

УДК 621.3+620.3

В. В. Лучинин, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,
e-mail: cmid_leti@mail.ru,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет "ЛЭТИ"

Ì ÈËËË - È Í ÁÍ Î ÐÀÕÍ ÈÈÀ. ÐÀÕÍ Î ÈÎ ÆÈÈ Ì ÒÁÁÎ ÑÛÎ ÆÛÒÁÁ

Поступила в редакцию 20.09.2012

Представлен анализ технологии превосходства как интеллектуального базиса нового технологического уклада. В рамках направления "Микро- и нанотехника" рассмотрены основные направления эволюции материаловедческого базиса как основы развития технологий превосходства.

Ключевые слова: микро- и нанотехника, технологии превосходства, технологический уклад, конвергентные системы, бионические технологии

Введение

В "Стратегии инновационного развития РФ на период до 2020 г." [1] представлены три варианта инновационного развития России:

- инерционного — ориентированного на импорт технологий и оборудования;
- догоняющего — ориентированного на избирательное стимулирование отечественных разработок;
- лидирующего — ориентированного на лидерство по ряду направленных высокотехнологичной продукции и услуг, а также фундаментальных исследований.

Безусловно, предпочтительным является последний, требующий: огромных финансовых вложений, восстановления лидирующих позиций Российской фундаментальной науки, формирования развитой национальной инновационной системы, интегрированной в транснациональную, а также резкого увеличения научных и инженерных кадров с необходимым уровнем компетенций.

Фактически данный сценарий развития определяет достаточно амбициозную цель — "от технологической модернизации к революции".

Очевидно, что интегральное достижение данной цели в ближайший период времени невозможно. Однако в условиях современных вызовов и угроз, имеющих место по отношению к различным аспектам безопасности России, данный вопрос приобретает национальный приоритет [2].

В отечественной научно-технической среде все более широко используется заимствованное понятие "центр превосходства" (*center of excellence*), который характеризуется тремя основными признаками:

- исследования и разработки выполняются центром в прорывных областях знаний;
- центр обладает уникальным материально-техническим оснащением;
- центр обеспечен высокопрофессиональными кадровыми ресурсами.

Целью данной работы является определение и анализ возможных технологий превосходства как основы развития инновационной экономики России и обеспечения безопасности государства.

Базовые составляющие стабильности и устойчивости развития России могут быть интегрированы в рамках схемы, представленной на рис. 1.

В основе так называемой мягкой силы лежит интеллектуальный потенциал нации и инновационность продукции, конкурентоспособность которой достигается:

- максимально динамичным использованием имеющихся научных заделов;

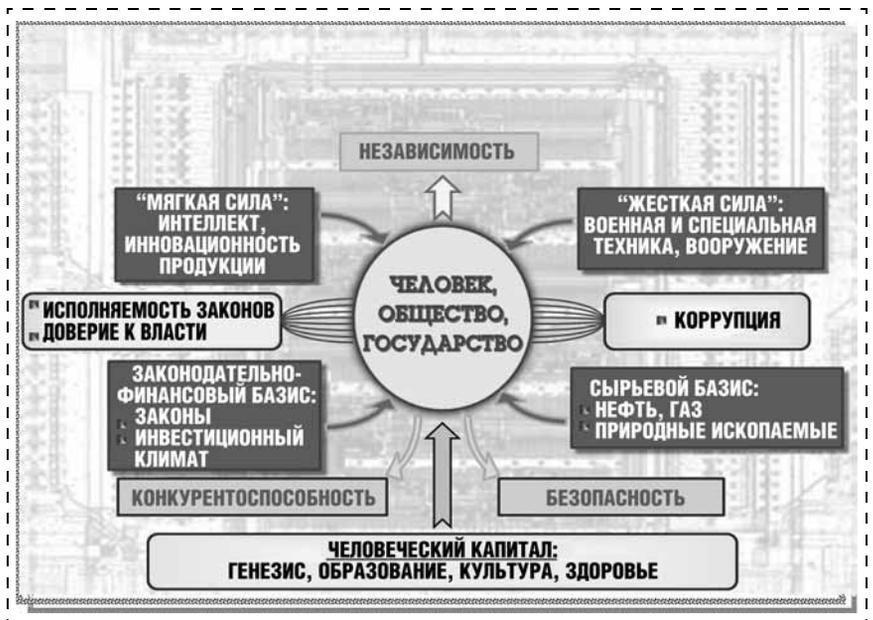


Рис. 1. Базовые составляющие стабильности и устойчивости развития государства

- системным заимствованием элементов наиболее передовых зарубежных технологий;
- поиском и реализацией оригинальных подходов и решений при выборе способов достижения цели с формированием новых технологических ниш.

Приоритетным направлением приложения усилий в рамках последнего положения являются технологии оборонно-промышленного комплекса (ОПК) — базис национальной и технологической безопасности государства. Фактически, как это было сформулировано в материалах совещания Совбеза РФ [3] (31 августа 2012 г., Ново-Огарёво) по вопросу стратегического планирования развития ОПК, на ближайший период времени развитие ОПК нового поколения может рассматриваться как "национальная идея". С учетом сформулированных ранее [2] приоритетных направлений развития ОПК и доминирующих технологических направлений значение микро- и нанотехники в обеспечении конечной цели — *сохранение паритета и достижение превосходства в наукоемкой продукции на мировом рынке военной и специальной техники, а также переход к шестому технологическому укладу* — не вызывает сомнения.

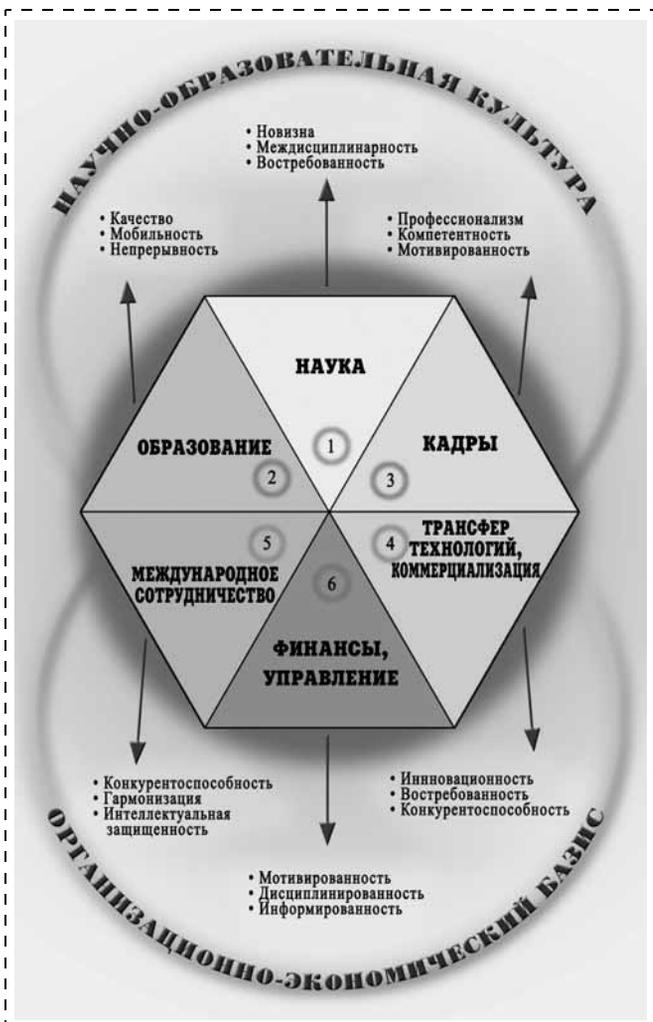


Рис. 2. Базовые критерии эффективности инновационного развития по ключевым направлениям

Следует отметить, что движущими факторами, определяющими динамику становления и развития нового технологического уклада, являются не только экономические стимулы, но и ряд таких безусловных приоритетов государства, как национальная и технологическая безопасность, а также социальная востребованность продукции и предоставляемых услуг. Для достижения поставленной цели следует определить возможные базовые критерии эффективности инновационного развития страны в рамках ключевых составляющих научно-образовательной культуры и организационного экономического базиса (рис. 2).

Понятие "технологический уклад"

Под *технологическим укладом* фактически понимают некоторый уровень производства, характеризующийся совокупностью базовых технологий, опирающихся на достигнутый ресурсный, научно-технологический и кадровый потенциалы.

Понятие "технологический уклад" [4] берет свое начало из теоретических представлений о циклической динамике процессов в экономике, развитых русским ученым-экономистом Н. Д. Кондратьевым. В основе теории лежит представление о существовании больших по продолжительности (около 50 лет) экономических циклов, в процессе которых осуществляется переход производительных сил на следующий, более высокий уровень развития. Считается [5], что термин "технологический уклад" (волна) введен российскими учеными-экономистами Д. С. Львовым и С. Ю. Глазьевым. Формально "уклад" — это устройство, установившийся порядок жизни.

В соответствии с представлениями Н. Д. Кондратьева временная динамика научно-технических революций опосредованно определяет переход к новому технологическому укладу. В литературе [6] указывают на пять так называемых волн, соответствующих во времени определенному технологическому укладу, и на зарождение нового, VI, технологического уклада в ряде наиболее динамично развивающихся стран: США, Японии, КНР.

В табл. 1 представлены результаты нашего анализа данных волн начиная с XIX столетия, ориентированные на выявление базовых технологий, определяющих становление технологического уклада и его особенности, т. е. признаки, характеризующие его несомненную новизну. Далее представлен также наш прогноз (табл. 2) развития базовых технологий VI технологического уклада, который, по мнению, изложенному в работе [7], начнет оформляться в 2010—2020 годах, а в фазу зрелости вступит в 2040-е годы.

