскости слоя этих молекул, т. е. деструктурирующее влияние трехвалентных ионов на структуру пленок не было компенсировано влиянием подложки. На рис. 4 представлены картины малоугловой рентгеновской дифракции пленок PbSt_2 и SbSt_3 соответственно. Анализ распределения интенсивности с привлечением модели одномерного паракристалла [3] показал, что "встраивание" трехвалентных катионов в пленку оказывает деструктурирующее воздействие на пленку стеариновой кислоты по сравнению с двухвалентными металлами. Значение среднеквадратичной флуктуации Δ_n периода по нормали к подложке для SbSt_3 составляло 0,025 нм против 0,016 нм для PbSt_2 , а корреляционная длина L_{001} — 8 нм и 17 нм соответственно.

Примером регулирования подложкой структуры пленок, получаемых методом ЛБ, является образование структурированных пленок ГФХ (рис. 5) на поверхности кремния, на которую предварительно наносили пленку HSt, структура которой обладала дальним порядком в плоскости слоя. В отличие от монослоев стеариновой кислоты, которые являются

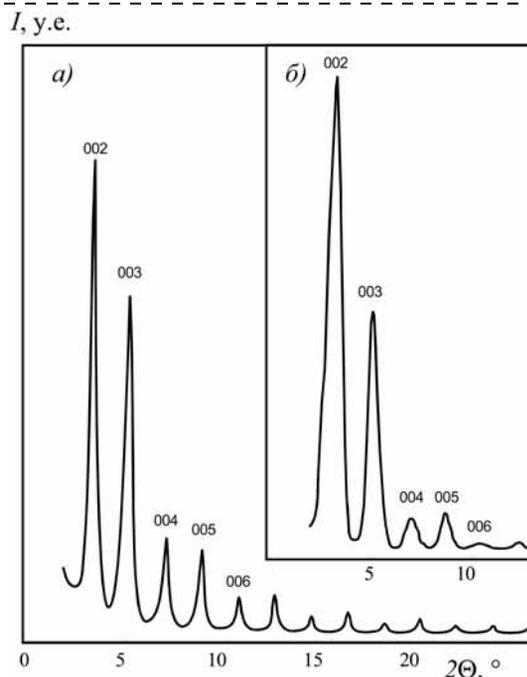


Рис. 4. Кривые малоуглового рентгеновского рассеяния на пленках ЛБ: а — восемь монослоев PbSt_2 ($c = 4,987 \pm 003$ нм, $L_{001} = 17$ нм, $\Delta_n = 0,016$ нм); б — восемь монослоев SbSt_3 ($c = 5,002 \pm 005$ нм, $L_{001} = 8$ нм, $\Delta_n = 0,025$ нм)

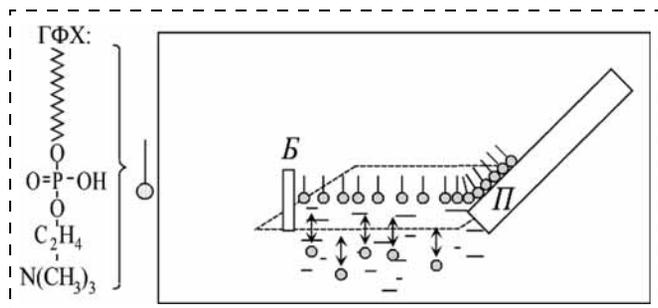


Рис. 5. Структурная формула ГФХ и схема нанесения моно- и мультислоев ограниченно растворимого поверхностно-активного вещества (Б — сжимающий барьер, П — подложка)

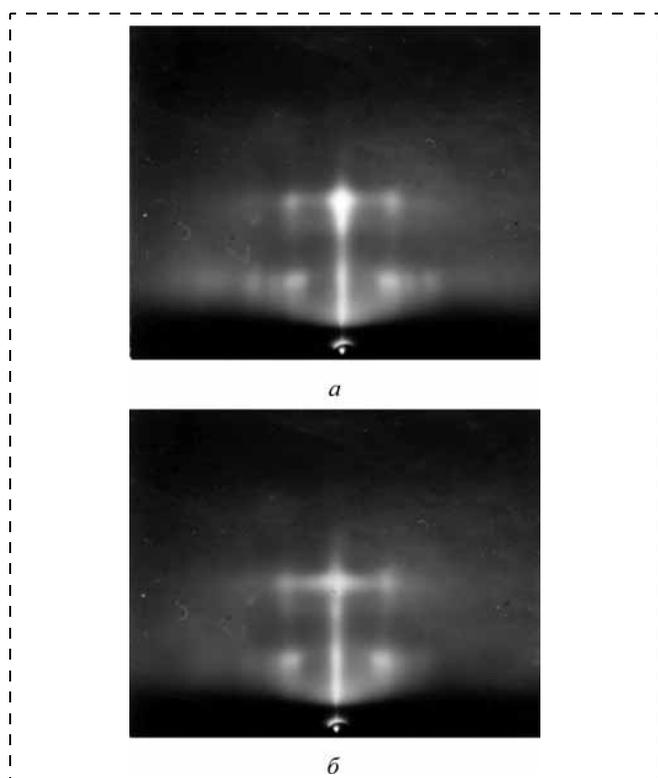


Рис. 6. Электронограммы пленок ГФХ на подложке кремния с пленкой стеариновой кислоты:

а — 6 монослоев ГФХ; б — 12 монослоев ГФХ

Выводы

Существенными факторами, влияющими на структуру прилегающих к подложке слоев пленок ЛБ, являются активность поверхностных центров и структура поверхностного слоя подложки.

Продемонстрированы возможности метода ДЭ-ВЭО при анализе искажений решетки пленок ЛБ.

Пленки, образованные при переносе на подложку методом ЛБ адсорбированных на поверхности воды молекул ГФХ, наследуют структуру пленки ЛБ стеариновой кислоты, что свидетельствует о возможности эпитаксии органических молекул на поверхности твердого субстрата.

Работа выполнена в рамках Программы стратегического развития университета (СПбГЭТУ "ЛЭТИ") "Развитие междисциплинарных исследований и инструментально-технологической базы как основа непрерывного инженерного образования по приоритетным направлениям российской экономики" на 2012—2016 годы.

Список литературы

1. **Нанотехнология:** физика, процессы, диагностика, приборы / Под ред. В. В. Лучинина, Ю. М. Таирова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 552 с.
2. **Карагеоргиев П. П., Карагеоргиева В. В., Лучинин В. В., Казак-Казакевич А. З.** Переходные слои в пленках Ленгмюра—Блоджетт // Кристаллография. 1998. Т. 43. № 6. С. 1027—1036.
3. **Hosemann R., Bagchi S. N.** Direct Analysis of Diffraction by Matter. Amsterdam: North-Holland. 1962. 734 p.
4. **Вайнштейн Б. К., Ключковская В. В.** Структура пленок Ленгмюра—Блоджетт // Кристаллография. 1994. Т. 39. № 2. С. 301.
5. **Китайгородский А. И.** Молекулярные кристаллы. М.: Наука, 1971. 424 с.
6. **Моррисон С. Р.** Химическая физика поверхности твердого тела. М.: Мир, 1980. 488 с.
7. **Бремер Г., Вендланд К. П.** Введение в гетерогенный катализ. М.: Мир, 1988. 160 с.
8. **Schwartz D. K., Viswanathan R., Garnaes J., Zasadzinski J. A.** Influence of cations, alkane chain length, and substrate on molecular order of Langmuir-Blodgett films // J. Amer. Chem. Soc. 1993. V. 115. P. 7374.

УДК 621.315

В. В. Лучинин¹, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,
Е. Н. Муратова¹, ассистент,
А. А. Шемухин², мл. науч. сотр.,
e-mail: cmid_leti@mail.ru,

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

² Научно-исследовательский институт им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

МАТРИЦЫ ИЗ ПОРИСТОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ КАК КАПИЛЛЯРНЫЕ МАТРИЦЫ- ШАБЛОНЫ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Поступила в редакцию 04.10.2013

Созданы капиллярные матрицы из оксида алюминия с различными структурными параметрами, которые были исследованы на прохождение через них заряженных пучков ионов. Коэффициент прохождения ионов через мембраны равен 0,625.

Ключевые слова: пористый оксид алюминия, мембраны, капилляры, ионные пучки, эффект фокусировки

Введение

Интенсивно исследуемый в последние десятилетия пористый анодный оксид алюминия ($\text{por-Al}_2\text{O}_3$) по своей структуре является идеальной диэлектрической матрицей из нанокапилляров [1]. Особенность $\text{por-Al}_2\text{O}_3$ заключается в том, что в процессе электрохимического анодирования он проявляет способность к самоорганизации, образуя структуру с заданной геометрией при вариации технологических условий [2, 3]. В настоящее время мембраны на основе $\text{por-Al}_2\text{O}_3$ являются перспективным материалом для применения в различных областях (от создания миниатюрных приборов для микробиологии до термоэлектрических преобразователей) [3, 4]. Представляют интерес исследования по использованию мембран $\text{por-Al}_2\text{O}_3$ в качестве диэлектрической фокусирующей матрицы, обеспечивающей транспортировку пучков ускоренных заряженных частиц через диэлектрические ка-

пилляры, что должно позволить локализовать высокоэнергетическое ионное воздействие [5, 6].

Целью данной работы является создание прочных нанопористых мембран на основе оксида алюминия и экспериментальные исследования по прохождению пучков положительных ионов через искусственно создаваемые наноразмерные каналы — капилляры.

Изготовление нанопористых мембран

В качестве исходного материала была выбрана алюминиевая фольга толщиной от 10 до 100 мкм. Экспериментальные образцы представляли собой пластины размерами 15×15 мм. Толщина фольги была выбрана так, чтобы длина свободного пробега анализирующих частиц была меньше. Согласно расчетам, проведенным с помощью программы SRIM 2011 [7], проективный пробег ионов гелия в оксиде алюминия составляет 3,37 мкм.

Для получения $\text{por-Al}_2\text{O}_3$ в СПбГЭТУ на кафедре микро-, нанoeлектроники была сконструирована однокамерная ячейка [8] с помощью которой проводили электрохимическое травление. В устройстве предусмотрена возможность контроля температуры подложки Al. Формирование слоев $\text{por-Al}_2\text{O}_3$ проводили электрохимическим анодированием в потенциостатическом режиме в электролитах на основе серии составов (растворы H_2SO_4 и H_3PO_4) [9] в течение 10...60 мин при температурах от 0 до 15 °С. Напряжение анодирования выбиралось из диапазонов 15...30 В и 130...160 В в зависимости от выбранного электролита.

Исследование строения и основных параметров (диаметр пор, межпорное расстояние, толщина пористого слоя) полученных образцов проводили при использовании растровых электронных микроскопов (РЭМ) при низком ускоряющем напряжении 10...20 кВ в режиме высокого вакуума, что позволило исследовать диэлектрические образцы без предварительного нанесения металлов.

Как показали результаты исследований, наиболее оптимальным режимом получения мембран для поставленных в работе целей является анодирование в электролите на основе раствора H_2SO_4 при напряжении $U = 27$ В, температуре $T = 5$ °С в течение $t = 30$ мин, а также в электролите на основе раствора H_3PO_4 при напряжении $U = 130$ В и температуре $T = 8$ °С в течение $t = 20$ мин. На рис. 1 приведены РЭМ-изображения мембран, используемых для проведения экспериментов.

При использовании электролита на основе серной кислоты формируются мембраны толщиной 12...18 мкм, со средним диаметром пор 20 нм, тол-

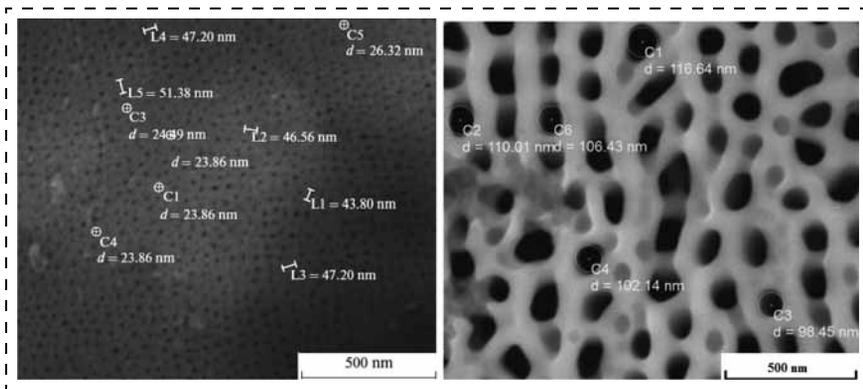


Рис. 1. РЭМ — изображения мембран, полученных в электролитах на основе серной (а) и ортофосфорной (б) кислот

щиной барьерного слоя ≈ 200 нм и концентрацией пор у них 350 шт./ $\mu\text{м}^2$. В свою очередь, геометрические параметры мембран, полученных в электролите на основе ортофосфорной кислоты, следующие: средний диаметр пор 80 нм, толщина пористого слоя $4\text{--}7$ $\mu\text{м}$, толщина барьерного слоя ≈ 200 нм, концентрация пор $50/\mu\text{м}^2$. Несмотря на то, что во всех образцах присутствует барьерный слой, он не стравливался, так как использовались пучки высоких энергий. Кроме того, отработана технология по созданию топологически упорядоченных пористых слоев с диаметром пор до нескольких микрометров.