Характеризуя V технологический уклад, особо выделим интегрирующую системную роль микро-техники в решении комплекса задач обеспечения безопасности технических систем и человека, расширения его функциональных возможностей (рис. 3). Основными направлениями инвестиций в микро- и наносистемы в этот период времени являются

Характеристики технологических укладов

Технологические уклады	Временные интервалы	Базовые технологии (производства)	Характерные особенности
II	1830—1890 гг.	Механическое производство	Развитие железнодорожного и водного транспорта Использование пара
III	1880—1940 гг.	<ul style="list-style-type: none"> • Металлургия • Машиностроение • Электротехника 	Тяжелое и энергетическое машиностроение Автомобилестроение Радиосвязь Использование электрической энергии
IV	1930—1990 гг.	<ul style="list-style-type: none"> • Химические технологии • Точное машиностроение • Радиоэлектронные технологии • Авиационно-космические технологии 	Радиоэлектроника Компьютерные технологии Массовое производство различных транспортных средств Конвейерные технологии Использование атомной энергии
V	1985—2035 гг.	<ul style="list-style-type: none"> • Материаловедение • Микро- и нанoeлектроника • Информационные технологии • Биотехнологии 	Интернет-технологии Высокоскоростные транспортные сети Биомедицинские технологии Развитие энергосберегающих технологий

Таблица 2

Прогнозируемые базовые технологии VI технологического уклада

Технологический уклад	Временные интервалы	Базовые технологии (производства)	Характерные особенности
VI	2020 г.—...г.	<ul style="list-style-type: none"> • Атомно-молекулярная инженерия • Бионическая инженерия и робототехника • Биоинформационные и сетевые технологии • Микро- и наноэнергетика • Космические технологии 	Глобальные информационно-коммуникационные сети Системы искусственного интеллекта и искусственные органы Комплексная роботизация Нетрадиционная энергетика Освоение труднодоступного земного и внеземного пространства



Рис. 3. Микротехника — основа V технологического уклада

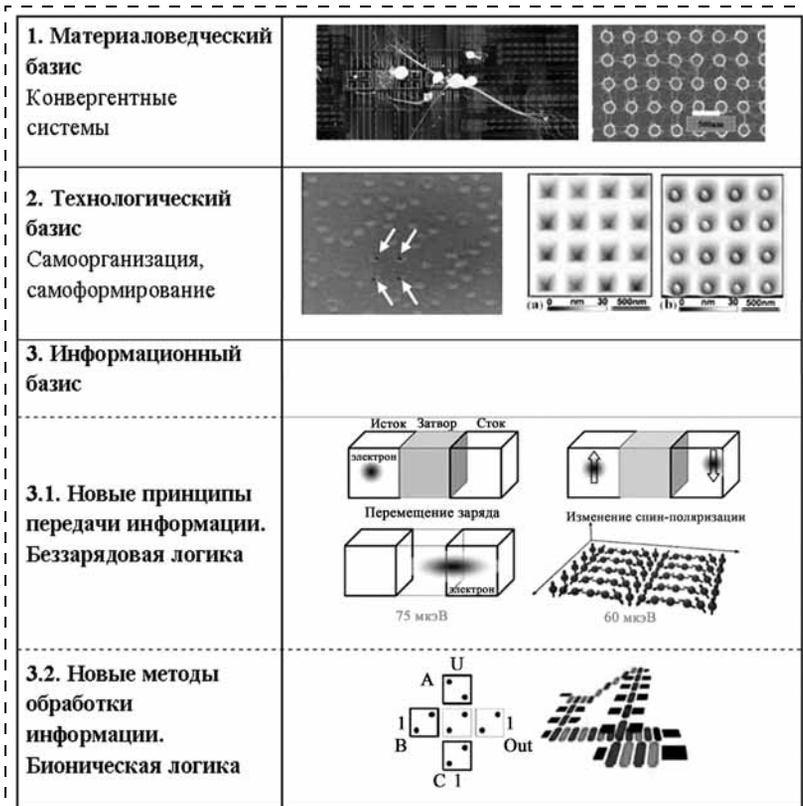


Рис. 4. Основы естественно-научного базиса микро- и нанотехники VI технологического уклада

чипы: сенсорные полифункциональные, паспортно-визовые, контрольно-пропускные, биометрические, глобальной навигации, локальной навигации, медико-биологические, радиокommunikационные.

Характеризуя исследование в области микро-техники для решения задач военного и специального назначений, следует выделить достижение с ее помощью таких целей, как:

- повышение точности систем индивидуальной навигации в условиях города и незнакомой местности;
- повышение точности управления боеприпасами для обеспечения характеристик высокоточного оружия;
- обеспечение высокоточного позиционирования и стабилизации антенн и оружия;
- управление и навигация беспилотными летательными аппаратами;
- обеспечение разведывательных функций сверхминиатюрными системами, в том числе гибридными биотехническими.

Возьмем на себя ответственность и представим базовые тенденции развития VI технологического уклада (см. табл. 2) и, в частности, естественно-научного базиса микро- и нанотехники в рамках материаловедческого, технологического и информационного направлений (рис. 4).

Следует особо отметить, что основным системным стратегическим направлением, по-видимому, будет являться активное использование ранее неизвестных

свойств материалов и композиций, возникающих при переходе к объектам:

- свойства которых зависят от размерного и конформационного факторов;
- представляющих собой интеграцию искусственно и естественно упорядоченных систем;
- интегрирующих материаловедческий базис неорганической и органической природы;
- в основе структурной организации которых лежат неравновесные процессы;
- в основе функционирования которых лежит комплекс кооперативно-синергетических процессов и явлений.

В рамках решения задач по синтезу и практическому использованию объектов с вышеуказанными свойствами необходимо определить и возможные приоритетные направления фундаментально-поисковых исследований для обеспечения интеллектуального базиса инноваций VI технологического уклада:

- нетрадиционные виды симметрии и конформации с динамически перестраиваемой структурой;
- зависимость свойств материалов и систем от характеристических размеров и композиционно-структурной организа-

ции (нано- и метаматериалы);

- сбор и концентрация различных видов энергии "из эфира";
- передача энергии, заряда и информации на основе кооперативных синергетических процессов;
- "управление" физическими полями, в том числе локально-селективное в широком диапазоне длин волн и энергий;
- процессы самоформирования, самоупорядочения и самоорганизации;
- молекулярное распознавание как базис селективности и избирательности процессов;
- конвергентные системы — интеграция создаваемых человеком искусственных неорганических систем и объектов биоорганической природы (рис. 5).

В качестве основных направлений прикладных исследований, определяющих продуктивную модель развития в рамках VI технологического уклада, можно выделить:

- нано- и метаматериалы;
- распределенные самоорганизующиеся рефлексивные информационные сети;
- полифункциональный адаптивный человеко-машинный интерфейс;
- искусственные органы и биоробототехнические системы;
- бионические, в том числе когнитивные, алгоритмы и принципы функционирования;
- искусственное модифицирование на генетическом, клеточном и органном уровнях;
- искусственное модифицирование на психофизиологическом уровне.

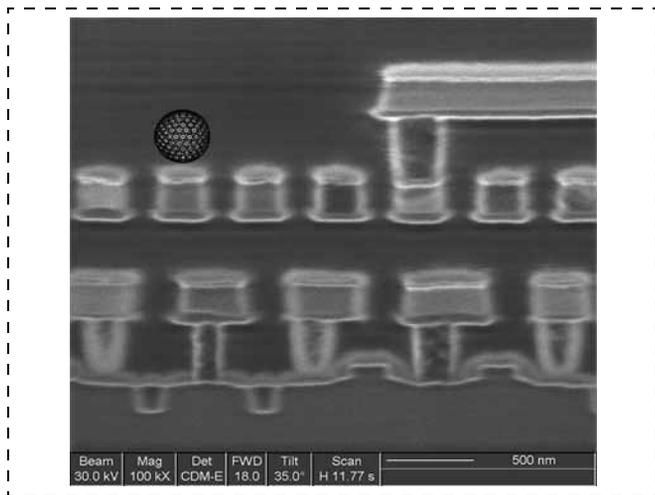


Рис. 5. Сопоставление поперечного сечения кристалла интегральной схемы с наноразмерными топологическими нормами и вируса

В практику создания систем должен достаточно широко войти новый терминологический базис — конвергентные системы, бионические и когнитивные технологии [8].

Следует особенно обратить внимание на тот факт, что человек, оценивая конструктивно-функциональные, энергетические и информационные достоинства объектов органической природы, часто пытается наделить искусственно создаваемые технические системы отдельными свойствами биосистем.

Приоритеты VI технологического уклада. Конвергентные системы и бионические технологии

Определяя основные принципы столь бурного развития интегрированных систем на основе наноразмерных элементов и конвергентных (от лат. *convergere* — сближение) систем на основе интеграции элементов различной физико-химической природы (органической, биоорганической, неорганической), выделим ориентацию на среды и системы, обладающие максимальной физиологической совместимостью с человеческим организмом и информационной адаптивностью к алгоритмам его функционирования.

Особую роль приобретает именно "интерфейс" между живой и неживой природой. Современное состояние вопроса в области разработки и создания устройств на основе биосред и их аналогов характеризуется следующими направлениями:

- использование биосред в традиционных приборах, например, применение в качестве материалов затвора полевого транзистора или оптического волновода;
- использование биосред в реализации прецизионных технологических операций, например, биолитографии с наномолекулярным разрешением;
- создание биосенсоров и актюаторов инвазивного и неинвазивного типов для диагностики и биокоррекции состояния организма;
- создание функциональных биопротезов, обеспечивающих замещение утраченных органов или функций (слух, зрение и даже обоняние);

- попытка создания сверхмощных систем искусственного интеллекта на основе биейрочипов и сред с нейроподобной структурой.

При рассмотрении биосред как одного из элементов базиса для создания конвергентных искусственных интеллектуальных и сенсорных наносистем будущего [9] в первую очередь следует обращать внимание на функционально-технологические особенности, определяемые структурными конформационными свойствами биомолекул и композиций на их основе, в том числе с использованием неорганических матриц. При этом следует учитывать, что конформация является результатом энергетической адаптации на молекулярном уровне. Абстрагируясь от принципов обработки и анализируя только функционально-вещественный базис трех наиболее перспективных направлений использования биосред (биосенсоры, биопроцессоры, биопротезы), невозможно не обратить внимание на следующие известные особенности биосред, привлекательные для создания на их основе конвергентных систем как в функциональном, так и в технологическом аспектах:

- "биофизическое" преобразование информации, характеризующееся кооперативными нелинейными процессами, глубоким распараллеливанием информационных каналов и генерацией информации;
- "биохимическое" усиление, характеризующееся встроенными источниками энергии и электрического потенциала в сочетании с переносом заряда и энергии практически без потерь;
- селективность по отношению к внешним информационным и технологическим возмущениям, обеспечивающая локализацию и избирательность воздействия;
- синтез сред и систем с использованием процессов матричного копирования, самосборки, самоорганизации, отбора и даже размножения.

Таким образом, *биоорганические и конвергентные биеоорганические надмолекулярные композиции за счет структурно-морфологического и химического многообразия, а также особенностей переноса в них энергии, заряда и проявления свойств, присущих биосредам, могут рассматриваться как основа "функциональных" сред будущего, характеризующихся сверхбольшой информационной емкостью, высокой удельной энергонасыщенностью, селективностью к внешним воздействиям, ассоциативностью и распределенностью процессов обработки информации. В них также могут сочетаться процессы функционирования и самообновляющегося синтеза.* Неорганический элемент надмолекулярной композиции может выполнять функции не только субстрата, но и активной диагностирующей или исполнительной среды.

Характеризуя современное состояние в области создания интеллектуальных систем в интересах человека и общества (рис. 6), следует определить два наиболее прогрессивных динамично развивающихся направления:

- информационные технологии;
- бионические технологии.



Рис. 6. Основные направления развития интеллектуальных систем в интересах человека и общества

Известные междисциплинарные технологии "BIO-ICT", "MASSIVE-ICT", "SMART-ICT" для достижения поставленных целей создания информационно-коммуникационных систем нового поколения используют объекты органической природы, комбинации органических и неорганических структур, а также ориентируются на присущие (наиболее часто) живым системам явления самоорганизации, адаптации и обучения, причем для их наиболее эффективного проявления создаются сверхбольшие массивы (до 10^{13}) традиционных базовых электронных элементов на кристалле, которые в условиях влияния наноразмерного фактора вступают в синергетическое взаимодействие.

Положительным фактором, характеризующим развитие междисциплинарных технологий, является их направленность на обеспечение индивидуальной комфортной безопасной среды обитания и функционирования человека. Для систем на базе вышеуказанных технологий характерны миниатюрность, мобильность, интегрируемость, информационная емкость. Фактически это реальное проявление истинного адаптивного "дружественного" интерфейса между техническими системами и человеком для обеспечения его жизнедеятельности.

Заключение

Комплекс технологий, которые, по мнению автора, в первую очередь могут быть отнесены к технологиям превосходства, определяющим технологическую независимость и безопасность государства, представлен в виде обобщающей схемы на рис. 7. Фактически это — интеллектуальный базис нового технологического уклада.

Обобщенные представления, отражающие взгляды автора данной статьи на возможные направления эволюции материаловедческого базиса в целях обеспечения развития технологий превосходства и создания на их основе изделий микро- и нанотехники с ранее недостижимыми массогабаритными, энергетическими и тактико-техническими характеристиками, иллюстрирует рис. 8.

Приоритетные технологии военного и специально назначений, реализуемые на основе микро- и нанотехники, которые наиболее часто обсуждаются в открытой печати [10], могут быть обобщены в рамках табл. 3.

Учитывая, что создаваемые технологии превосходства по праву можно назвать интеллектуальным потенциалом нации, следует использовать ряд новых подходов к его оценке, включая вопросы экономической эффективности, защиты интеллектуальной собственности и мотивации инноваций.

Таковыми организационно-экономическими элементами, необходимыми для обеспечения динамичного формирования VI технологического уклада, являются:

- доминирование при оценке эффективности наукоемкой продукции критериев "потребительских" качеств, базирующихся на ее интеллектуальном инновационном потенциале, социальной и оборонной значимости (от чисто стоимостных пара-

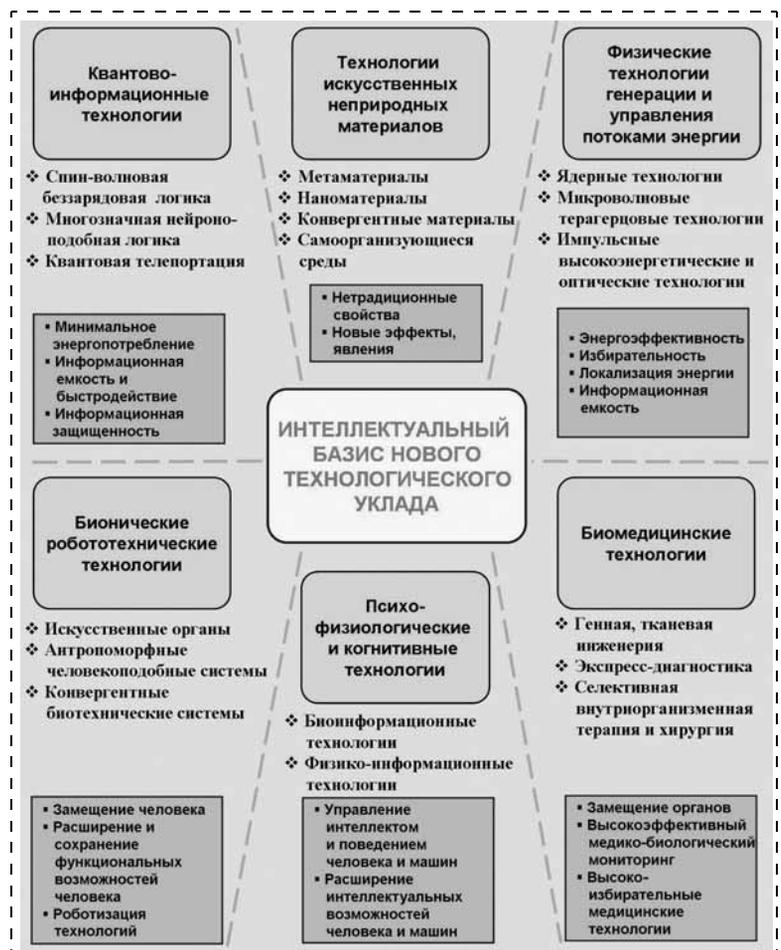


Рис. 7. Технологии превосходства как интеллектуальный базис нового технологического уклада



Рис. 8. Эволюция материаловедческого базиса как основа развития технологий превосходства

Таблица 3

Приоритетные направления технологий специального назначения

№	Приоритетные технологии	Цели, задачи	Состояние проблемы (известные афоризмы)
1	Интеллектуальные анти-террористические технологии	Безопасность в зонах массового нахождения людей	"Слишком много информации, слишком мало интеллекта"
2	Человекозамещающие технологии	Замещение функций человека в экстремальных условиях	"Вот части все в твоих руках, однако им — увы и ах — не достаёт духовной связи"
3	Неядерные избирательные технологии	Высокоэффективное оружие на новых физических и биологических принципах	"В воздействии важна не только амплитуда, но и пространственно-временная структура"
4	Информационно-безопасные технологии	Высокоскоростные защищенные технологии на новых материалах и принципах	"Больше мысли в маленьком объеме"
5	Конвергентные системы и бионические технологии	Дружественный адаптивный человеко-машинный интерфейс. Умная полифункциональная одежда	"Чувствовать значит быть, думать значит жить"

метров эффективности продукции к ее интеллектуальному потенциалу);

- сбалансированность финансирования при создании новых производственных мощностей и научно-образовательных кластеров для генерации идей и кадров (паритет вложений в расходы на создание материальной и интеллектуальной продукции);
- интеграция в мировое разделение труда при внутренней и внешней защите интеллектуальной собственности, реализованной в научно-технической продукции, создаваемой в рамках государственного финансирования (защита интеллектуального потенциала государства);
- резкое возрастание значимости интеллектуальной составляющей человеческого капитала, доминирование в достижении эффективности труда индивидуального профессионального фактора, социальных и мотивационных аспектов деятельности (инновации должны иметь мотивации).

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. **Распоряжение** Правительства РФ от 8 декабря 2011 года № 2227 р. "Стратегия инновационного развития РФ на период до 2020 г."
2. **Путин В. В.** "Быть сильным: гарантии национальной безопасности России" // Российская газета, 20 февраля 2012 г.
3. **Стенограмма** Совещания Совбеза РФ. 31 августа 2012 г. Ново-Огарёво. URL: www.kremlin.ru/transcripts
4. <http://www.smartcut.ru/Referat/etyekramrv.shtml>
5. **Технологический** уклад. Словари. URL: <http://slovari.yandex.ru/dict/lopatnikov/article/lop/lop-1545.htm>
6. **Технологические** уклады. URL: <http://www.inventech.ru/lib/macro/macro-0026/>
7. **Руленко Б.** Шестой технологический уклад. Интервью с академиком Е. Кабловым // Наука и жизнь. 2010. № 4. С. 2—7.
8. **Карасев А. В., Лучинин В. В.** Введение в конструирование бионических наносистем // М.: Физматлит, 2009. 464 с.
9. **Ковальчук М. В.** Конвергенция наук и технологий — прорыв в будущее. // Российские нанотехнологии. 2011. Т. 6, № 1—2. С. 13—23.