Экспериментальные исследования прохождения высокоэнергетических пучков ионов

Эксперименты по облучению проводили на ускорительном комплексе АН-2500 в НИИЯФ МГУ [10]. Для проведения была создана специальная экспериментальная камера, включающая в себя коллимирующие диафрагмы, систему мониторинга пучка, систему детектирования обратнорассеянных ионов и гониометрическую систему. Коллимированный пучок ионов He^+ с энергией $1,7$ МэВ попадает на мембрану, где одна часть пучка проходит через капилляры и регистрируется с помощью цилиндра Фарадея, а другая часть рассеивается и регистрируется с помощью полупроводникового детектора. Во всех экспериментах детектируемый угол рассеяния составлял 120° . Диаметр пучка на мембране составлял 1 мм. Остаточное давление в камере не превышало $5 \cdot 10^{-4}$ Па. Плотность тока на мишени поддерживалась постоянной и составляла 4 нА.

На рис. 2 представлена зависимость числа пролетевших частиц от угла наклона мишени для пористой мембраны с диаметром пор порядка 20 нм. Видно, что интенсивность прошедшего пучка практически не меняется в пределах $2,5^\circ$. Ослабление сигнала в два раза соответствует повороту мишени на 3° . Это говорит о том, что накопление заряда на внутренних стенках нанопористой мембраны ведет к эффекту фокусировки (guiding-эффект). Максимальный измеренный коэффициент пропускания соответствует $0,625$, что на несколько порядков больше, чем приведенный в работе [1]. Сравнимый коэффициент пропускания в [1] получен для

стеклянных капилляров с отверстием $5\text{--}10$ $\mu\text{м}$.

Отметим, что в работе [11] при исследовании прохождения 2 МэВ пучка гелия через мембрану с диаметром пор 60 нм число прошедших ионов существенно не меняется при повороте мембраны на $1,6^\circ$. Предполагается, что столь большое расхождение связано с тем, что не был удален барьерный слой в 200 нм.

Подтверждают большой коэффициент пропускания созданных мембран и исследования, проведенные с помощью метода Резерфордского обратного рассеяния (РОР) в сочетании с каналированием. Измеренный интегральный выход обратнорассеянных ионов представлен на рис. 3.

В процессе исследований пучок ионов He^+ диаметром 1 мм наводился на поверхность образца. С помощью манипулятора в горизонтальной плоскости X устанавливался угол падения пучка зонди-

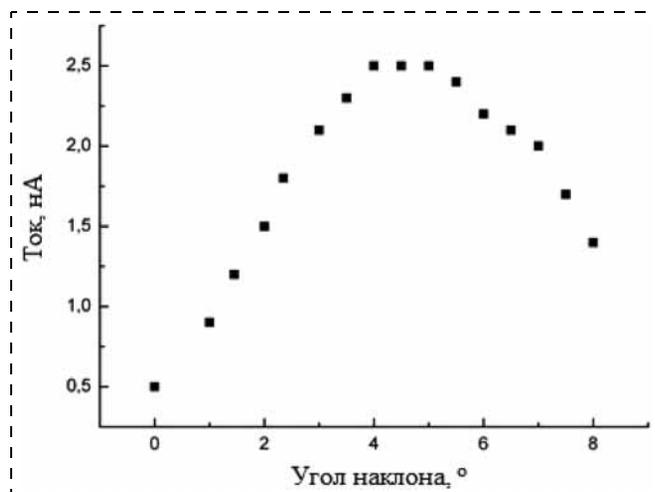


Рис. 2. Зависимость числа пролетевших ионов He^+ с энергией $1,7$ МэВ от угла наклона образца. Диаметр пор 20 нм

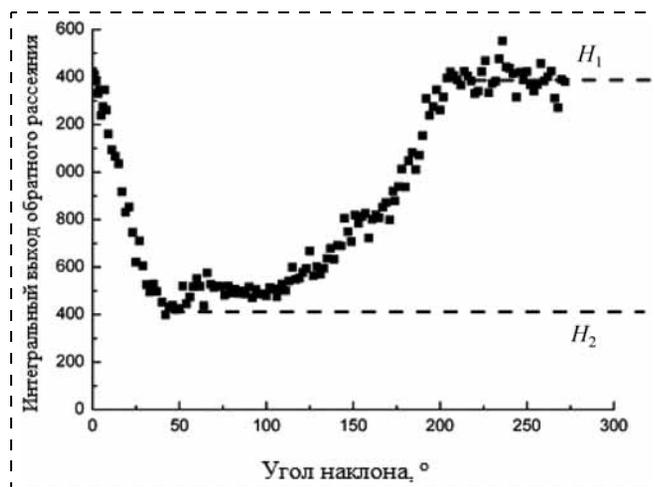


Рис. 3. Зависимость интегрального выхода обратнорассеянных ионов от угла наклона образца

рующих ионов $\Psi_x = 7^\circ$ и проводилась запись спектра РОР образца в отсутствие каналирования (H_1). Затем угол Ψ_x ступенчато уменьшался, и на каждом шаге выполнялась запись энергетического спектра РОР. Это позволило построить зависимость выхода рассеянных ионов от угла падения пучка зондирующих ионов. В том случае, когда направление падения пучка ионов совпадает с низкоиндексным кристаллографическим направлением, вследствие эффекта каналирования наблюдается минимальный выход рассеянных ионов (H_2).

Заключение

Созданы диэлектрические матрицы с капиллярами, размеры диаметра которых варьируются в диапазоне 20...100 нм, а высота в диапазоне 4...20 мкм. Впервые исследовано прохождение заряженных пучков ионов через капилляры нанопористых диэлектрических мембран с диаметром пор около 20 нм. Полученный коэффициент прохождения ионов через мембраны, равный 0,625, предполагает возможность их использования как капиллярных матриц-шаблонов для локализации воздействия ионов высоких энергий.

Работа выполнена в рамках Программы стратегического развития университета (СПбГЭТУ "ЛЭТИ") "Развитие междисциплинарных исследований и инструментально-технологической базы как основы непрерывного инженерного образования по приоритетным направлениям российской экономики" на 2012—2016 годы.

Список литературы

1. Комаров Ф. Ф., Камышин А. С., Гришин П. А. Фокусировка ионных пучков диэлектрическими микро- и нано-

капиллярными структурами // Журнал нано- и электрон-ной физики, 2013. Т. 5, № 1. С. 01015.

2. Masuda H., Abe A., Nakao M. et al. Ordered Mosaic Nanocomposites in Anodic Porous Alumina // J. Adv. Mater., 2003. N 15 (2). P. 161—164.

3. Nanostructured Materials in Electrochemistry / Ed. by Ali Eftekhari / WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. 2008. 463 p.

4. Зими́на Т. М., Мура́това Е. Н., Спива́к Ю. М. и др. Технологии формирования и применение нанослоев и нанопористых композиций Al_2O_3 для микро- и нанотехники // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 12. С. 15—24.

5. Шемухин А. А., Балакшин Ю. В., Черных П. Н. и др. Спектроскопия рассеяния ионов средних энергий: изучение аморфизации германия под действием ионного облучения // Поверхность. 2013. № 4. С. 25—28.

6. Шемухин А. А., Балакшин Ю. В., Черных В. С. и др. Формирование ультратонких слоев средних энергий: изучение аморфизации германия под действием ионного облучения // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. Вып. 19. С. 83—89.

7. Ziegler J. F., Ziegler M. D. and Biersack J. P. SRIM — The stopping and range of ions in matter. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 268. 2010. P. 1818—1823.

8. Пат. РФ № 122385 U1 / П. Г. Травкин, Е. Н. Соколова (Мура́това), Ю. М. Спива́к, В. А. Мошников. Электрохимическая ячейка для получения пористых анодных оксидов металлов и полупроводников. Опубл. 27.11.2012 Бюл. № 33. МПК C25D11/00 (2006.01), C25D19/00 (2006.01). Решение о выдаче патента от 01.08.12 по заявке на полезную модель № 2012122692. Роспатент.

9. Мура́това Е. Н., Спива́к Ю. М., Мошников В. А. и др. Влияние технологических параметров получения слоев нанопористого Al_2O_3 на их структурные характеристики // Физика и химия стекла. 2013. Т. 39. № 3. С. 473—480.

10. Черных П. Н., Чеченин Н. Г. Методика ионно-пучкового анализа на ускорителе HVEE AN-2500: учеб. пособие. М.: Изд-во Учебно-научного центра МГУ. 2011. 41 с.

11. Zhu Z., Zhu D., Lu R. et al. The experimental progress in studying of channeling of charged particles along nanostructure // Proc. of SPIE, Bellingham, WA. 2005. Vol. 5974. P. 13.

12. Ziegler, J., Biersack, J. The stopping and range of ions in matter. SRIM2003 2003. URL: <http://www.srim.org>.

УДК 621.382, 621.389

В. Е. Калёнов, инженер,

e-mail: dexter_mail@inbox.ru,

А. П. Бройко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

А. В. Корляков, д-р техн. наук, директор НОЦ "Нанотехнологии",

И. К. Хмельницкий, канд. хим. наук, науч. сотр.,

Д. А. Чигирев, канд. техн. наук, инженер,

Ю. О. Быков, инженер,

А. В. Лагош, инженер,

А. И. Крот, инженер,

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)"

МИКРОДВИЖИТЕЛИ ДЛЯ МИКРОРОБОТОТЕХНИКИ

Поступила в редакцию 04.10.2013

Представлены результаты анализа основных микро-механических преобразователей запасенной или внешней индуцируемой энергии в механическое перемещение с учетом возможности их применения в микроробототехнике.

Проведено сравнение основных характеристик преобразователей: КПД, развиваемых усилий, перемещений, быстродействия. Обсуждаются результаты исследований преобразователей на основе электроактивных полимеров, перспективных для микроробототехники.

Ключевые слова: микромеханика, микроактюаторы, микророботы, электроактивные полимеры

Введение

Создание высокотехнологичных недорогих, энергетически эффективных подвижных микросистем актуально для нового поколения микротехники.

При движении микрообъектов действуют принципиально иные соотношения между силами и моментами. Массы миниатюрных микрообъектов малы, а силы сухого и вязкого трения, поверхностного натяжения и адгезии велики в сравнении с силами тяжести. Как указано в работе [1, п. 2.2] "в связи с миниатюрностью подвижных микрообъектов методы их передвижения и движители существенно отличаются от традиционных.... при числах Рейнольдса порядка 10^{-3} ... 10^{-4} теряет смысл концепция дви-

Характеристики микромеханических преобразователей [2]

Тип актюатора	Разрешение (минимальные относительные деформации), ε_{\min}	Частотный диапазон работы f_{\max} , Гц	Максимальная плотность рассеиваемой мощности p_{\max} , Вт/м ²	КПД η
Пьезоэлектрический	$10^{-9} \dots 10^{-7}$	$5 \cdot 10^5 \dots 3 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^8 \dots 1 \cdot 10^9$	0,90...0,99
Пьезоэлектрические полимеры	$10^{-8} \dots 10^{-7}$	$1 \cdot 10^5 \dots 1 \cdot 10^7$	$\approx 3 \cdot 10^8$	0,90...0,95
Термомеханические ($\Delta T = 10$ К)	$10^{-5} \dots 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-1} \dots 9 \cdot 10^0$	$\approx 6 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^{-5} \dots 3 \cdot 10^{-4}$
Термомеханические ($\Delta T = 100$ К)	$10^{-5} \dots 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-1} \dots 9 \cdot 10^0$	$\approx 6 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^{-4} \dots 3 \cdot 10^{-3}$
Магнестрикционные	$10^{-7} \dots 10^{-6}$	$\approx 3 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^8 \dots 7 \cdot 10^8$	0,8...0,99
Структуры памяти формы	$10^{-5} \dots 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-2} \dots 7 \cdot 10^0$	$7 \cdot 10^5 \dots 1 \cdot 10^8$	0,01...0,02
Магнитоэлектрические (на основе движущихся магнитных катушек)	$10^{-6} \dots 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^5 \dots 2 \cdot 10^6$	0,5...0,8
Магнитоэлектрические (на основе соленоидов)	$10^{-4} \dots 10^{-2}$	$5 \cdot 10^0 \dots 8 \cdot 10^1$	$1 \cdot 10^4 \dots 4 \cdot 10^4$	0,5...0,8
Пневматические	$10^{-5} \dots 10^{-4}$	$5 \cdot 10^1 \dots 3 \cdot 10^2$	$\approx 5 \cdot 10^6$	0,3...0,4
Гидравлические	$10^{-5} \dots 10^{-4}$	$5 \cdot 10^1 \dots 3 \cdot 10^2$	$\approx 5 \cdot 10^8$	0,9...0,98

гателей, основанных на использовании фактора инертности, таких как винты, пропеллеры, весла, реактивные двигатели, и обсуждение программ разработки и создания микровинтовых или микрореактивных двигателей для самопродвижной микробъектов при таких малых числах Рейнольдса настолько же абсурдно, как и колебания корпуса реактивного лайнера с целью использования вязкого трения, которое составляет миллиардную долю фактора инерционности при полете лайнера". Поэтому при выборе движителя для микробъекта определяющими характеристиками являются не только усилия и перемещение, но и частотные характеристики.

Существует большое число физических систем, преобразующих внешнюю и запасенную энергию в механическое движение. В зависимости от энергопотребления, быстродействия, видов и точности обработки движений применяют разные микромеханические преобразователи, актюаторные элементы систем.