УДК 621.315.592

С. И. Голоудина¹, канд. хим. наук, ст. науч. сотр.,
В. В. Лучинин¹, д-р техн. наук., проф.,
В. М. Пасюта¹, канд. техн. наук, науч. сотр.,
М. Б. Криштаб¹, аспирант,
М. Ф. Панов¹, канд. физ.-мат. наук, доц.,
В. В. Розанов², канд. техн. наук, науч. сотр.,
В. П. Склизкова³, канд. хим. наук, ст. науч. сотр.,
В. В. Кудрявцев³, д-р хим. наук, гл. науч. сотр.,
М. Р. Бакланов⁴, д-р хим. наук, проф.,
 e-mail: goloudina@mail.ru, vrasuyuta@yandex.ru,
 mikhail.krishtab@gmail.com

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

² Институт аналитического приборостроения РАН

² Санкт-Петербургский академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий РАН

³ Институт высокомолекулярных соединений РАН

⁴ Научно-исследовательский центр IMEC, г. Лювен, Бельгия

Т НІ ААІ І Т НОЕ НОРІ АІ ЕВ Е
 І АРНІ АЕОЕАУ ЕНІ Т ЕУСІ ААІ ЕВ
 І ЕАІ Т Е ЕАІ АІ РРА—АЕІ АЕАОД
 ЕАНОЕІ ОАІ І Т АІ І Т ЕЕЕІ ЕАА

Поступила в редакцию 20.09.2012

Обсуждаются результаты исследования пленок Ленгмюра—Блоджетт преполимера полиимида — алкиламмонийной соли жесткоцепной полиаминокислоты и соответствующего полиимида, полученные методами эллипсометрии, атомно-силовой микроскопии, малоуглового рентгеновского рассеяния и рентгеновской рефлектометрии. Показана эффективность использования наноразмерных полиимидных пленок для прецизионного снижения внутреннего напряжения в мембране из нитрида кремния, а также в качестве покрытий, стабилизирующих электретный заряд в структуре SiO₂—полиимид. Продемонстрирована высокая планаризирующая способность рассматриваемых пленок.

Ключевые слова: полиимид, Ленгмюр—Блоджетт, мембраны, герметизация пор

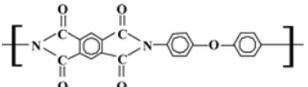
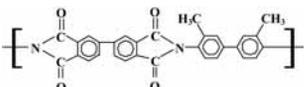
Введение

Развитие элементной базы нанoeлектроники и наносистемной техники неразрывно связано с поиском новых материалов и методов, позволяющих

формировать наноструктуры и наноконпозиции различного функционального назначения. В этой связи особый интерес представляет применение наноразмерных полимерных пленок с повышенным уровнем эксплуатационных характеристик — высокой термостабильностью, механической и химической стойкостью. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют ароматические полиимида [1]. Полиимида (ПИ) широко используют в различных областях техники, в том числе при создании СБИС в качестве межслойной изоляции и защитного покрытия. Для получения пленок ПИ на твердую подложку сначала наносят пленку преполимера в виде раствора полиаминокислоты (ПАК), затем проводят химическую или термическую имидизацию, в результате которой образуется ПИ. Для формирования пленки преполимера ПИ используют методы полива или центрифугирования. Методом полива обычно получают пленки толщиной 10...100 мкм. Метод центрифугирования позволяет получать более тонкие пленки — в диапазоне 0,1...10 мкм. Однако с уменьшением толщины неизбежно возникают проблемы, связанные с однородностью покрытия пленкой поверхности подложки. Наноразмерные пленки ПИ с высокой степенью однородности могут быть получены с помощью метода Ленгмюра—Блоджетт (ЛБ) [2]. В этом случае преполимером служит алкиламмонийная соль ПАК, молекулы которой являются дифильными и имеют способность образовывать монослой на поверхности воды. Монослой соли ПАК переносят на твердую подложку методом ЛБ. В ходе имидизации пленки ЛБ соли ПАК ее толщина существенно уменьшается, так как происходит удаление алифатических радикалов из пленки. Толщина одного слоя в пленке ПИ зависит от химического строения полимерной цепи и составляет 0,4...0,5 нм, а общая толщина пропорциональна числу слоев в пленке ЛБ соли ПАК. Совершенство пленок ЛБ ПИ (структурная упорядоченность, однородность по толщине) зависит от многих факторов, в том числе от химического строения преполимера ПИ, условий формирования монослоя на поверхности воды и условий переноса его на твердую подложку, а также от способа и режима проведения имидизации. В настоящей работе основное внимание уделено пленкам ПИ, образованным в результате термической имидизации.

За последние годы были проведены исследования, показавшие возможность применения пленок ЛБ ПИ в качестве ультратонких диэлектрических слоев [3], ориентирующих слоев в жидко-кристаллических ячейках [4], а также в качестве резистов [5] и матриц для фиксации биологически активных

Сравнение характеристик гибкоцепного и жесткоцепного полиимидов

Типы полиимидов	ρ , Ом·см	ϵ	КТР, 10^{-5} K^{-1}	τ_5 , °C
ПМ (Kapton) — гибкоцепный полиимид 	$5 \cdot 10^{16} \dots 1 \cdot 10^{18}$	3,0...4,5	3,0	525
ДФ-оТД — жесткоцепный полиимид 	10^{17}	3,2...3,3	0,5	560

молекул [6]. Практически во всех работах для исследования использовали пленки гибкоцепного ПИ ПМ (Kapton). Однако на примере макропленок ПИ было показано, что жесткоцепные ПИ имеют ряд преимуществ по сравнению в гибкоцепными ПИ. В табл. 1 приведены химические формулы и сравнительные характеристики ПИ ПМ и ДФ-оТД. Достоинством ПИ ДФ-оТД является то, что, помимо высокой термостабильности (τ_5 — температура, при которой полимер теряет 5 % своей массы), механической прочности и низкой диэлектрической проницаемости, он имеет коэффициент термического расширения (КТР), близкий к КТР основных материалов электронной техники. Для него характерны высокая электрическая прочность и повышенная радиационная стойкость, а также хорошая адгезия к материалам, используемым в электронной промышленности. В зарубежных лабораториях для получения пленок ПИ с помощью метода ЛБ в качестве преполимера в основном используют алкиламмонийную соль гибкоцепной ПАК ПМ с двумя цепями третичного амина в повторяющемся звене. Наши исследования [7] показали, что преполимер — алкиламмонийная соль жесткоцепной ПАК ДФ-оТД с шестью цепями третичного амина в повторяющемся звене ($6C_{18}$) (рис. 1) образует более стабильные монослои на поверхности воды, что обеспечивает более высокое качество переноса монослоя на твердую подложку.

В настоящей работе обобщены результаты исследования пленок ЛБ преполимера и ПИ ДФ-оТД метода-

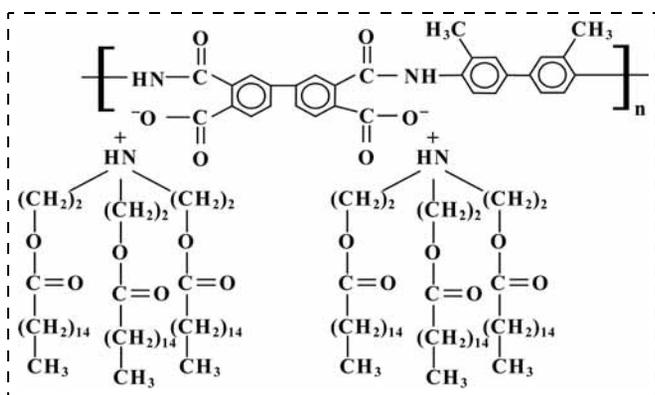


Рис. 1. Структурная формула алкиламмонийной соли ПАК ДФ-оТД ($6C_{18}$)

ми эллипсомерии, атомно-силовой микроскопии (АСМ), малоуглового рентгеновского рассеяния и рентгеновской рефлектометрии, а также приведены примеры возможного использования наноразмерных пленок ПИ.

Особенности строения пленок жесткоцепного полиимида

Пленки ЛБ соли ПАК получали на установке, изготовленной в Санкт-Петербургском государственном университете [8]. Условия формирования пленок ЛБ алкиламмонийной соли ПАК ДФ-оТД ($6C_{18}$) и соответствующего ПИ приведены в работах [7, 9]. Измерения толщины пленок проводили на эллипсомере ЛЭФ-101. Толщину и показатель преломления рассчитывали в рамках однослойной модели методом Холмса. Изображения поверхности пленок получали на воздухе с помощью атомно-силового микроскопа "Смена" (производство фирмы НТ-МДТ, Россия). Исследование поверхности проводили в прерывисто-контактном режиме с использованием кантилеверов NSC11 с радиусом кривизны 10 нм.

На основании анализа изотерм сжатия (зависимостей поверхностного давления монослоя преполимера от площади, приходящейся на одно повторяющееся звено полимерной цепи) [7] было показано, что полимерные цепи макромолекул соли ПАК образуют на поверхности воды плотную укладку, при этом взаимодействие между основными цепями преполимера и их боковыми алифатическими ответвлениями обеспечивает более высокую стабильность этих монослоев по сравнению с монослоями преполимеров, содержащих в повторяющемся звене две алифатические цепи. При формировании пленок ЛБ на кремниевых подложках наблюдался Y-тип переноса с коэффициентом переноса, близким к единице.