Микромеханические преобразователи по типу преобразования внешней или запасенной энергии в механическое движение можно условно разделить на две группы:

- непосредственного преобразования внешней или запасенной энергии в механическое движение;
- многоступенчатого преобразования внешней или запасенной энергии в механическое движение.

Актюаторы непосредственного преобразования энергии достаточно широко применяют в микромеханических системах, к ним относят: электростатические, термомеханические, магнестатические, пьезоэлектрические, пневматические, химические.

Наиболее часто встречающимся актюатором многоступенчатого преобразования является актюатор со следующей последовательностью преобразования энергии: электрическая — тепловая — механическая. К этому типу преобразования относят актюаторы:

- на основе биметаллических конструкций;
- на основе эффекта памяти формы;
- на основе теплового фазового перехода.

Основными характеристиками, определяющими вид преобразователя при создании актюаторов для микророботов, являются КПД, быстродействие, развиваемые максимальные усилия и перемещение. В табл. 1 представлены основные параметры микромеханических преобразователей. Более подробно рассмотрим лишь наиболее перспективные из них — электростатические, пьезоэлектрические, термоэлектрические, магнитоэлектрические.

Электростатические актюаторы

Электростатические актюаторы применяют для создания различных видов микроустройств, основанных на преобразовании запасенной электрической энергии в поступательное и вращательное механическое движение. Наиболее известные — это релейные элементы для ВЧ техники, микрозахваты и микрощипцы для медицины, различные вращательные (роторные) движители и др. (см. ниже табл. 2).

Широкое применение электростатических преобразователей в микросистемной технике связано с их достоинствами: управляющим сигналом является напряжение, легко регулируемое электрическим способом; высокое быстродействие; низкая потребляемая мощность; высокий КПД. Усилия, развиваемые большинством электростатических преобразователей, находятся в диапазоне $10^{-6} \dots 10^{-3}$ Н, при этом могут быть достигнуты относительно большие перемещения до 200 мкм [3].

К недостаткам электростатических актюаторов, ограничивающих их область применения, можно отнести высокое управляющее напряжение, а также высокие требования, предъявляемые к условиям окружающей среды, поскольку существующие в преобразователе электрические поля притягивают пыль, также возможен выход из строя за счет образования конденсата, капель воды на обкладках или в зазоре между ними из-за высокой влажности. Поэтому электростатические преобразователи необходимо изолировать от окружающей среды путем корпусирования или вакуумирования. В связи с этим такие актюаторы редко используют для создания движителей.

Пьезоэлектрические актюаторы

В общем случае пьезоэлектрический преобразователь представляет собой упругий элемент из пьезоматериала или многослойную структуру, где, по крайней мере, один слой обладает пьезоэлектрическими свойствами. Максимальная сила, развиваемая пьезоэлектрическими актюаторами, перекрывают диапазон от 10^{-5} до 10^{-3} Н, при этом максимальное перемещение составляет $10^{-7} \dots 10^{-3}$ м [3], также они, как и электростатические актюаторы, обладают высокими быстродействием и КПД.

Известны пьезоэлектрические актюаторы для создания микроробототехнических систем. В статье [4] описана конструкция движителя микроробота (рис. 1, см. третью сторону обложки), площадью 3×3 мм с использованием преобразователя на основе обратного пьезоэффекта. Размер пьезоэлектрического актюатора $2,85 \times 0,45 \times 0,094$ мм, при этом максимальное управляющее напряжение составляет 3,6 В.

Пьезоэлектрические преобразователи, помимо создания движителей поступательного механического перемещения, также используются для создания вращательного механического движения. Примеры вращательных пьезоэлектрических движителей и их характеристики представлены ниже в табл. 2.

Ограничением к широкому использованию пьезоэлектрических актюаторов для создания микродвижителей является сложность технологического процесса получения тонких пленок пьезоматериалов с заданными и воспроизводимыми пьезоэлектрическими характеристиками. Но несмотря на все сложности, ведутся исследования по нанесению тонких пленок пьезоматериалов. Так, в Центре микротехнологии и диагностики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета разработана технология изготовления мембранных элементов, в состав которых входит пленка нитрида алюминия [5].

Термомеханические актюаторы

Тепловые процессы — относительно медленные и трудноуправляемые, поэтому непригодны для создания приводов макрообъектов, но на микроуровне осуществлять управляемый нагрев и охлаждение ограниченных микрообъемов можно с достаточно большой скоростью благодаря размерным эффектам [6].

Термомеханические, или тепловые, преобразователи являются наиболее распространенным видом актюаторов, используемых для создания микродвижителей для микророботов. Как правило, они представляют собой биморфные струк-

туры с разными тепловыми коэффициентами расширения (ТКР), либо структуры с областями с разной температурой нагрева, либо конструкции, состоящие из одного материала, который расширяется вследствие нагрева [7]. С помощью тепловых преобразователей возможно получение больших деформаций, но эти преобразователи требуют больших энергетических затрат на разогрев и поэтому обладают малым КПД. К недостаткам можно отнести низкое быстродействие по сравнению с электростатическими преобразователями, так как процессы нагрева и остывания являются инерционными. В отличие от пьезоэлектрических актюаторов, технологический процесс изготовления тепловых преобразователей относительно прост.

Известны конструкции тепловых микродвижителей состоящих из кремниевого каркаса и трапециевидных полиимидных вставок. При нагреве полиимид расширяется, что приводит к деформации всей конструкции. На основе такого теплового актюатора был разработан микроробот размером $15 \times 5 \times 0,5$ мм, перемещающийся со скоростью 6 мм/с на шести парах тепловых актюаторов длиной 1 мм, с управляющим напряжением 18 В и способным перемещать грузы массой до 2,5 мг [8]. Принцип движения микроробота, основанный на попеременном включении—выключении тепловых актюаторов, представлен на рис. 2.

Интересным конструкционным решением является использование биморфной полимерной структуры, где один из слоев обладает низким ТКР, а другой высоким, тем самым обеспечивая хорошую пластичность и износостойкость преобразователя. Микроробот площадью 1 см^2 состоит

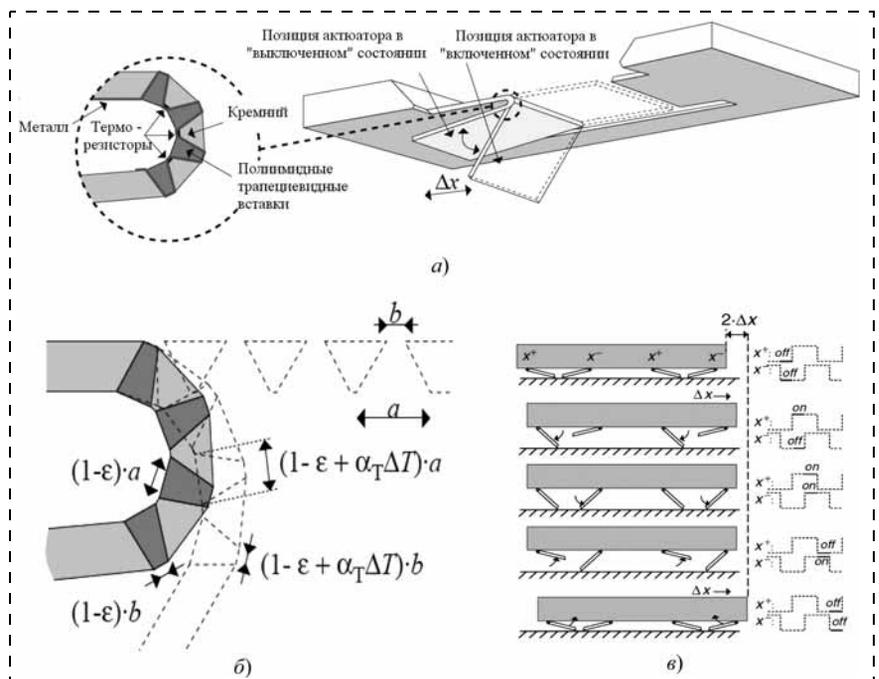


Рис. 2. Микроробот на основе теплового актюатора, состоящего из кремниевого каркаса с полиимидными трапециевидными вставками [9]:

a — конструкция актюатора; b — принцип работы актюатора; c — принцип передвижения; ε — относительные деформации; α_T — ТКР; ΔT — изменение температуры; a, b — линейные размеры полиимидной трапециевидной вставки

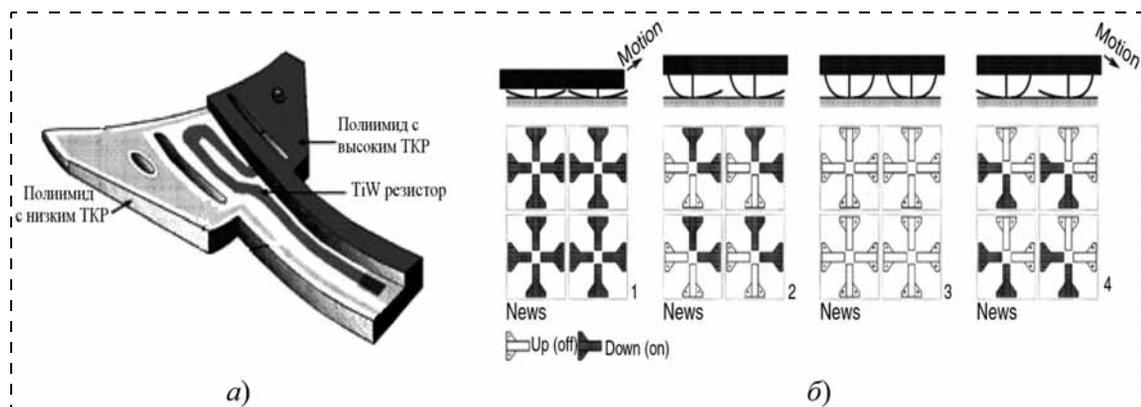


Рис. 3. Микроробот на основе теплового актюатора, состоящего из двух полиимидных слоев с разными ТКР [10]: а — конструкция актюатора; б — принцип передвижения

из массива 8×8 тепловых актюаторов. Принцип перемещения, основанный на поочередной работе каждого актюатора, показан на рис. 3. Параметры микроробота представлены ниже в табл. 2.

Магнитоэлектрические актюаторы

Магнитоэлектрические актюаторы не нашли широкого применения для создания микродвижителей для микророботов, хотя иногда встречаются движители роторного типа на основе магнитоэлектрических преобразователей (табл. 2). Это связано, во-первых, с необходимостью использовать постоянные магниты или катушки для создания магнитного поля, которые, в свою очередь, имеют большую массу и размеры, что не приемлемо для микророботов. Такие преобразователи лучше всего подходят для случаев больших токов и напряжений. Они малочувствительны к влажности и пыли, но имеют большую рассеиваемую мощность. Но в то же время

по своим динамическим характеристикам они не уступают электростатическим и пьезоэлектрическим приводам, с их помощью возможно создание больших деформаций. Обычно магнитоэлектрические актюаторы могут создавать максимальные усилия от 10^{-7} до 10^{-4} Н, при этом максимальное перемещение составляет от 10^{-5} до 10^{-3} м [3].

В качестве магнитоэлектрических актюаторов используют структуры, состоящие из тонких пленок из ферромагнитных материалов, например никеля. Основным компонентом таких преобразователей является тонкопленочная структура пластины, которая поддерживает электролитический пермалловый участок, генерирующий механическую силу и вращающий момент при условии помещения его в магнитное поле. Но такие актюаторы используются реже, чем основанные на действии силы Лоренца на проводник с током. Это связано с трудностью создания намагниченных тонких пленок.

Таблица 2

Характеристики микроробототехнических систем

Тип привода	Размер, 10^{-9} , м ³	Скорость, с ⁻¹ или рад/с*	Усилия, Н	Момент, Н·м	Плотность энергии, Вт/м ³	КПД	Ссылка
Электростатический для поступательного механического перемещения	400	5000	10^{-7}	—	200	Нет данных	[11]
Электростатический для вращательного механического перемещения	$\pi/4 \times 0,5^2 \times 3$	40*	—	$2 \cdot 10^{-7}$	900	Нет данных	[12]
Пьезоэлектрический для вращательного механического перемещения	$\pi/4 \times 1,5^2 \times 0,5$	30*	—	$2 \cdot 10^{-11}$	0,7 $90 \cdot 10^3$	Нет данных 2,5 %	[13] [14]
	$\pi/4 \times 4,5^2 \times 4,5$	1,1*	—	$3,75 \cdot 10^{-3}$			
Магнитоэлектрический для поступательного механического перемещения	$0,4 \times 0,4 \times 0,5$	1000	$2,9 \cdot 10^{-6}$	—	3000	Нет данных	[15]
Магнитоэлектрический для вращательного механического перемещения	$2 \times 3,7 \times 0,5$	150*	—	10^{-6}	3000	0,002 %	[16]
Термомеханический	$0,27 \times 0,02 \times 0,002$	2	Нет данных	—	20000 < 10000	Нет данных	[17] [7]
	$0,4 \times 0,4 \times 0,01$	1..60		$69 \cdot 10^{-6}$ Н/мм ²			
Термомеханический на основе кремниевого каркаса с полиимидными вставками	$0,75 \times 0,6 \times 0,03$	3...300	10^{-3}	—	10^5	Рассеиваемая мощность $\approx 16,7 \cdot 10^{-3}$ 0,001 %	[5]

* Вращательные актюаторы, скорость которых измеряется в рад/с

Полимерные электроактивные актюаторы

Особый интерес и отдельный класс преобразователей представляют актюаторы, работающие на основе преобразования энергии химических реакций в механическое движение. Одним из таких преобразователей являются актюаторы на основе электроактивных полимеров (ЭАП).