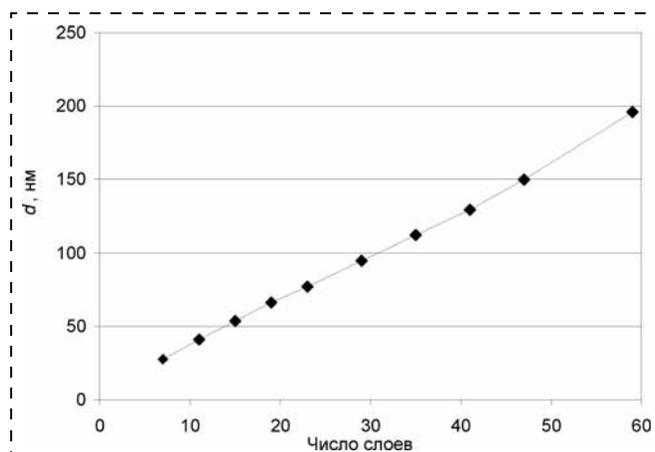


Рис. 2. Зависимость толщины пленки ЛБ соли ПАК от числа слоев

Таблица 2

Толщина и показатель преломления пленок ЛБ соли ПАК

π , мН/м	Толщина пленки (29 слоев), нм	Расчетная толщина одного слоя, нм	Показатель преломления
20	91,2 ± 2,4	3,16	1,518 ± 0,017
25	92,5 ± 0,8	3,19	1,533 ± 0,006
30	94,4 ± 0,7	3,25	1,534 ± 0,004
35	95,8 ± 0,2	3,30	1,536 ± 0,002

Одним из преимуществ метода ЛБ по сравнению с другими методами формирования ультратонких пленок является возможность контролировать толщину пленки в процессе ее формирования с точностью до толщины одного монослоя. Представленная на рис. 2 зависимость толщины пленки ЛБ соли ПАК от числа слоев носит линейный характер, что свидетельствует о равномерном покрытии монослоем подложки в процессе переноса. Исследование пленок ЛБ методом эллипсометрии позволяет не только зафиксировать изменение ее толщины с ростом числа слоев в пленке, но и сделать выводы об изменении толщины монослоя в зависимости от условий его формирования. Так, например, из данных, приведенных в табл. 2, можно сделать вывод, что с ростом поверхностного давления в монослое его толщина увеличивается. Пленки, полученные при давлении монослоя 20 мН/м, имеют показатель преломления меньше, чем пленки, полученные при 25 мН/м и выше, что свидетельствует о формировании плотной упаковки полимерных цепей только при поверхностном давлении 25 мН/м.

Наблюдается хорошее совпадение значений толщины одного слоя в пленках ЛБ соли ПАК, сформированных при давлении 30 мН/м, полученных на основании данных эллипсометрии и метода малоуглового рентгеновского рассеяния. В первом случае толщина составляет 3,3 нм, а во втором случае — 2,8 нм. Согласно модельным представлениям о строении молекулы соли ПАК, полученные значения указывают на вертикальную ориентацию боковых алифатических цепей макромолекул относительно подложки [9].

Пленки ПИ, содержащие 7, 11, 29 слоев (давление переноса монослоя — 25 мН/м), исследовали методом рентгеновской рефлектометрии [10]. В табл. 3 приведены значения толщины и шероховатости пленки, рассчитанные с помощью этого метода. Как видно из таблицы, расчетные значения толщины одного слоя ПИ близки к значению толщины одного слоя, полученного из данных эллипсометриче-

Таблица 3

Толщина и шероховатость пленок ПИ

Число слоев ПИ	Толщина пленки, нм	Расчетная толщина одного слоя, нм	Шероховатость, нм
7	3,3	0,47	1,6
11	5,3	0,48	2,0
29	13,6	0,47	2,6

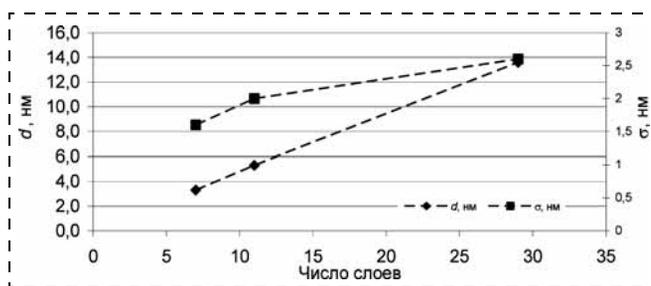
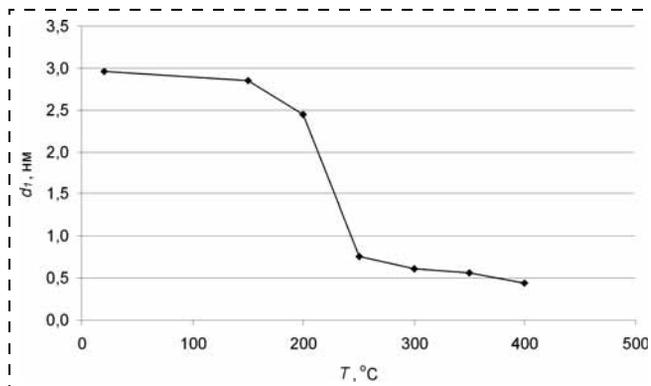
Рис. 3. Зависимость толщины (d) пленки ПИ и шероховатости (σ) от числа слоев

Рис. 4. Зависимость толщины пленки ПИ, приходящейся на один монослой, от температуры нагрева

ских измерений. Наблюдалось линейное увеличение толщины пленки ПИ с ростом числа слоев (рис. 3), а также увеличение шероховатости пленки. Приведенные в табл. 3 значения шероховатости практически совпадают со значениями шероховатости (R_z), полученными на основании АСМ изображений: для 7 слоев — 1,3 нм, для 29 слоев — 2,8 нм. Для сравнения значение R_z для пленок соли ПАК (29 слоев) и химически имидизованных пленок составило 11,8 и 9,9 нм соответственно.

Чтобы проследить изменение толщины пленки в процессе имидизации, образцы пленок ЛБ соли ПАК, полученных при поверхностном давлении 25 мН/м и содержащих 29 слоев, нагревали до температур 150, 200, 250, 300, 350 и 400 °C. На графике (рис. 4), показывающем изменения толщины пленки ПИ в пересчете на один монослой с ростом температуры имидизации, видно, что резкое уменьшение толщины пленки наблюдается при температуре 200...250 °C. То есть в этом интервале происходит удаление алифатических радикалов из пленки, которое заканчивается при 250 °C. Незначительное изменение толщины пленки при температуре свыше 250 °C свидетельствует о происходящей в пленке структурной перестройке, связанной с увеличением плотности укладки полимерных цепей. После нагревания до 400 °C толщина одного слоя в пленке ПИ составляет 0,44 нм и практически совпадает со значением 0,47 нм полученным из данных рентгеновской рефлектометрии.

Исследования методом АСМ пленок соли ПАК и ПИ выявили наличие в них доменной структуры [7, 9—13]. С увеличением давления в монослое плотность расположения доменов на поверхности воз-

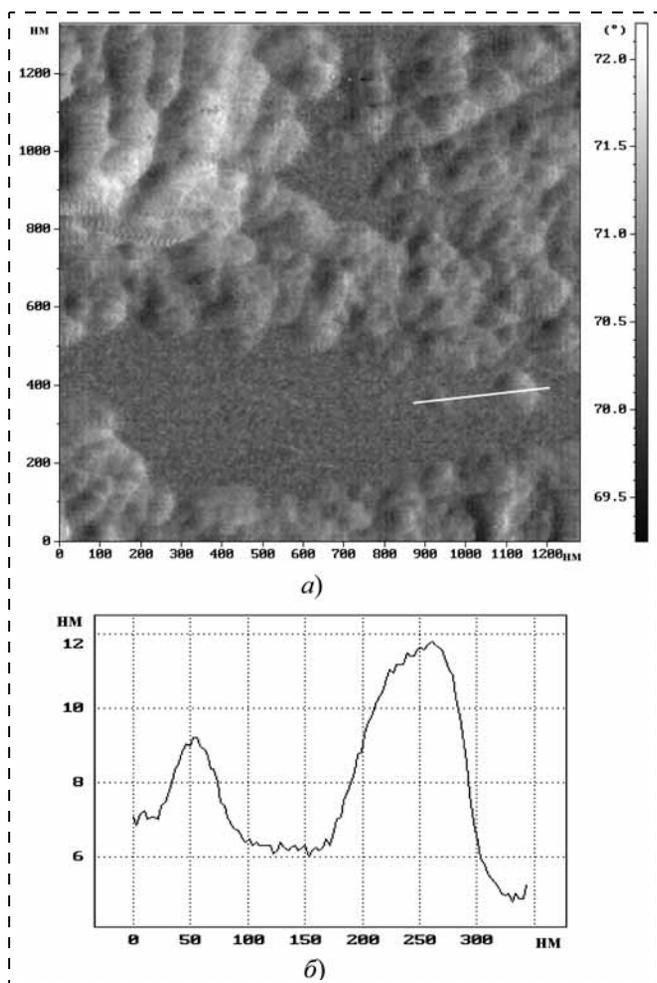


Рис. 5. АСМ-изображение поверхности пленки ЛБ соли ПАК (три слоя), полученное в режиме фазового контраста (а), и профиль (б) участка поверхности пленки (выделен белой линией), состоящей из отдельных доменов

растает, а размер доменов уменьшается от 100... 200 нм при 25 мН/м до 50...70 нм при 35 мН/м. Изображение пленки (три слоя) в режиме фазового контраста (рис. 5, а) позволяет увидеть четкие границы между доменами и подтверждает наличие на изображении поверхности двух типов: поверхности подложки без пленки и поверхности пленки. На профиле участка поверхности (рис. 5, б), состоящего из отдельных доменов, видно, что высота доменов приблизительно равна 3 и 6 нм, а высота ступеньки на границе пленки и подложки составляет примерно 9 нм. Таким образом, наблюдаемая толщина пленки на разных участках поверхности является кратной 3 нм. Минимальная толщина домена 3 нм соответствует толщине одного слоя в пленке ЛБ соли ПАК, определенном методом малоуглового рентгеновского рассеяния (2,8 нм) и методом эллипсометрии (3,2 нм).

Проведенные нами исследования процесса формирования пленок ЛБ соли ПАК позволяют предположить, что двумерные домены (высота которых соответствует толщине монослоя) образуются на поверхности воды при формировании монослоя соли ПАК. Их образование обусловлено внутри- и межмолекулярным взаимодействием основных цепей макромолекул и взаимодействием их боковых групп — длинных алифатических цепей (С18). В процессе нанесения на подложку первого монослоя двумерные домены закрепляются на ее поверхности, а при нанесении последующих монослоев осаждение двумерных доменов происходит преимущественно на этих участках поверхности подложки. По мере увеличения числа слоев в пленке происходит последовательное наслаивание двумерных доменов друг на друга и образование "стопок" двумерных доменов.

После проведения имидизации пленка сохраняет доменное строение. На рис. 6, а приведено изображение пленки ПИ (семь слоев, толщина 3,3 нм), из которого видно, что домены плотно прилегают друг к другу, образуя сплошное покрытие. Рельеф пленки характеризуется разбросом по высоте ± 2 нм (рис. 6, б). На участках, где домены распределены более равномерно, разброс составляет $\pm 0,5$ нм, т. е. ± 1 слой ПИ (рис. 6, в). Наследование пленками ПИ доменной структуры пленок ЛБ соли ПАК указывает на формирование прочных связей между доменами в пленке соли ПАК и между полимерными цепями в пределах доменов.

Применения пленок жесткоцепного полиимида в микро- и нанотехнике

Высокой степенью однородности и стабильности пленок ЛБ преполимера ПИ и ПИ ДФ-оТД можно объяснить полученные нами результаты по использованию нанопленок ПИ в структурах различного назначения [14, 15].

Стабилизация электретенного заряда на поверхности диэлектрика. Характер изменения электретенного потенциала структур SiO₂—ПИ по сравнению с об-

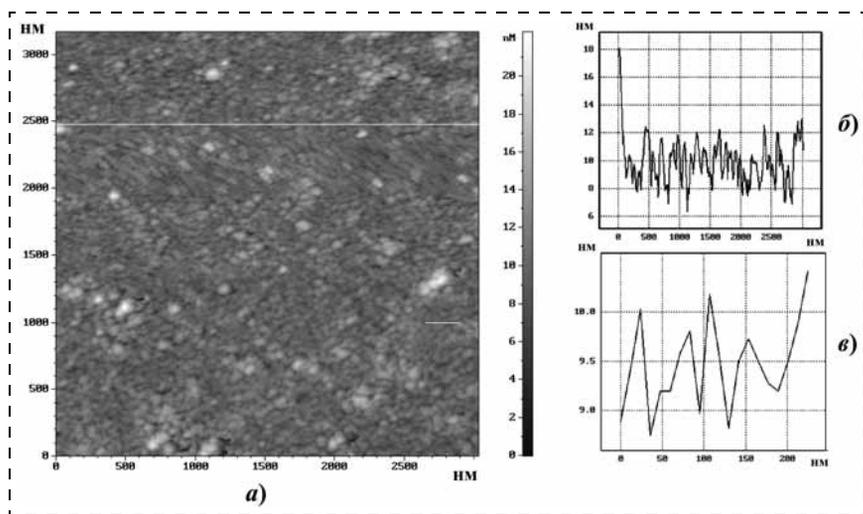


Рис. 6. АСМ-изображение поверхности пленки ПИ (семь слоев) (а) и профили участков поверхности (б, в)

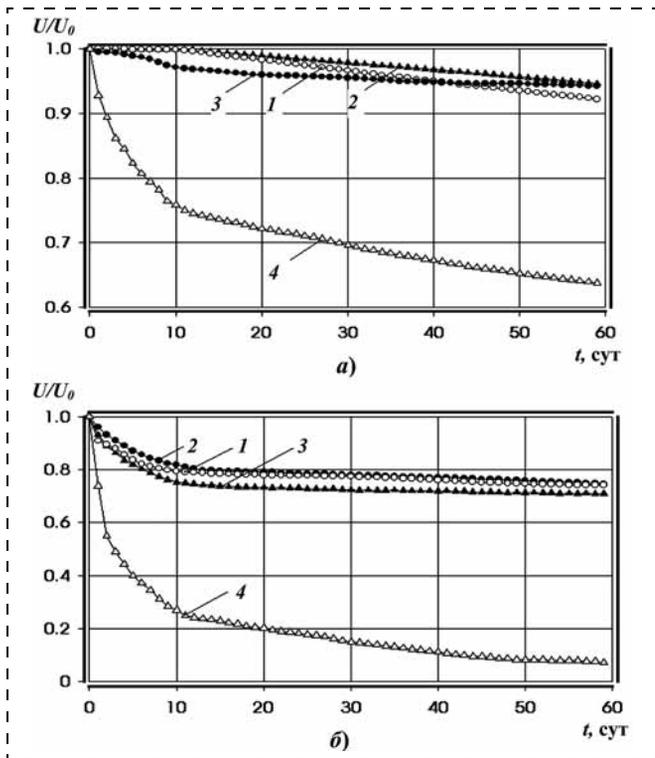


Рис. 7. Изотермический спад поверхностного потенциала при нормальных лабораторных условиях для отрицательно (а) и положительно (б) заряженных образцов:

1 — SiO₂—ПИ (три монослоя); 2 — SiO₂—ПИ (девять монослоев); 3 — SiO₂, обработанный ГМДС; 4 — исходный необработанный образец SiO₂

разцами гидрофобизированного и чистого диоксида кремния приведены на рис. 7, 8. Представленные зависимости изменения электретенного заряда в течение времени показывают, что именно пленки ПИ, состоящие из трех (1,5 нм), пяти (2,5 нм) и девяти (4,5 нм) слоев, обеспечивают наилучшую пассивацию поверхности электрета.

Контроль внутренних напряжений в мембране. Пленки ПИ, содержащие 50, 100 и 200 слоев толщиной 25, 50 и 100 нм соответственно, наносили на поверхность виброакустической мембраны из нитрида кремния толщиной 0,13 мкм (рис. 9). Согласно графику, приведенному на рис. 10, снижение внутреннего напряжения мембраны начинается при толщине пленки 50 нм и носит линейный характер. Важно отметить, что нанесение пленки ПИ с разным числом слоев на мембрану из нитрида кремния позволяет прецизионным образом снижать ее внутреннее напряжение.

Герметизация и планаризация поверхности нанопористых органо-неорганических диэлектриков. Одним из классов наноструктурированных материалов, давно привлекающих внимание исследователей, являются пористые материалы, область применения которых сосредоточена главным образом в области сенсорики. В последние годы новый виток интереса к подобным материалам был стимулирован полупроводниковой индустрией, перешедшей к использованию материалов с пониженной диэлектрической проницаемостью (*low-k*-материалы) в качестве изолирующих слоев в многоуровневой

системе коммутации. Интеграция слоя пористого материала в определенную приборную структуру часто сопряжена с трудностями, связанными с нанесением некоего функционального слоя поверх пористой поверхности без значительного изменения свойств пористой среды. Проблема становится особенно актуальной, когда речь идет о пленках пористого материала толщиной несколько сотен или десятков нанометров, когда классические методы формирования тонких пленок методами PVD или CVD (ALD) неспособны предотвратить диффузию прекурсоров внутрь системы пор. В качестве одного из возможных решений можно рассматривать нанесение некоего тонкого вспомогательного слоя, осуществляющего герметизацию пористой поверхности при минимальной модификации свойств нижерасположенного слоя.

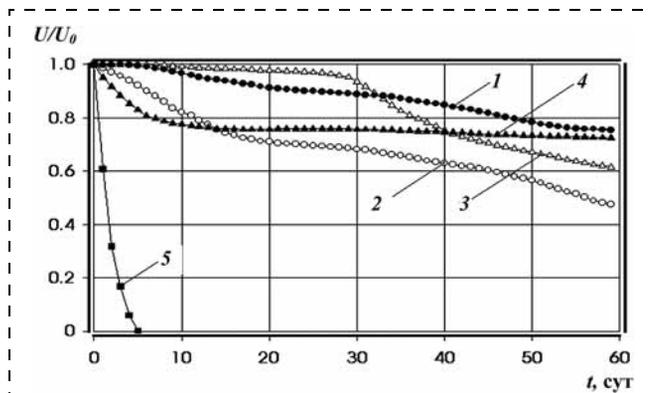


Рис. 8. Изотермический спад поверхностного потенциала в условиях повышенной влажности для отрицательно заряженных образцов:

1 — SiO₂—ПИ (пять монослоев); 2 — SiO₂, обработанный ДМДХС; 3 — SiO₂, обработанный ГМДС; 4 — ПТФЭ; 5 — исходный необработанный образец SiO₂

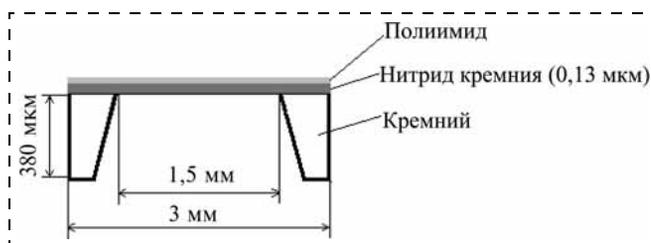


Рис. 9. Структура бислойной мембраны "нитрид кремния—пленка ПИ"