Принцип работы такого преобразователя основан на перераспределении ионов в ионно-обменных мембранах при приложении электрического поля, вследствие чего происходит деформация мембраны (рис. 4).

Ионообменные мембраны представляют собой полимерный пористый материал, построенный на основе гибких полимерных цепей, повторяющиеся звенья которых на основе алифатических циклических, ароматических углеводородных фрагментов или перфторированных звеньев содержат функциональные группы ($-\text{SO}_3\text{H}$, $-\text{PO}_3\text{H}$, $-\text{COOH}$, $-\text{NH}_2\text{OH}$ и т. д.). Протоны или OH -группы последних могут замещаться на ионы, содержащиеся в контактирующих с мембраной растворах. В настоящее время существует большое число мембранных материалов, часть из которых производится на промышленной основе, а часть создается и используется в основном в исследовательских целях.

Природа образующих мембрану фрагментов весьма разнообразна. Если основные углеводородные или перфторированные цепочки являются гидрофобными, то функциональные группы, напротив, гидрофильны. В совокупности с гибкостью основных цепей это неизбежно приводит к протеканию процессов самоорганизации при формировании мембран. По принципу "подобное растворяется в подобном" совокупность углеводородных или перфторированных цепей образует основу мембраны, а функциональные группировки объединяются в небольшие островки или кластеры, размер которых (несколько нанометров) зависит от гибкости цепей.

Тот факт, что размер кластеров составляет несколько нанометров, определяет принадлежность мембран к наноструктурированным объектам. Именно эта организация структуры мембран на наноразмерном уровне и определяет основные свойства мембран, в первую очередь, транспортные, которые делают возможным их обширное практическое применение. При этом гидратация приводит к существенному изменению размера пор и транспортных свойств мембраны.

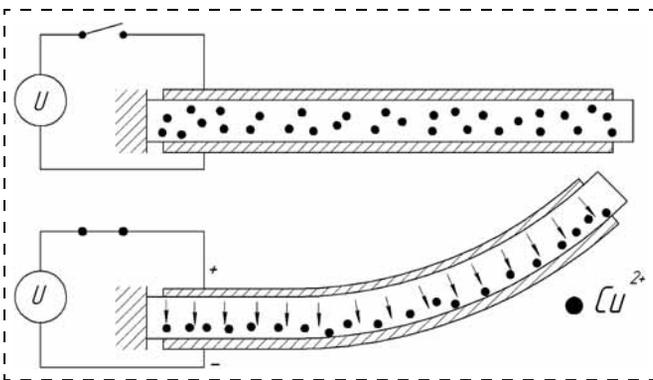


Рис. 4. Принцип работы полимерного электроактивного актюатора

Транспортные процессы в мембранах, в первую очередь, связаны с особенностью их строения, а именно, с наличием в них развитой системы пор и каналов. Процессы переноса в мембранных материалах являются достаточно сложными. Они всегда сопровождаются сорбцией ионов или молекул на поверхности и включают собственно перенос и десорбцию.

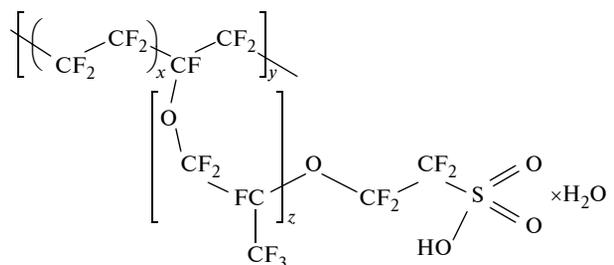
В основе процессов переноса ионов в растворах и в ионно-обменных материалах лежат два механизма: диффузия в широком смысле и конвекция. Скорость протекания диффузионных процессов определяется произведением подвижности носителей (ионов) на их концентрацию. Первый множитель полностью определяется природой подвижного иона и матрицы того материала, в котором осуществляется перенос. Конвективный перенос, имеющий место вне мембраны, а также внутри ее пор, определяется произведением скорости движения центра масс жидкости и концентрации ионов в нем.

Таким образом, вследствие своего специфического строения полимерные ионно-обменные мембраны нашли в последнее время широкое применение в микромеханике в качестве преобразователей. Это обусловлено низкими управляющими напряжениями по сравнению с электростатическими актюаторами и большими деформациями электроактивных полимерных преобразователей, а также развитой и относительно простой, недорогой технологией производства ионно-обменных мембран.

В силу своих особенностей движители на основе электроактивных полимеров, в отличие от остальных описанных актюаторов, могут еще использоваться для микророботов, работающих в жидкой среде (рис. 5, а, см. третью сторону обложки). Кроме того актюаторы на основе электроактивных полимеров вследствие высокой биосовместимости могут быть использованы в медицине (рис. 5, б, см. третью сторону обложки).

В Центре микротехнологий и диагностики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета были получены и исследованы электроактивные полимеры для решения задач по созданию микроробототехнических систем. Преобразователь представляет собой ионно-обменную мембрану, пропитанную ионами меди, длиной 3,5 см, шириной 0,3 см и толщиной 176 мкм с нанесенными с двух сторон платиновыми электродами.

Использовалась перфторированная ионно-обменная мембрана Nafion 117 толщиной 175 мкм, которая представляет собой сополимер тетрафторэтилена и сомомера, имеющего боковые цепи перфторированного винилового эфира, оканчивающиеся сульфогруппами:



Платиновые электроды были нанесены на обе стороны мембраны методом магнетронного распыления. Затем мембрана была обработана 1 М HCl течение 1 ч с последующим кипячением в деионизованной воде в течение 1 ч. Для того чтобы насытить мембрану ионами меди, она была помещена в 0,1 М раствор водный CuSO_4 на 18 ч.

После этого на часть мембран была электролизом нанесена медь. Для этого мембрана и медная пластина были опущены в 0,1 М водный раствор CuSO_4 в качестве электродов, и в течение 1 мин к ним прикладывалось напряжение 3 В. Расстояние между электродами составляло 3 см.

При приложении управляющего напряжения в 15 В радиус кривизны структуры составил несколько сантиметров (рис. 6, см. третью сторону обложки), причем радиус кривизны актюатора для мембран с медно-платиновыми электродами оказались в 1,5...2 раза выше, чем в случае актюаторов с платиновыми электродами.

Заключение

На основе проведенного исследования типов микродвижителей для микроробототехнических систем можно сделать выводы, что наиболее часто используемым принципом преобразования запасенной или внешней индуцируемой энергии в механическое перемещение является термомеханический. Это связано, прежде всего, с относительно простой и доступной технологией изготовления таких преобразователей по сравнению с пьезоэлектрическими и магнитоэлектрическими, а также возможностью создания больших усилий и перемещений по сравнению с электростатическими актюаторами.

Перспективными, с точки зрения использования микродвижителей микроробототехнических систем, являются преобразователи на основе электроактивных полимеров. С помощью таких преобразователей возможно создание значительных перемещений, и при этом полимерные электроактивные актюаторы выигрывают по энергопотреблению по сравнению с тепловыми, так как термомеханические преобразователи рассеивают большое количество энергии и вследствие этого имеют низкий КПД.

Работа выполнена при поддержке грантов Министерства образования и науки Российской Федерации по темам "Физико-технологические основы формирования высокочувствительных нано- и микромембранных элементов", соглашение № 14.В37.21.0082, "Разработка физико-химических основ и создание образца аналитической микро- нанобиосистемы для доклинической экспресс-идентификации биомаркеров инфаркта миокарда" № 14.В37.21.0793, "Разработка научных основ миниатюрных гибридных биосенсорных систем для молекулярной и клеточной экспресс-диагностики заболеваний на основе магнитно-резонансных принципов регистрации и с применением магнитных наночастиц типа ядро-оболочка для связывания, доставки и детектирования биообъектов"

№ 14.В37.21.0568 в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 годы и Программы стратегического развития университета (СПбГЭТУ "ЛЭТИ") "Развитие междисциплинарных исследований и инструментально-технологической базы как основа непрерывного инженерного образования по приоритетным направлениям российской экономики" на 2012—2016 годы.

Список литературы

1. Градецкий В. Г., Князьков М. М., Фомин Л. Ф., Чашухин В. Г. Механика миниатюрных роботов. М.: Наука, 2010. 272 с.
2. Huber J. E., Fleck N. A. and Ashby M. F. The selection of mechanical actuators based on performance indices // Proc. R. Soc. 1997. N 453. P. 2185—2205.
3. Bell D. J. MEMS actuators and sensors: observations on their performance and selection for purpose // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2005. N 15. C. 153—164.
4. Arbat A., Edqvist E., Casanova B. R., Brufau J. Design and validation of the control circuits for a micro-cantilever tool for a micro-robot // Sensors and Actuators A: Physical. 2009. N 153. C. 76—83.
5. Кривошеева А. Н. Пассивные и активные мембраны для устройств микросистемной техники. Дисс. ... на соискание ученой степени канд. техн. наук СПбГЭТУ. 2007.
6. Корляков А. В., Лучинин В. В., Никитин И. В. Применение SiC-микронагревательных систем в микросистемной технике // Микросистемная техника. 2000. № 2. С. 27—31.
7. Патент на изобрет. 2193804 РФ, МПК H 01L27/00. Полупроводниковый термомеханический микроактюатор / В. В. Лучинин, А. В. Корляков, И. В. Никитин — № 2001128523/28; заявл. 22.10.2001; опубл. 27.11.2002, Бюл. № 11, Приоритет 22.10.2001. 12 с.
8. Ebefors T. Polyimide V-groove Joints for Three-Dimensional Silicon Transducers. PhD thesis. Stockholm: Royal Institute of Technology. 2000. 144 p.
9. MEMS: applications / Ed. by Mohamed Gad-el-Hak. CRC Press Taylor & Francis Group, 2006.
10. Suh J., Glader S., Darling R., Storment C., and Kovacs G. Organic Thermal and Electrostatic Ciliary Microactuator Array for Object Manipulation // Sensors Actuators A. 1997. N 58. P. 51—60.
11. Kim C.-J., Pisano A., and Muller R. Silicon-Processed Overhanging Microgripper // IEEE/ASME J. MEMS, 1992. N 1. P. 31—36.
12. Nakamura K., Ogara H., Maeda S., Sangawa U., Aoki S., and Sato T. Evaluation of the Micro Wobbler Motor Fabricated by Concentric Buildup Process // Proc. of IEEE 8th Int. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '95). Jan. 29—Feb. 2, Amsterdam, the Netherlands. 1995. P. 374—379.
13. Udayakumar K. R., Bart S. F., Flynn A. M., Chen J., Tavrow L. S., Cross L. E., Brooks R. A., and Ehrlich D. J. Ferroelectric Thin-Film Ultrasonic Micromotors // Proc. of IEEE 4th Int. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '91). Jan. 30—Feb. 2, Nara, Japan. 1991. P. 109—113.
14. Bexell M., Johansson S. Fabrication and Evaluation of a Piezoelectric Miniature Motor // Sensors Actuators A, 1999. N 75. P. 8—16.
15. Liu C., Tsao T., Tai Y.-C. and Ho C.-H. Surface Micromachined Magnetic Actuators // The 7th IEEE International Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS '94). Jan. 25—28, 1994, Oiso, Japan. 1994. P. 57—62.
16. Teshigahara A., Watanabe M., Kawahara N., Ohtsuka Y., and Hattori T. Performance of a 7-mm Microfabricated Car // IEEE/ASME J. MEMS, 4 (2 (June 1995)). 1995. P. 76—80.
17. Kladitis P., Bright V., Harsh K. and Lee Y. C. Prototype Microrobots for Micro Positioning in a Manufacturing Process and Micro Unmanned Vehicles // Proc. of IEEE 12th Int. Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '99). Jan. 17—21, Orlando, USA. 1999. P. 570—575.
18. Shahinpoor M. and Kim K. J. Ionic polymer—metal composites: IV. Industrial and medical applications // Smart materials and structures. 2004. N 14. P. 197—214.

УДК 621.396.1

П. В. Афанасьев, канд. техн. наук, нач. лаб. НОЦ "Нанотехнологии",
В. А. Ильин, канд. физ.-мат. наук, зам. директора НОЦ "ЦМИД",
А. Б. Козырев, д-р техн. наук, профессор,
В. В. Лучинин, д-р техн. наук, директор НОЦ "ЦМИД",
И. Н. Смелов, мл. науч. сотр.,
e-mail: cmid_leti@mail.ru,
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

РЕКУПЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ ИЗ ЭФИРА

Поступила в редакцию 08.10.2013

Рассмотрен ректенный преобразователь, работающий на частоте 2,4 ГГц для аккумуляции энергии из "эфира". Приведен анализ конструктивно-функциональных особенностей преобразователя, выполнены расчеты и реализована схмотехническая составляющая устройства. Оценена эффективность преобразования ректенны, достигающая 40 % при нагрузке 500 Ом.

Ключевые слова: ректенна, преобразователь энергии, альтернативная энергетика

Введение

Современные тенденции создания инфотелекоммуникационных, радиоэлектронных и робототехнических систем определяют необходимость развития средств эффективного беспроводного энергообеспечения нового поколения. К ним можно отнести и процесс рекуперации энергии из эфира в СВЧ диапазоне.