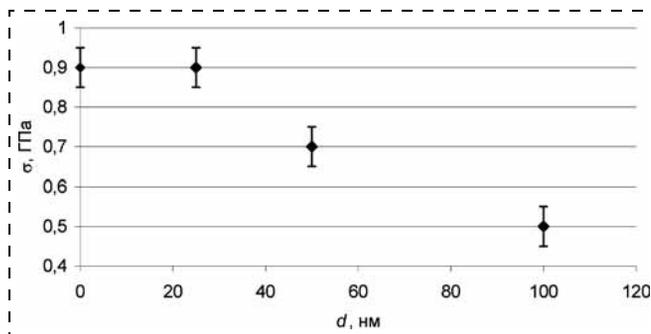


Рис. 10. Внутреннее напряжение σ в мембране из нитрида кремния, покрытой пленками ПИ различной толщины d

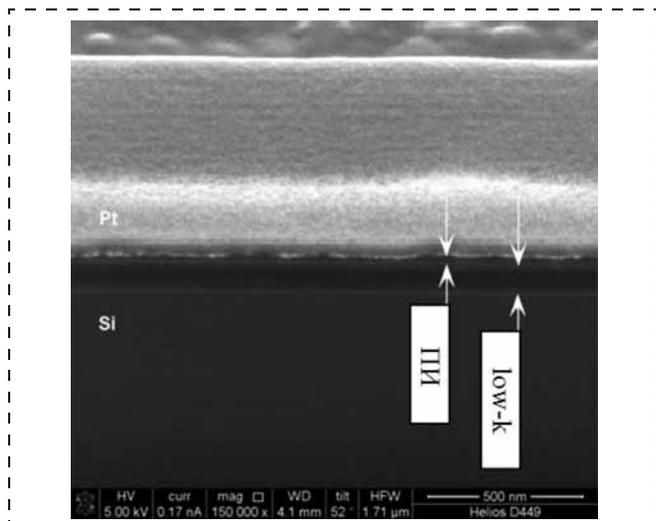


Рис. 11. РЭМ-изображение сечения структуры "low-k-диэлектрик—пленка ПИ"

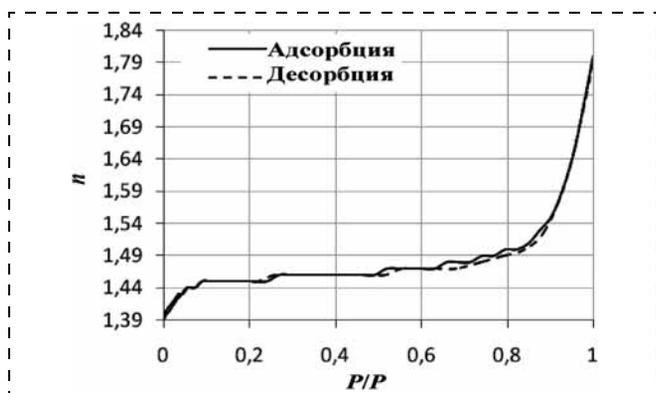


Рис. 12. Изотерма адсорбции и десорбции для пленки ПИ, нанесенной на поверхность пористого кремнийорганического слоя

Для герметизации слоя кремнийорганического пористого материала, представляющего собой low-k-диэлектрик с диэлектрической проницаемостью 2,3 и характеризующегося пористостью около 30 % и средним диаметром пор 2 нм, на его поверхность были нанесены полиимидные пленки ЛБ толщиной 8 или 20 монослоев, сформированные при различных значениях поверхностного давления и температурах имидизации [15]. Измерение с помощью эллипсометра выявило лишь незначительные отклонения коэффициента преломления двухслойной структуры от исходного значения пористой пленки, не превышающие 2 %. Отсутствие диффузного контраста на границе раздела "low-k-диэлектрик — ПИ пленка" на РЭМ-изображении сечения исследуемой структуры (рис. 11) предполагает отсутствие проникновения материала пленки внутрь пористого материала. Целостность полиимидного покрытия была проверена с помощью метода эллипсометрической порометрии, в котором изотермы адсорбции и десорбции первоначально снимают в координатах "коэффициент преломления — относительное давление", они дают представление об изменении оптических свойств пористого слоя по мере повышения давления паров адсорбата (толуола) в

измерительной камере. Анализ изотерм адсорбции и десорбции, полученных методом эллипсометрической порометрии (рис. 12), позволяет сделать выводы об эффективности герметизации пор [16]. В соответствии с данными на рис. 11 коэффициент преломления практически постоянен в довольно широком диапазоне давлений паров толуола. В данном случае абсолютные значения коэффициента преломления не так важны (результаты получены в рамках однослойной оптической модели), как сам факт возможного его изменения в ходе процессов адсорбции и десорбции. Незначительный рост коэффициента преломления на начальном участке может быть следствием микропористости ПИ пленки, вызванной ее доменным строением. При давлениях толуола, близких к равновесному, наблюдается резкое возрастание коэффициента преломления. В ходе десорбции гистерезис в данной области давлений не проявляется, что позволяет утверждать, что эффект резкого увеличения коэффициента преломления связан с конденсацией паров толуола на неоднородностях поверхности пленки ПИ.

Таким образом, пленка толщиной около 4 нм, состоящая из восьми ПИ слоев, достаточна для того, чтобы достичь герметизации пористого материала со средним размером пор 2 нм без ощутимого роста коэффициента преломления структуры.

Другим интересным примером, демонстрирующим высокую прочность и планаризирующую способность исследуемых ПИ пленок, является возможность формирования свободновисящих ПИ мембран на металлической сетке с ячейкой 40×40 мкм с отношением толщины пленки к линейным размерам ячейки порядка 1 : 1000 [17].

Заключение

В работе были исследованы условия формирования и особенности строения пленок ЛБ преполимера и ПИДФ-оТД. Данные о толщине пленок, полученные с помощью различных измерительных методов, таких как эллипсометрия, рентгеновская рефлектометрия и метод малоуглового рентгеновского рассеяния, хорошо согласуются между собой и свидетельствуют о линейном росте толщины пленки, кратном числу монослоев преполимера, перенесенных на подложку методом ЛБ.

Проведенные исследования показали, что высокая стабильность и однородность пленок ПИ, наряду с возможностью послойного контроля толщины пленок, обуславливает перспективы использования их в микро- и нанoeлектронике и микро- и наносистемной технике. Приведенные в статье примеры демонстрируют разнообразие функций, выполняемых пленками ПИ в различных приборных структурах.

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. Бессонов М. И., Котон М. М., Кудрявцев В. В., Лайнус Л. А. Полиимиды — класс термостойких полимеров. Л.: Наука, 1983. 328 с.
2. Kakimoto M., Suzuki M., Konishi T. et al. Preparation of mono- and multilayer films of aromatic polyimides using Langmuir-Blodgett technique. Chemistry Letters. 1986. P. 823–826.
3. Fukuzawa, M., Ikedou H., Iwamoto M. Electrical breakdown of ultra-thin polyimide Langmuir-Blodgett films under a needle-plane electrode system // Thin Solid Films. 2003. V. 438–439. P. 243–247.
4. Kim G. H., Enomoto S., Kanazawa A. et al. Optical switching of nematic liquid crystal by means of photoresponsive polyimides as an alignment layer // Applied Physics Letters. 1999. V. 75, № 22. P. 3458–3460.
5. Uekita M., Awaji H., Murata M. et al. Application of polyimide Langmuir-Blodgett films to deep UV resists // Thin Solid Films. 1989. V. 180. P. 271–276.
6. Young S., Park J.-K., Choi J. W. et al. Fabrication of micro array of polyimide Langmuir-Blodgett film and its application in bioelectronics device // Molecular Crystals and Liquid Crystals. Science and Technology. Sec. A. 2002. V. 377. P. 241–244.
7. Голоудина С. И., Лучинин В. В., Пасюта В. М. и др. Исследование закономерностей формирования надмолекулярной структуры пленок Ленгмюра—Блоджетт гребнеобразного преполимера полиимида // Кристаллография. 2009. Т. 54, № 3. С. 501–509.
8. Пасюта В. М., Голоудина С. И. Комплекс для получения моно- и мультислойных органических наноконпозиций на основе метода Ленгмюра—Блоджетт // Петербургский журнал электроники. 2001. № 4. С. 71–78.
9. Голоудина С. И., Склизкова В. П., Пасюта В. М. и др. Пленки Ленгмюра—Блоджетт жесткоцепного полиимида: получение и структура // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2003. № 10. С. 93–99.
10. Голоудина С. И., Лучинин В. В., Пасюта В. М. и др. Особенности строения ультратонких пленок жесткоцепного полиимида, полученных методом Ленгмюра—Блоджетт // Журнал прикладной химии. 2005. Т. 78. Вып. 9. С. 1499–1503.
11. Голоудина С. И., Розанов В. В., Евстапов А. А. и др. Исследование поверхности пленок Ленгмюра—Блоджетт гребнеобразного преполимера и полиимида методами атомно-силовой и конфокальной лазерной микроскопии // Сборник тезисов докладов на XV Всероссийской конференции "Структура и динамика молекулярных систем", Яльчик, Россия, 30 июня — 4 июля 2008 г. С. 171.
12. Голоудина С. И., Лучинин В. В., Розанов В. В. и др. Исследование поверхностной структуры пленок Ленгмюра—Блоджетт гребнеобразного жесткоцепного преполимера полиимида методом атомно-силовой микроскопии // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, вып. 23. С. 54–59.
13. Розанов В. В., Голоудина С. И., Евстапов А. А. и др. Сравнительные исследования структуры поверхности пленок Ленгмюра—Блоджетт алкиламмонийной соли жесткоцепной полиамидокислоты и полиимида методами атомно-силовой и конфокальной лазерной микроскопии // Научное приборостроение. 2009. Т. 19, № 1. С. 3–9.
14. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы / Под ред. В. В. Лучинина, Ю. М. Таирова. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. С. 198, 499, 506.
15. Goloudina S. I., Ivanov A. S., Krishtab M. B., Luchinin V. V., Pasyuta V. M., Gofman I. V., Sklizkova V. P., Kudryavtsev V. V., Baklanov M. R. Pore sealing of SiOCH ultra low-k dielectrics with polyimide Langmuir-Blodgett film // Mater. Res. Soc. Proc., San Francisco, CA, 2012. [submitted].
16. Shamiryan D., Baklanov M. R., Maex K. Diffusion barrier integrity evaluation by ellipsometric porosimetry // J. Vac. Sci. Technol. B. 2003. N 21. P. 220.
17. Лучинин В. В., Голоудина С. И., Пасюта В. М., Панов М. Ф., Гофман И. В., Склизкова В. П., Кудрявцев В. В. Формирование полиимидных мембран на металлической сетке-матрице методом Ленгмюра—Блоджетт // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31, вып. 8. С. 57–61.