Ректенные преобразователи представляют собой систему, состоящую из приемного устройства, фильтров нижних частот, детектирующего элемента и нагрузки. Приемная антенна СВЧ излучения, интегрированная с детектором, получила название ректенна (rectenna-rectifying antenna). Основным назначением ректенн является преобразование энергии СВЧ диапазона в энергию постоянного тока. Область их возможных приложений весьма широка — от глобальных проектов передачи солнечной энергии на землю по каналу СВЧ до создания систем питания микромощных датчиков различного функционального назначения.

Практические работы в области ректенн появились в 60-х годах прошлого столетия и в настоящее

время чрезвычайно интенсивно развиваются параллельно с совершенствованием микротехнологий и элементной базы микро- и наноэлектроники.

Впервые термин "ректенна" как новый тип устройства был предложен в работах [1, 2]. Важно отметить, что ректенна является пассивным элементом при использовании в качестве детектора полупроводникового диода, хотя в последнее время этот же термин употребляется и в том случае, когда функцию выпрямления выполняют быстродействующие полевые транзисторы и транзисторы с высокой подвижностью носителей заряда с заданием рабочей точки от внешнего источника (строго говоря, такие ректенны не являются пассивными элементами).

Антенны ректенных преобразователей могут быть различных типов, основными из которых являются следующие:

- дипольные [1, 2];
- микрополосковые [3, 4];
- монополярные [5, 6];
- компланарные patch-антенны [6];
- параболические [7] и другие типы антенн.

Цепь детектирования, особенно при использовании диодов, в первую очередь определяет эффективность преобразования. Кроме того, этот параметр для ректенн с диодными выпрямителями зависит от уровня входной СВЧ мощности и сопротивления нагрузки.

Под эффективностью преобразования понимают отношение мощности в цепи постоянного тока после преобразования к уровню входной мощности СВЧ сигнала. При использовании современной технологии изготовления микрополосковых элементов и существующих типов полупроводниковых диодов и транзисторов эффективность преобразования СВЧ энергии может быть доведена до 80 % (при условии очень хорошего согласования между элементами тракта преобразования).

Целью работы являлась разработка концепции, структуры и состава функциональных блоков ректенного преобразователя, выбор элементной базы, создание образца ректенного преобразователя и проведение его экспериментальных исследований.

Структура и состав функциональных блоков ректенных преобразователей

Схематически ректенна может быть представлена в виде, приведенном на рис. 1. В состав ректенны входят приемная антенна какого-либо из приведенных выше типов, согласующая цепь с фильтром нижних частот, детектирующий элемент в ви-

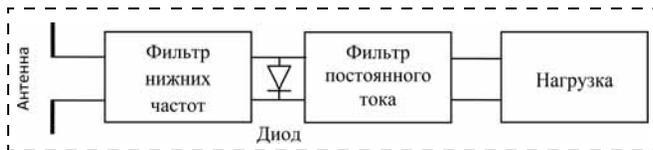


Рис. 1. Схематическое представление ректенны

де полупроводникового диода или транзистора, фильтр нижних частот в цепи постоянного тока и нагрузочный элемент — потребитель энергии.

При решении более сложной задачи RF — DC преобразования от нескольких источников излучения с разными уровнями мощности и разными частотами излучения в выбранном диапазоне можно использовать комбинированный ректенный преобразователь. В данном случае усложняется схема управления мощностью в цепи постоянного тока, а в приемно-преобразующей СВЧ части реализуется параллельный принцип организации работы элементов ректенны.

Поскольку эффективность ректенны определяется различными параметрами отдельных компонентов, в том числе и последовательным сопротивлением детектирующего полупроводникового диода, а высота барьера диода при нулевом смещении является неизменным параметром, определяемым типом полупроводника и барьерообразующего металла, возможно в процессе оптимизации конструкции ректенны использовать параллельное соединение нескольких идентичных диодов в целях снижения суммарного последовательного сопротивления.

Расчетно-теоретические оценки параметров и характеристик преобразователя основаны на диапазоне мощности, поступающей на приемную антенну ректенны, и диапазоне рабочих частот преобразования. Системы автоматизированного проектирования (САПР) радиоэлектронных устройств СВЧ (например, Microwave Office и Serenade) позволяют решать задачу анализа нелинейных схем, поскольку в последних версиях пакетов данных САПР используются такие мощные методы нелинейного анализа, как метод гармонического баланса и метод рядов Вальтерра. При использовании метода гармонического баланса линейные уравнения, описывающие линейную часть устройства, решаются в частотной области, а нелинейные уравнения, описывающие нелинейную часть, решаются во временной области, результаты решений во временной и частотной областях связываются с помощью преобразований Фурье.

В случае анализа высокочастотных цепей, в которых переходные процессы длятся более чем сотни и тысячи периодов колебаний, метод гармонического баланса позволяет рассчитывать установившийся процесс на основании спектрального разложения неизвестных сигналов, поэтому время моделирования не зависит от длительности переходных процессов. Данный метод позволяет проводить анализ как

во временной, так и в частотной областях, поэтому его называют частотно-временным, или смешанным. Таким образом, использование метода гармонического баланса для расчета элементов ректенны достаточно оправдано. Детальное рассмотрение метода гармонического баланса для анализа цепей с нелинейными элементами можно найти в работе [8].

Приемные антенны ректенных преобразователей

Дипольные приемные антенны для ректенн использовались на начальных этапах развития направления, связанного с техникой RF — DC преобразования энергии, преимущественно для мощных и сверхмощных ректенн. Малосигнальные преобразователи, создание которых представляет с нашей точки зрения наибольший интерес, разрабатываются на основе микрополосковых антенн, состоящих из тонких металлических (обычно, золотых или медных) фигур различной формы, расположенных на диэлектрическом слое над проводящей плоскостью. Микрополосковые антенны обладают рядом несомненных достоинств, к числу которых можно отнести малые массу и габаритные размеры, относительно простую технологию изготовления, а также достаточно широкий диапазон рабочих частот принимаемого излучения 1..40 ГГц.

Качественное сопоставление щелевых и микрополосковых приемных антенн приведено в таблице.

Сравнение характеристик микрополосковых и щелевых антенн применительно к разработке ректенных преобразователей

Характеристики	Микрополосковые антенны	Щелевые антенны
Моделирование и конструирование	Средний уровень сложности	Средний уровень сложности
Изготовление	Простая технология	Простая технология
Допуски при изготовлении	Критично	Менее критично
Исполнение	Тонкопленочное	Тонкопленочное
Вариабельность формы	Высокая	Ограниченная
Поляризация излучения	Линейная и циркулярная	Линейная и циркулярная
Ширина частотной полосы	Узкая	Широкая
Возможность частотного сканирования	Достаточно простая реализация	Возможно
Работа на двух частотах	Возможна	Возможна

Детектирующе-выпрямляющий блок ректенны с фильтром нижних частот и фильтром цепи постоянного тока

Как уже отмечалось, ректенна любой конструкции состоит из следующих пяти элементов: приемной антенны, фильтра нижних частот, выпрямительного диода, фильтра постоянного тока и нагрузки. Фильтр нижних частот выполняет две функции:

- трансформирование (согласование) сопротивления излучения антенны к сопротивлению диода на основной частоте;

- предотвращение проникновения в антенну выпрямленного напряжения и гармоник основного сигнала, возникающих на нелинейном элементе — диоде, и их дальнейшее переизлучение.

Полупроводниковый диод включен параллельно в линию и является выпрямителем СВЧ напряжения в постоянное напряжение. Фильтр постоянного тока служит для шунтирования токов СВЧ сигнала и его гармоник на землю, предотвращая их попадание в нагрузку. Нагрузка является потребителем выпрямленного напряжения (или накопителем энергии).

Эквивалентная электрическая схема представлена на рис. 2.

Конденсатор $C_{БЛ}$ не пропускает выпрямленный диодом ток в генератор СВЧ сигнала (антенну). Емкость конденсатора должна быть такой, чтобы выполнялось условие $\omega C_{БЛ} Z_0 \gg 1$, где Z_0 — волновое сопротивление линии передачи. Конденсатор C шунтирует СВЧ сигнал и его гармоники. Для эффективной работы ректенны также должно соблюдаться условие $\omega C Z_0 \gg 1$, а сам конденсатор должен быть включен параллельно в линию на расстоянии $\sim \lambda/4$ от диода. Дроссель L фильтра постоянного тока не пропускает СВЧ сигнал в нагрузку.

Работа диода в составе ректенны в стационарном режиме подробно рассмотрена в работе [2], где

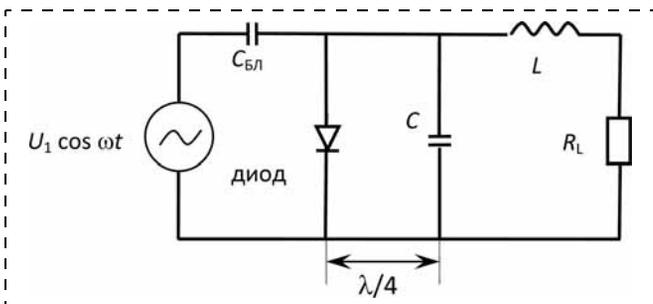


Рис. 2. Эквивалентная схемы ректенны

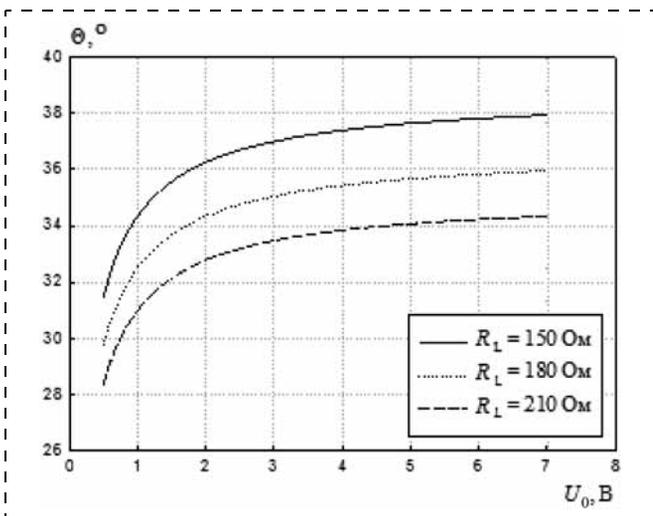


Рис. 3. Зависимость угла отсечки СВЧ напряжения от выпрямленного постоянного напряжения

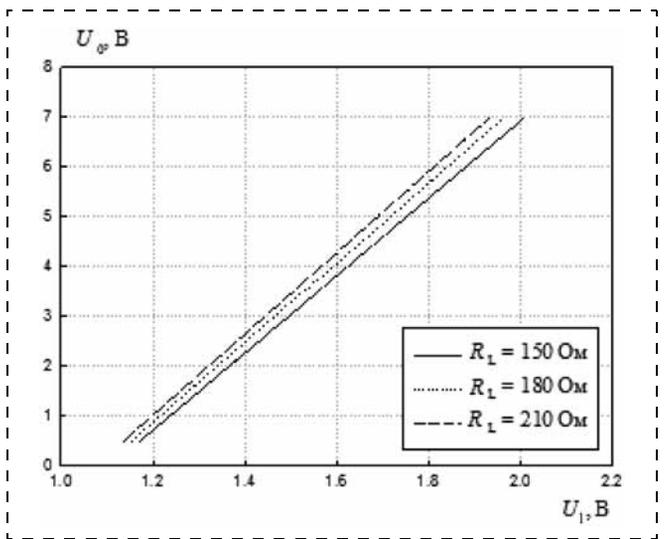


Рис. 4. Зависимость выпрямленного напряжения от амплитуды СВЧ сигнала

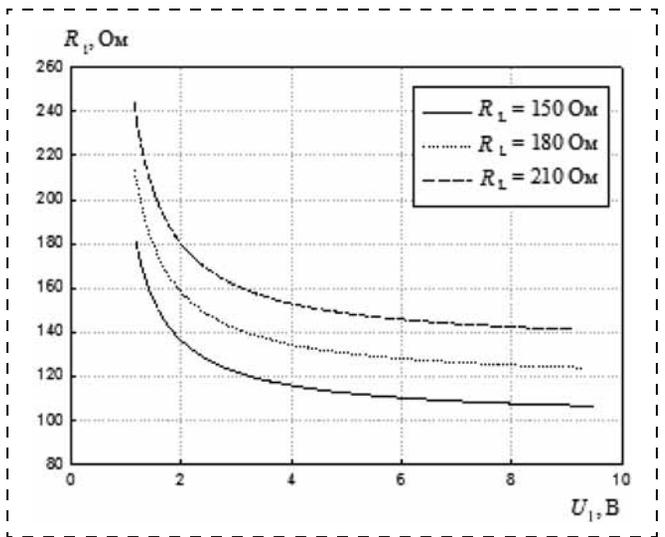


Рис. 5. Зависимость сопротивления диода на частоте сигнала от его амплитуды

представлена формула для оценки эффективности преобразования мощности СВЧ в мощность постоянного тока, которая является функцией отношения сопротивления диода R_D к сопротивлению нагрузки R_L и отношению напряжения открывания диода U_j к постоянному выпрямленному напряжению на нагрузке U_0 .

Исходя из вышеприведенных критериев для создаваемой ректенны были выбраны полупроводниковые выпрямительный диоды с барьером Шоттки HSMS-2850 и HSMS-20 фирмы Agilent Technologies.

Частотные свойства выбранных диодов обеспечивают их работу в полосе рабочих частот ректенного преобразователя. Диоды обоих типов характеризуются малыми значениями напряжений открывания, малыми значениями барьерных емкостей при нулевом смещении и достаточно небольшими последовательными сопротивлениями базы. Диоды

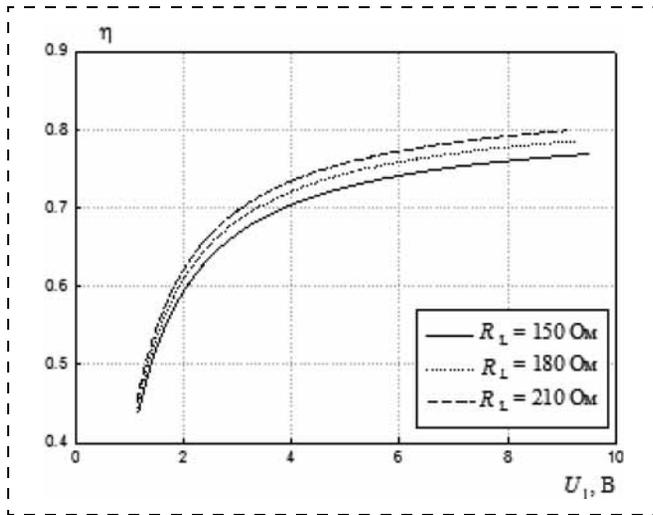


Рис. 6. Зависимость эффективности преобразования диода от амплитуды входного СВЧ сигнала

HSMS-2850 устойчиво работают при уровнях мощности до 100 мВт, а при уровнях мощности выше этого значения можно использовать диоды HSMS-2820. Корпуса диодов выполнены для поверхностного монтажа в системах микрополосковых элементов.

На последующих рисунках показаны рассчитанные по приведенным выше выражениям зависимости угла отсечки от выпрямленного постоянного напряжения $\Theta = f(U_0)$ (рис. 3); постоянного напряжения от амплитуды СВЧ входного напряжения $U_0 = f(U_1)$ (рис. 4); сопротивления диода на частоте сигнала от амплитуды входного напряжения $R_L = f(U_1)$ (рис. 5); эффективности преобразования от амплитуды входного напряжения $\eta = f(U_1)$ (рис. 6) для разных значений сопротивления нагрузки.

Топологическая схема исследованного микрополоскового ректенного элемента приведена на рис. 7. На схеме использованы следующие обозначения: 1 — полосно-пропускающий фильтр, служивший для предотвращения протекания выпрямленного тока в генератор СВЧ; 2 — фильтр нижних частот; 3 — согласующий трансформатор; 4 — кон-

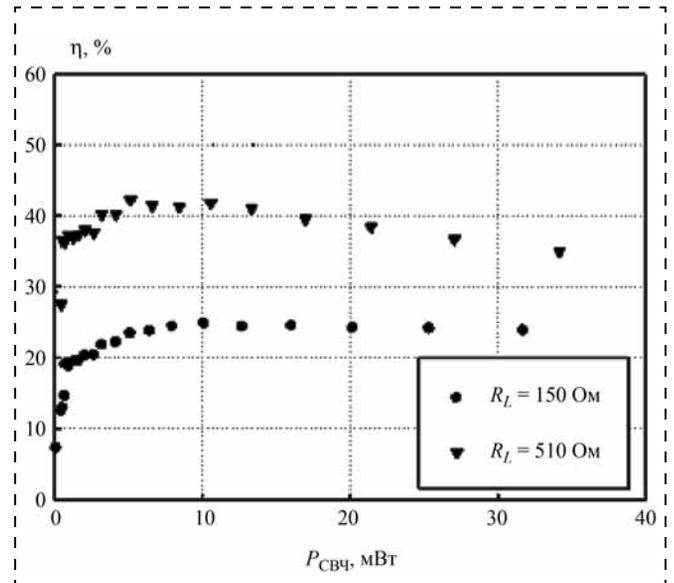


Рис. 8. Эффективность преобразования СВЧ мощности в мощность постоянного тока при разных сопротивлениях нагрузки

тактная площадка для подключения диода; 5 — контактная площадка для подключения конденсатора фильтра постоянного тока. Контактные площадки 4 и 5 через отверстия в подложке микрополосковой линии соединены с заземленной поверхностью микрополосковой линии. Микрополосковая схема была изготовлена на ламинированной подложке TLC-30 фирмы "Taconic" толщиной 0,5 мм (диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon = 3,0$; тангенс угла потерь $\text{tg} \delta \approx 0,0015$; толщина медных электродов — 0,017 мкм). При моделировании и испытаниях макета на низком уровне мощности вместо диода включался сосредоточенный резистор номиналом 180 Ом, имитировавший реальный диод, находящийся в режиме выпрямления. Емкость конденсатора фильтра постоянного тока была выбрана равной 10 пФ.

Экспериментальные исследования ректенного элемента проводились путем подачи СВЧ сигнала с генератора Г4-202 с выходной мощностью ~ 80 мВт на вход преобразователя. Направленный ответвитель служил для определения мощности, отраженной от макета.

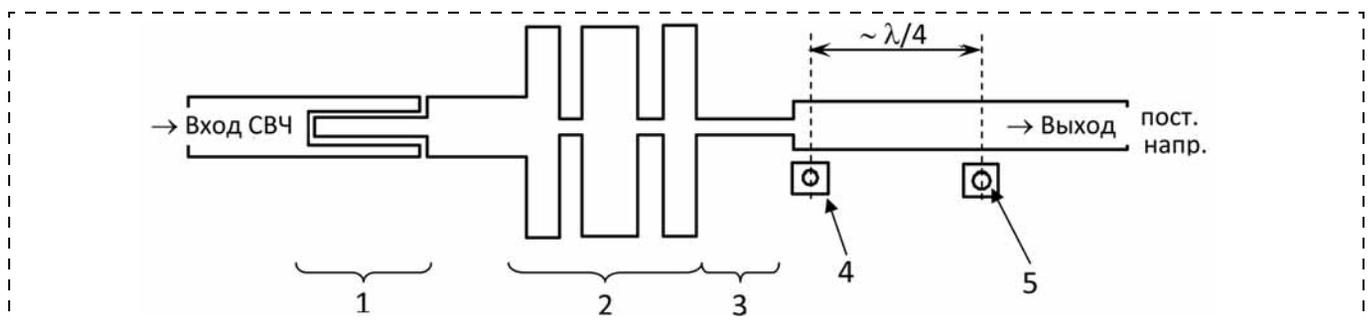


Рис. 7. Топологическая схема исследованного микрополоскового элемента

На рис. 8 приведена экспериментальная зависимость эффективности преобразования СВЧ мощности в мощность постоянного тока для разных значений сопротивления нагрузки.

Заключение

В рамках данной работы была рассмотрена концепция создания ректенного преобразователя, работающего на частоте 2,4 ГГц для аккумуляции энергии из "эфира". Приведен анализ конструктивно-функциональных особенностей создания преобразователей, выполнен расчет и выбор схемотехнической составляющей устройства. Проведен сопоставительный анализ параметров и характеристик основных элементов ректенн различного типа. Создан экспериментальный образец устройства, проведены исследования элементов модуля преобразователя ректенного типа. Получены экспериментальные зависимости коэффициента преобразования ректенного тракта от уровня входной мощности для трех значений сопротивления нагрузки. Достигнута эффективность преобразования, превышающая 40 %. Показано, что эффективность преобразования может быть значительно увеличена за счет использования двухполупериодного преобразователя.

Работа выполнялась в рамках программы стратегического развития университета на 2012—2016 гг. и гранта РФФИ 12-08-12020-офи_м.

Список литературы

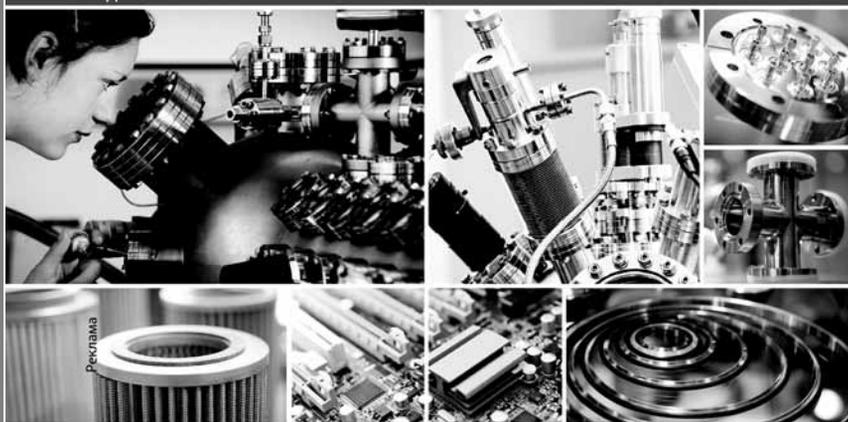
1. **Brown W. C.** The history of power transmission by radio waves // IEEE Trans. MTT. 1984. V. 32 (9). P. 1230—1242.
2. **Brown W. C.** A microwaver powered, long duration, high altitude platform // MTT- S International Microwave Symposium Digest. 1986. V. 86 (1). P. 507—510.
3. **Ito T., Fujino Y., Fujita M.** Fundamental experiment of a rectenna array for microwave power reception // IEICE Trans. Commun. 1993. V. E-76-B (12). P. 1508—1513.
4. **Fujita M., Kaya N., Kunimi S., Ishii M., Ogihata N., Kusaka N., Fujino Y., Ida S.** A dual polarization microwave power transmission system for microwave propelled airship experiment // Proc. de ISAP'96. 1996. V. 2. P. 393—396.
5. **Aoki Y., Otsuka M., Idogaki T., Shibata T., Hattori T.** Microwave energy transmission system for microrobot // IEICE-Trans. Electr. 1997. V. 80-c (2). P. 303—308.
6. **Xue Q., Chin C. H. K., Chan C. H.** // Design of a 5,8-GHz. rectenna incorporating a new patch antenna // IEEE Antenna and Wireless Propagation Lett. 2005. V. 4. P. 175—178.
7. **Fujino Y., Ogimura K.** A rectangular parabola rectenna with elliptical beam for sps test satellite experiment // Proc. of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers. 2004. V. 1.10. P. 20—29.
8. **Fusco V. F., El-Rabale S. and Stewart C.** Harmonic balance evaluation of nonlinear microwave circuits—a tutorial approach // Transactions on Education, 1988. V. 31 (93). P. 181—192.

9-я Международная выставка
вакуумной техники, материалов и технологий
15–17 апреля 2014 года
Москва, КВЦ «Сокольники»

**Вакуум
ТехЭкспо**

единственная в России и СНГ

выставка вакуумной отрасли



- вакуумная техника и технологии
- сублимационное оборудование
- криогенное оборудование
- аналитическое оборудование, работающее в вакуумной среде
- оборудование и технологии для нанесения функциональных покрытий

забронируйте стенд на сайте

www.vacuumtechexpo.com

Организатор:



Тел.: +7 (495) 935 81 00
E-mail: vacuumtechexpo@ite-expo.ru

При поддержке:



НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ
ИМ. С.А. ВЕКШИНСКОГО

Генеральный спонсор:



УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ "НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА" В 2013 ГОДУ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

- Афанасьева О. В., Калинин С. Б., Лучинин В. В.** Сетевая интеграция образовательного сегмента национальной нанотехнологической сети — база данных научно-технической продукции, информационных и образовательных услуг № 12
- Корляков А. В., Лучинин В. В., Марасина Л. А.** К вопросу о формировании профессиональных стандартов в интересах nanoиндустрии № 12
- Лучинин В. В.** Мультидисциплинарные технологии. Гибкая электроника и фотоника № 12
- Лучинин В. В.** Принцип матрицы — фундамент междисциплинарных технологий № 2
- Раткин Л. С.** Современные технологии проектирования, конструирования и производства нано- и микроэлектромеханических систем № 3

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

- Бодунов Д. С., Гавриленко В. П., Заблоцкий А. В., Кузин А. А., Кузин А. Ю., Митюхляев В. Б., Раков А. В., Тодуа П. А., Филиппов М. Н.** Калибровка просвечивающих электронных микроскопов с помощью ГСО 10030—2011 № 3
- Гавриленко В. П., Кузин А. Ю., Митюхляев В. Б., Раков А. В., Тодуа П. А., Филиппов М. Н., Шаронов В. А.** Влияние контаминации в низковольтном растровом электронном микроскопе на профиль рельефных элементов нанометрового диапазона № 1
- Гареев К. Г., Грачева И. Е., Мошников В. А.** Зольгель технологии направленного синтеза нанокompозитов на основе наноразмерных магнитных частиц в порах изолирующей диэлектрической матрицы № 2
- Глухова О. Е., Колесникова А. С.** Эмиссионные свойства бамбукоподобных нанотрубок, допированных калием № 5
- Деспотули А. Л., Андреева А. В.** Ток смещения Максвелла в наноионике и собственные ион-транспортные свойства модельных 1D-наноструктур № 8
- Ичкитидзе Л. П., Подгаецкий В. М., Путря Б. М., Селищев С. В., Благов Е. В., Галперин В. А., Шаман Ю. П., Кицюк Е. П.** Электропроводящие слои композиционных наноматериалов с многослойными углеродными нанотрубками № 4
- Карташев В. А., Карташев В. В.** Учет геометрии острия иглы для коррекции измерений туннельного микроскопа № 11
- Коростелев В. Ф., Хромова Л. П.** Исследование влияния давления на кристаллизацию и изменение наноструктуры алюминия № 5
- Пронин И. А., Аверин И. А., Димитров Д. Ц., Красева Л. К., Папазова К. И., Чаначев А. С.** Исследование чувствительности к этанолу переходов ZnO—ZnO:Fe на основе тонких наноструктурированных пленок, полученных с помощью зольгель-технологии № 3
- Уваров И. В., Наумов В. В., Амиров И. И.** Особенности изготовления металлических кантилеверов наноразмерной толщины № 11
- Хабибуллин Р. А.** Технология создания наногетероструктур $Al_xGa_{1-x}As/In_yGa_{1-y}As/Al_xGa_{1-x}As$ на арсениде галлия № 1

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

- Аверин И. А., Аношкин Ю. В., Печерская Р. М.** Исследование процессов деградации выходных параметров тензорезистивных структур № 10
- Богданов С. А.** Моделирование газовой чувствительности кондуктометрических сенсоров на основе неоднородных полупроводников № 9
- Васильев В. А., Орехов Д. О., Чернов П. С.** Современные методы моделирования нано- и микроразмерных систем № 11
- Векшин М. М., Кулиш О. А., Яковенко Н. А.** Преобразование поляризации в слабонаправляющем оптическом волноводе на основе диэлектрических изотропных слоев № 11
- Гриджин В. А., Чебанов М. А., Зиновьев В. Б.** Численное моделирование при проектировании сенсоров давления № 4
- Заблоцкий А. В., Вирюс А. А., Каминская Т. П., Коровушкин В. В., Кузин А. Ю., Степович М. А., Тодуа П. А., Филиппов М. Н., Шипко М. Н.** Локальные характеристики прецизионных сплавов Fe₃(SiAl) после магнитно-импульсной обработки № 7
- Земляничников Н. С., Данилова Н. Л., Панков В. В., Суханов В. С., Гаврилов Р. О., Михайлов Ю. А.** Конструкция чувствительных элементов на малые давления с повышенной перегрузочной способностью № 6
- Калёнов В. Е., Корляков А. В.** Частотно-резонансный метод измерения механического воздействия с помощью нелинейного микромеханического преобразователя № 2
- Колешко В. М., Воробей Е. А., Прудникова Е. Л.** Интеллектуальная система распознавания информационных образов наноматериалов № 1
- Латохин Д. В., Воронков Э. Н.** Численное моделирование микроплазменного пробоя в полупроводниковых структурах № 3
- Латохин Д. В., Коновалов А. В., Воронков Э. Н.** Оценка параметров барьеров в нанокристаллических полупроводниковых пленках № 5
- Милкин С. С., Стародубов А. В., Герман С. В., Маркин А. В., Горин Д. А., Вениг С. Б., Калинин Ю. А.** Особенности техники измерения свойств коллоидных и эмульсионных систем на сверхвысоких частотах № 3
- Смолин В. К.** Применение пленок бинарных соединений металлов подгруппы титана в конструкциях резистивных элементов памяти № 8
- Спирин В. Г.** Проблемы создания микросборок высокой плотности упаковки № 8
- Хлопов Б. В., Самойлович М. И., Бовтун В.** Исследование эффекта мультипликации электромагнитных полей в устройствах бесконтактного стирания информации с электронных носителей с использованием нанокompозитов на основе опаловых матриц № 7
- Челпанов И. Б., Кочетков А. В.** Многоцелевые алгоритмы оценки составляющих сигналов микромеханических датчиков угловой скорости и акселерометров № 6
- Челпанов И. Б., Кочетков А. В.** Системно-ориентированная обработка результатов испытаний микроэлектромеханических датчиков скоростей и ускорений № 5

Яшанин И. Б., Иевлев И. В., Кононов С. В., Азнабаев Р. Г., Харитонов В. А., Бойченко Д. В., Гребенкина А. В. Повышение чувствительности микропреобразователя абсолютного давления на основе расчетно-аналитического моделирования изгиба мембраны и положения тензорезисторов. . . № 9

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Абдуллаев Д. А., Зайцев А. А., Кельм Е. А., Милованов Р. А. Ионно-лучевое травление как промежуточная стадия при удалении пассивирующих слоев микросхем в рамках технологии анализа отказов. № 11

Аверин И. А., Губич И. А. Исследование процессов рекристаллизации алюминиевой фольги — стадии получения пористого оксида алюминия. № 6

Аверин И. А., Мошников В. А., Пронин И. А. Анализ влияния направленного легирования газочувствительного диоксида олова на формы и концентрацию адсорбированного кислорода. № 8

Аверин И. А., Мошников В. А., Пронин И. А. Вклад поверхности газочувствительных композитов $\text{SnO}_2\text{—In}_2\text{O}_3$ в сенсорные свойства и селективность. № 9

Аверин И. А., Мошников В. А., Пронин И. А. Влияние типа и концентрации собственных дефектов на свойства структур диоксида олова. № 1

Александрова О. А., Максимов А. И., Мараева Е. В., Матюшкин Л. Б., Мошников В. А., Мусихин С. Ф., Тарасов С. А. Синтез и самоорганизация квантовых точек сульфида свинца для люминесцентных структур, полученных методом испарения коллоидного раствора. № 2

Амеличев В. В., Белов А. Н., Назаркина Ю. В., Галперин В. А., Касаткин С. И., Колотов О. С., Муравьев А. М., Плотникова Н. В., Поляков П. А., Сырьев Н. Е., Шаман Ю. П. Высокочастотные свойства нанообъектов с ферромагнитным материалом. № 1

Амеличев В. В., Благов Е. В., Гаврилов Р. О. Технологические особенности создания беспроводной магниторезистивной МЭМС контроля параметров движения. № 7

Асташенкова О. Н., Корляков А. В. Контроль физико-механических параметров тонких пленок. № 2

Бараночников М. Л., Леонов А. В., Малых А. А., Мордкович В. Н., Мурашев В. Н., Пажин Д. М. Датчики внешних воздействий с частотным выходом на основе полевого МДПДМ-транзистора со встроенным каналом. № 10

Батурин А. С., Булах К. В., Григал И. П., Егоров К. В., Заблоцкий А. В., Маркеев А. М., Лебединский Ю. Ю., Горнев Е. С., Орлов О. М., Чуприк А. А. Эффект резистивного переключения в оксидных пленках $\text{Hf}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_y$ с переменным составом, выращенных методом атомно-слоевого осаждения. № 6

Брехов К. А., Кудрявцев А. В., Ильин Н. А., Шерстюк Н. Э., Мишина Е. Д. Переключение диэлектрической поляризации в сегнетоэлектрических мультислойных планарных структурах BST/NBFO. № 1

Вагин Д. В., Касаткин С. И., Амеличев В. В., Костюк Д. В., Беляков П. А. Частотные характеристики спин-вентильных магниторезистивных наноструктур. № 4

Вишневский А. С., Воротилов К. А., Жигалина О. М., Ланцев А. Н., Подгорный Ю. В., Серегин Д. С. Исследование влияния структуры нижнего электрода на свойства пленок ЦТС, сформиро-

ванных методом химического осаждения из растворов. № 1

Воронин О. Г., Конищева Е. В., Зорин Н. А., Федотенков Ф. А., Карякина Е. Е., Карпачева Г. П., Орлов А. В., Киселева С. Г., Карякин А. А. Дизайн электродной поверхности с использованием соединений, содержащих аналоги субстратов гидrogenазы, для создания высокоактивных топливных биоэлектрокатализаторов. № 5

Вяткин А. Ф., Матвеев В. Н., Волков В. Т., Кононенко О. В., Левашов В. И., Еременко В. Г., Амеличев В. В., Костюк Д. В., Ходос И. И. Многослойные наноструктуры с эффектом гигантского магнетосопротивления. № 11

Галперин В. А., Кондратьев П. К., Зубов Д. Н., Кельм Е. А., Павлов А. А. Оптимизация процесса электрохимического осаждения меди в массивы углеродных нанотрубок. № 4

Глухова О. Е., Коссович Е. Л. Исследование распространения краевых волн в многослойных графеновых пластинах в зависимости от вида укладки слоев. № 6

Заблоцкий А. В., Кузин А. Ю., Михеев Н. Н., Никифоров Н. А., Степович М. А., Тодуа П. А., Филиппов М. Н. Модель квадратичной рекомбинации неосновных носителей заряда в прямозонных полупроводниках для катодоллюминесцентной идентификации электрофизических параметров. № 6

Залуцкая А. А., Проказников М. А., Проказников А. В. Цветовая окраска наноструктурированной поверхности. № 9

Колпаков А. Я., Поплавский А. И., Галкина М. Е., Токарев Д. А., Беляева А. О., Герус Ж. В. Влияние отжига в вакууме на внутренние напряжения в углеродных покрытиях, сформированных при различной ориентации подложки относительно оси потока импульсной углеродной плазмы. № 10

Милованов Р. А., Кельм Е. А., Косичкин О. А., Ляпунов Н. А. Селективное травление меди в технологии анализа отказов ИМС с проводниками на основе меди. № 11

Минаков А. В., Ягодница А. А., Лобасов А. С., Рудяк В. Я., Бильский А. В. Расчетно-экспериментальное исследование перемешивания жидкостей в Т-образном микроканале. № 3

Мосин О. В., Игнатов И. И. Состав и структурные свойства природного фуллеренсодержащего минерала шунгита. № 1

Печерская Р. М., Печерская Е. А., Метальников А. М., Гладков И. М., Рябов Д. В. Автоматизация измерений и контроля параметров активных диэлектриков и изделий на их основе. № 9

Пономарев Д. С. Разработка наногетероструктур $\text{InAlAs/InGaAs/InAlAs}$ на подложках фосфида индия. № 3

Принц А. В. Метод формирования массива длинных вертикальных полупроводниковых микро-трубок. № 10

Пустовалов А. А., Цветков Л. А. Производство радионуклида никеля-63 высокого обогащения — главное условие создания эффективных бета-вольтаических атомных батарей. № 10

Разумная А. Г., Назаренко А. В., Рудская А. Г., Куприянов М. Ф. Концентрационные изменения структур в системе твердых растворов $\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ № 8

Рубан О. А., Пушкарев С. С., Галиев Г. Б., Климов Е. А., Пономарев Д. С., Хабибуллин Р. А., Мальцев П. П. Метаморфные наногетероструктуры InGaAs/InAlAs

- на подложках GaAs для приборов терагерцовой электроники № 10
- Саврук Е. В., Смирнов С. В.** Формирование светорассеивающего микрорельефа на поверхности керамических подложек из Al_2O_3 № 11
- Самойлович М. И., Ринкевич А. Б., Бовтун В., Белянин А. Ф., Кемпа М., Нужный Д., Клещева С. М., Савинов М.** Оптические и диэлектрические свойства опаловых матриц с заполнением межсферических нанополостей эвлитином ($Bi_4(SiO_4)_3$). № 11
- Тополов В. Ю., Филиппов С. Е., Воронцов А. А.** Особенности пьезоэлектрической анизотропии и гидростатического отклика пористых керамик типа ЦТС № 8
- Троицкий А. А., Березин В. М., Лукашев В. С.** Электрические и оптические свойства углеродных пленок, осаждаемых электронно-лучевым методом № 10
- Троян П. Е., Зеленский В. И.** Эмиссионные структуры на основе формованных тонкопленочных систем. № 4
- Тутов Е. А.** Адсорбционно-стимулированный фазовый переход полупроводник — металл в диоксиде ванадия. № 9
- Тучин А. В., Битюцкая Л. А., Бормонтов Е. Н.** Эффект Штарка в фуллерене C_{60} № 4
- Фалчари М. М., Семенистая Т. В., Плуготаренко Н. К., Лу П.** Разработка технологии получения газочувствительного материала на основе ПАН с применением квантово-химических расчетов и метода Монте-Карло № 8
- Юзеева Н. А.** Подвижность электронов в структурах с квантовой ямой $In_{0,52}Al_{0,48}As/In_{0,53}Ga_{0,47}As$ на подложке InP № 5

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

- Аверин И. А., Пронин И. А., Карманов А. А.** Исследование газочувствительности сенсоров на основе наноструктурированных композиционных материалов SiO_2-SnO_2 № 5
- Амеличев В. Б., Аравин В. В., Белов А. Н., Красюков А. Ю., Резнев А. А., Сауров А. Н.** Создание интегральных компонентов усиления магнитного сигнала в беспроводной МЭМС на основе магниторезистивных элементов. № 3
- Амеличев В. В., Сницар В. Г., Костюк Д. В., Касаткин С. И.** Высокочувствительный магниторезистивный сенсор для современных приборов считывания информации № 4
- Антипов А. А., Аракелян С. М., Кутровская С. В., Кучерик А. О.** Исследование размерной зависимости электрического сопротивления металлических микроконтактов кластерного типа. № 8
- Аскерко А. Н., Бохов О. С., Лучинин В. В.** Испытания и тестирование микроэлектромеханических компонентов и систем на их основе № 2
- Батурин А. С., Спиридонов М. В., Негров Д. В., Кузин А. А.** Сосредоточенный выходной резонатор микроклистрона миллиметрового диапазона. № 7
- Белкин А. М., Косцов Э. Г.** Ступенчатые отражательные дифракционные МЭМС-решетки. № 9
- Белогуров Е. А., Горох Г. Г., Таратын И. А., Хатько В. В.** Чувствительный элемент кольцевого гироскопа на основе нанопористого анодного оксида алюминия. № 7
- Благов Е. В., Амеличев В. В., Костюк Д. В.** Магниторезистивный преобразователь для датчиков тока № 4
- Бобринецкий И. И., Бессонова А. В., Комаров И. А., Маловичко А. М., Назаркин М. Ю., Неволин В. К.,**

- Рымаренко В. С., Царик К. А.** Исследование сенсорных свойств перколированных сеток из углеродных нанотрубок и нановолокон ZnO № 6
- Бройко А. П., Ленчук О. С.** Анализ теплового состояния микросенсора, созданного на основе тонкопленочных технологий. № 2
- Бузановский В. А.** Анализ конструкционных и метрологических характеристик газовых химических наносенсоров с чувствительными элементами на основе полимеров. № 5
- Бурдин Д. А., Фетисов Ю. К., Чашин Д. А., Экономов Н. А., Савченко Е. М.** Пьезоэлектрический резонансный датчик магнитного поля с планарной возбуждающей катушкой № 3
- Васюков В. Н., Драгунов В. П., Остертак Д. И.** Анализ работы мостового МЭМП при случайных воздействиях № 1
- Векшин М. М., Кулиш О. А., Яковенко Н. А.** Полосно-заграждающий фильтр на основе четырехслойного оптического волновода № 9
- Войцеховский А. В., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А., Несмелов С. Н., Дзядух С. М.** Фотоприемники и фотоприемные устройства для спектрального диапазона 8...14 мкм на твердых растворах теллуридов кадмия — ртути № 10
- Гавриленкова М. Д., Акимов С. В., Крылов А. Д.** Комплексная автоматизация и информатизация испытательных и метрологических центров датчиков физических величин № 1
- Гаршин А. Я., Тучин А. В., Бормонтов Е. Н.** Дифференциальный датчик давления с импульсной компенсации № 4
- Горемычнюк Н. И., Койгеров А. С., Смелов И. Н.** Миниатюрные радиоидентификаторы на поверхностных акустических волнах № 2
- Гриджин В. А., Чебанов М. А., Васильев В. Ю.** Влияние термических деформаций на температурную стабильность характеристик кремниевых резонансных сенсоров давления № 3
- Даниличев С. А., Лебедев С. В., Фетисов Ю. К., Чашин Д. В.** Пьезоэлектрический датчик магнитного поля на основе камертона с биморфными элементами № 5
- Земляничников Н. С., Данилова Н. Л., Панков В. В., Суханов В. С., Михайлов Ю. А.** Тензорезистивные преобразователи давления на основе сложнопрофилированных кремниевых мембран № 4
- Ичкитидзе Л. П.** Сверхпроводниковые пленочные трансформаторы магнитного потока с микро- и наноразмерными ветвями. № 9
- Ичкитидзе Л. П.** Сверхпроводниковый пленочный трансформатор магнитного потока с наноразмерными ветвями для датчика магнитного поля № 4
- Калёнов В. Е., Бройко А. П., Корляков А. В., Хмельницкий И. К., Чигирев Д. А., Быков Ю. О., Лагош А. В., Крот А. И.** Микродвижители для микроробототехники № 12
- Калинин В. А., Пинаев В. В., Макарова А. В., Захаров А. В.** Фоторезисты для встречно-штыревых преобразователей систем радиочастотной идентификации на основе акустоэлектронных элементов на поверхностных акустических волнах № 5
- Кернбах С.** Исследование проникающей способности светодиодного и лазерного излучения. Часть 1. № 6
- Кернбах С.** Исследование проникающей способности светодиодного и лазерного излучения. Часть 2. № 7
- Корляков А. В., Устинов Е. М.** Критерии и оптимизация параметров вибродатчиков. № 2

- Лучинин В. В., Муратова Е. Н., Шемухин А. А.** Матрицы из пористого оксида алюминия как капиллярные матрицы-шаблоны для локализации воздействия ионов высоких энергий. № 12
- Мальцев П. П., Гнатюк Д. Л., Федоров Ю. В., Зуев А. В., Галиев Р. Р., Побойкина Н. В.** Исследование малосигнальных и шумовых характеристик метаморфных транзисторов для монолитных интегральных схем в крайневых частотном диапазоне № 6
- Масальский Н. В.** Характеристики субмикронного фотонного фазового модулятора на структуре "кремний на изоляторе". № 10
- Мухуров Н. И.** Электростатический микроактюатор с расширенными функциональными возможностями № 5
- Мухуров Н. И., Ефремов Г. И., Жвавий С. П.** Электростатические микрокоммутаторы. Часть 1. Плоскопараллельные включающие микрокоммутаторы. № 10
- Мухуров Н. И., Ефремов Г. И., Жвавий С. П.** Электростатические микрокоммутаторы. Часть 2. Торсионные включающие микрокоммутаторы. № 11
- Никифоров С. В., Поломошнов С. А., Тихонов Р. Д., Черемисин А. А.** Исследование микросистемы с использованием преобразователей магнитного поля № 4
- Новиков С. Г., Гурин Н. Т., Беринцев А. В., Родионов В. А., Штанько А. А.** Активный координатно-чувствительный фотоприемник с комбинированным фотоэффектом. № 5
- Новиков С. Г., Гурин Н. Т., Беринцев А. В., Родионов В. А., Штанько А. А.** Полупроводниковые фотопреобразователи координат и углов с отрицательной дифференциальной проводимостью. № 3
- Платонов В. В., Генералов С. С., Смахова М. И., Амеличев В. В., Поломошнов С. А.** Электростатический МЭМС-ключ на структуре кремний — стекло № 7
- Рогаткин Ю. Б.** Сложнофункциональный блок мониторинга состояния СБИС № 11
- Рожков Е. В., Акопьян В. А., Паринев И. А., Захаров Ю. Н., Панич А. А., Сокало А. И., Шевцов С. Н.** Универсальный информационно-измерительный комплекс для определения характеристик пьезогенераторов и пьезоактуаторов № 8
- Сергеева А. С., Плешков Д. Н., Горин Д. А.** Микро- и наноструктурированные фотоэлектрические преобразователи № 7
- Уваров И. В., Наумов В. В., Амиров И. И.** Резонансные свойства многослойных металлических нанокантилеверов № 4
- ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ**
- Афанасьев А. В., Демин Ю. А., Иванов Б. В., Ильин В. А., Кардо-Сысоев А. Ф., Лучинин В. В., Смирнов А. А.** Высоковольтный миниатюрный карбидокремниевый источник наносекундных

- импульсов для генерации рентгеновского и микроволнового излучений № 2
- Афанасьев П. В., Ильин В. А., Козырев А. Б., Лучинин В. В., Смелов И. Н.** Рекуперация энергии из эфира. № 12
- Беспалов В. А., Дюжев Н. А., Юров А. С., Чиненков М. Ю., Мазуркин Н. С.** Особенности применения магниторезистивных наноструктур в датчиках автомобильных электронных систем. . . № 11
- Кульчицкий Н. А., Наумов А. В.** Современное состояние тонкопленочной солнечной энергетики . . № 9
- Прокофьев И. В., Суханов В. С.** Комплексование магнитоинерциальных и спутниковых систем навигации для систем мониторинга параметров движения транспорта. № 6
- Прокофьев И. В., Суханов В. С., Амеличев В. В.** Применение тонкопленочных резистивных преобразователей магнитного поля для систем ориентации и интеллектуального мониторинга транспортных средств № 4

СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

- Вишнеков А. В., Ерохин В. В.** Проектирование систем на кристалле: риски и решения № 10
- Зайцев А. А.** Метод построения высокочастотного помехоустойчивого управляемого генератора для "системы на кристалле" субмикронного КМОП-базиса. № 4
- Мальцев П. П.** Перспективы создания систем на кристалле для СВЧ и КВЧ диапазонов. № 4

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

- Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть I. № 1
- Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть II. № 3
- Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть III. № 5
- Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть IV. № 6
- Голоудина С. И., Карагеоргиев П. П., Лучинин В. В., Пасюта В. М.** От молекулярного наслаивания к эпитахсии органических веществ методом Ленгмюра — Блоджетт № 12
- Зимина Т. М., Соловьев А. В., Лучинин В. В., Муратова Е. Н., Краева Л. А., Хамдулаева Г. Н.** Принципы создания гибридных миниатюрных приборов для выращивания колоний микробных клеток на основе пористого анодного оксида алюминия № 12
- Мосин О. В., Игнатов И. И.** Природный фотопреобразующий фотохромный белковый наноматериал бактериородопсин из пурпурных мембран галобактерии *Halobacterium halobium*. № 7

CONTENTS

- Luchinin V. V.** *Multidisciplinary Technologies. Flexible Electronics and Photonics* 2
Basic trends of development of multidisciplinary technologies of excellence in the sphere of micro- and nanotechnics creation are presented.
Keywords: micro- and nanotechnologies, interdisciplinary, flexibility, three-dimensionality, heterogeneity, electronics, photonics
- Afnasjeva O. V., Kalinin S. B., Luchinin V. V.** *Network Integration of National Nanotechnological Network' Educational Segment — Database of Scientific and Technical Production, Informational and Educational Service* 7
The results of forming of a search information system and database of scientific and educational centre of national nanotechnological network' educational segment are presented.
Keywords: database, educational segment, scientific and educational centre, national nanotechnological network
- Korlyakov A. V., Luchinin V. V., Marasina L. A.** *On the Question of Formation of Professional Standards for Nanoindustry* 14
Basic positions that definite and introduction of professional standards in Russian Federation are presented. The peculiarities of professional standards for nanoindustry sphere are defined.
Keywords: professional standard, nanoindustry, capacity, valuation and certification of qualification
- Zimina T. M., Soloviev A. V., Luchinin V. V., Muratova E. N., Kraeva L. A., Hamdulaeva G. N.** *Principles of Hybrid Porous Alumina Based Miniature Devices for Microbial Cell Culture Passage* 19
Results of design and technology of laboratory on a chip and portable devise for microbiological analysis. Sample devices and elements are described. The device could be used for investigation of clinical microbiological samples, particularly in express microbiological diagnostics including antibiotic susceptibility testing, in laboratory and in field conditions and in corresponding telemetric systems. The main aim of the device is reduction of microbial cells cultivation task and automation of nutrient delivery, separation from growth sites and transport of colonies, possibility of integration into miniature portable devices.
Keywords: laboratory on a chip, microbiological analysis, anodic alumina
- Goloudina S. I., Karageorgiev P. P., Luchinin V. V., Pasyuta V. M.** *From Molecular Layup to Epitaxy of Organic Substances by Langmuir—Blodgett Method* 34
The films formed by transfer on the substrate of the hexadecylphosphatidylcholine molecules adsorbed on water surface have the structure of stearic acid Langmuir—Blodgett-film, therefore the epitaxy of organic molecules on the solid substrate is possible.
Keywords: Langmuir—Blodgett method, epitaxy, phospholipids, stearic acid
- Luchinin V. V., Muratova E. N., Shemuhin A. A.** *Matrix of Porous Aluminum Oxide as Capillary Matrix — Templates for Localizing of the High-Energy Ions Effect* 39
Capillary matrix of alumina with different structural parameters, which were investigated for passing of charged ions beams therethrough them were created. The passing coefficient of ions through the membrane is 0,625.
Keywords: porous alumina, membrane, capillaries, ion beams, quading effect
- Kalyonov V. E., Brojko A. P., Korlyakov A. V., Khmelniitskiy I. K., Chigirev D. A., Bykov Yu. O., Lagosh A. V., Krot A. I.** *Microactuators for Microrobots* 41
The analysis of main micromechanic actuators that convert stored and external energy into mechanical movement for possibility their application in microrobotics is offered. There is comparison of the main features of actuators: efficiency, maximum force, displacement, operating speed. The results of research of electroactive polymer actuators for microrobotics are discussed.
Keywords: MEMS, microactuators, microrobotics, electroactive polymer
- Afnasjev P. V., Ilyin V. A., Kozyrev A. B., Luchinin V. V., Smelov I. N.** *RF Energy Rectifying Antenna Converter* . 47
2,4 GHz rectifying antenna converter for energy harvesting is considered. Constructive and functional features of converter are observed. Calculation and optimization of converters schematic part are performed. Conversion efficiency of rectifying antenna converter is evaluated. It is equal to 40 % in case of 500 Ohm load.
Keywords: rectenna, energy converter, alternative energy

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 Professor Petr P. Maltsev,

Deputy of Editor-in-Chief Professor Victor V. Luchinin (Russia),

Deputy Editor-in-Chief Professor Michael S. Shur (USA)

ISSN 1813-8586.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(499) 269-5510.

E-mail: nmst@novtex.ru; http://novtex.ru/nmst/

Pleas see previous journal's issues at our website (<http://novtex.ru/nmst>)

For any further question, please contact us by e-mail: nmst@novtex.ru

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства

в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т. Н. Погорелова. Технический редактор Е. М. Патрушева. Корректор Т. В. Пчелкина

Сдано в набор 21.10.2013. Подписано в печать 25.11.2013. Формат 60×88 1/8. Заказ МС1213.

Цена договорная

Оригинал-макет ООО «Авансд соллошнз».

Отпечатано в ООО «Авансд соллошнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.