УДК 621.315.592

Т. М. Зимина¹, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., e-mail: zmmizina@gmail.com,

Е. Н. Муратова¹, аспирант,

Ю. М. Спивак¹, канд. тех. наук, доц.,

В. Е. Дрозд², канд. физ.-мат. наук, доц.,

А. А. Романов¹, науч. сотр.,

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"

² Санкт-Петербургский государственный университет

ОАОІ Т ЕТ АЕЕ ОІ РІ ЕРІ ААІ ЕВ
Е І РЕІ АІ АІ ЕА І АІ Т НЕТ АА
Е І АІ Т І Т РЕНОУО ЕТ І І Т ÇЕОЕЕ
Al₂O₃ АЕВ І ЕЕРІ - Е І АІ Т ОАОІ ЕЕЕ

Поступила в редакцию 20.09.2012

Рассмотрены основные технологические подходы формирования нанослоев и композиций с различными характеристиками на основе оксида алюминия, а именно, атомно-молекулярное наслаивание и электрохимическое травление. Приведен краткий обзор основных современных областей применения оксида алюминия в форме нанослоевых композиций, нанопористых композиций, модифицированных металлом, и макропористых систем.

Ключевые слова: нанослои оксида алюминия, пористый анодный оксид алюминия, атомно-молекулярная химическая сборка, электрохимическое анодирование, биосенсоры, лаборатории на чипе

Введение

Получение слоев оксида алюминия в современных технологических процессах осуществляют с позиций двух различных нанотехнологических подходов. Самоупорядоченные пористые слои оксида алюминия (ПАОА, пор-Al₂O₃) формируют с помощью метода электрохимического травления, который можно отнести к группе нанотехнологий направления "сверху-вниз" ("top-down"). Синтез беспористых пленок Al₂O₃, например пассивирующих покрытий, перспективно проводить с помощью нанотехнологий группы "снизу-вверх" ("bottom-up"), например, методом атомно-молекулярного наслаивания.

Целью данной работы является представление принципиально разных технологических подходов к получению слоев оксида алюминия с разными характеристиками и наиболее перспективных областей применения таких слоев.

1. Технологии формирования нанослоев и нанопористых композиций Al_2O_3 для микро- и нанотехники

1.1. Формирование слоев пористого анодного оксида алюминия электрохимическим травлением

Слои пористого анодного оксида алюминия получают методом электрохимического анодирования алюминия. Одним из главных достоинств технологии формирования ПАОА является то, что, варьируя условия технологического процесса, можно управлять топологическими размерами пористого слоя [1–6]. Формирование пор заданного размера обеспечивается за счет выбора состава электролита и использования дополнительных технологических приемов. Достоинствами методов электрохимии являются относительная простота и экономическая доступность, высокая производительность, совместимость с традиционными технологическими процессами микроэлектроники.

Формирование пористого оксида происходит в процессе электрохимического анодирования в электролитах на основе водных растворов H_2SO_4 , $(COOH)_2$, H_3PO_4 или некоторых органических и минеральных кислот. Основными технологическими параметрами являются напряжение, плотность тока анодирования, время анодирования, температура, состав электролита. Механизмы формирования самоупорядоченных слоев $por-Al_2O_3$ рассмотрены в работе [1]. Для получения высокоупорядоченных слоев ПАОА большое значение имеет предварительная подготовка поверхности алюминия — создание пререструктуры на поверхности [4, 6–8].

На рис. 1 приведен пример однокамерной электрохимической ячейки для формирования слоев ПАОА на подложках Al и Si, разработанной в СПбГЭТУ "ЛЭТИ" [9], имеющей специальную форму электродов плоскопараллельных электродов, что обеспечивает более однородное распределение напряженности электрического поля. Такая кон-

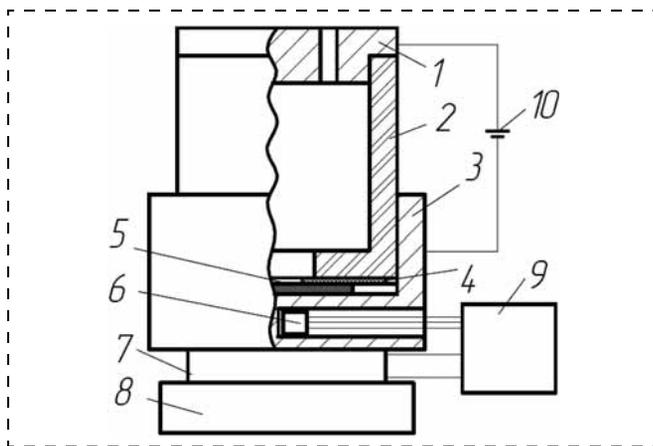


Рис. 1. Схема электрохимической ячейки для получения ПАОА: 1 — катод; 2 — ванна для электролита; 3 — анод; 4 — уплотняющая прокладка; 5 — образец; 6 — датчик температуры; 7 — устройство регулирования температуры; 8 — блок диссипации теплоты; 9 — блок управления; 10 — источник постоянного тока

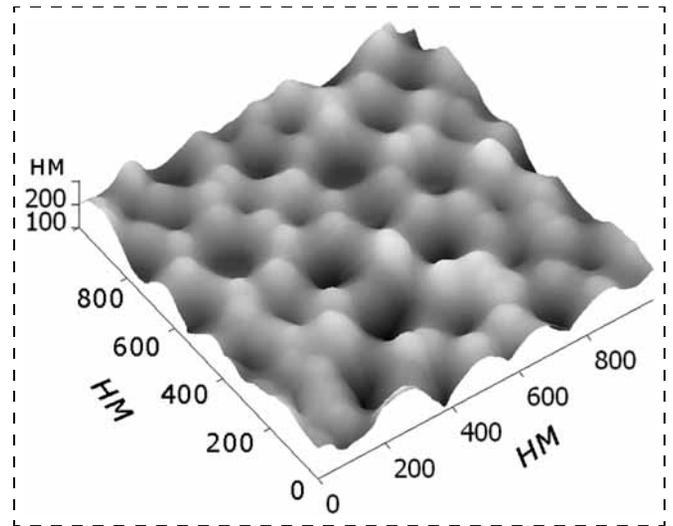


Рис. 2. Поверхность самоупорядоченного слоя ПАОА на кремнии по данным атомно-силовой микроскопии

рукция способствует повышению однородности геометрических параметров пористой структуры (коэффициента упорядоченности сотовой структуры, дисперсии значений диаметров пор, периода сотовой структуры слоя, толщины слоя) по всей анодируемой площади образца, а также улучшению воспроизводимости результатов анодирования.

Формирование слоев ПАОА на гетерогенных подложках, особенно на кремнии, позволяет интегрировать функциональные элементы, создаваемые на основе слоев ПАОА с электронными компонентами, созданными по традиционной кремниевой технологии. Получение таких композиций осложнено возникновением на границе "слой-подложка" (Al/Si) механических напряжений и дефектов, приводящих в процессе электрохимического анодирования к формированию шунтов, локальному разогреву, неравномерному травлению и отслоению пленки алюминия от подложки. Тем не менее, удалось выбрать технологические приемы и условия формирования, позволившие преодолеть вышеуказанные проблемы и получить пористые слои ПАОА с сотовой структурой на гетерогенной подложке — кремнии (рис. 2) [5].

1.2. Атомно-молекулярная химическая сборка нанослоев на основе оксида алюминия

Метод атомно-молекулярного наслаивания (АМН) позволяет проводить прецизионный синтез твердых тел регулярного химического строения. Возможности метода АМН для синтеза широкого круга материалов, включая диэлектрики, полупроводники и металлы, делают его привлекательным для решения задач микроэлектроники, оптоэлектроники, катализа, микромеханики, солнечной энергетики, записи информации, электролюминесценции и др. Важнейшим отличительным признаком этого метода является саморегуляция процесса, состоящая в остановке роста слоя после завершения синтеза одного монослоя вещества, после чего возобновле-

ние роста происходит только после поступления внешнего сигнала. Таким образом, процесс является ступенчатым (digital), а толщина получаемых пленок зависит не от длительности проведения процесса роста, как в других методах, а от числа повторяющихся циклов роста [10]. Эта принципиальная особенность процесса роста заложена в основу метода АМН, идея которого состоит в последовательном наращивании монослоев структурных единиц заданного химического состава на поверхности твердофазной матрицы.

Метод АМН относится к так называемому матричному синтезу, для осуществления которого необходимо соблюдение следующих основных принципов.

1. Воспроизводимый синтез твердых веществ заданного сложного химического состава и регулярного строения (химическая сборка) должен быть основан на необратимых в условиях синтеза реакциях поверхностных функциональных групп твердого тела с низкомолекулярными веществами, причем последние не должны вступать в химическую реакцию между собой. Последнее исключает возможность протекания параллельных трудно контролируемых реакций в газовой или жидкой фазе вне поверхности твердого тела.

2. Для постепенного наращивания слоя нового вещества необходимо проводить многократную и попеременную (в заданной последовательности) его обработку парами соответствующих соединений. При этом каждый вновь образующийся монослой функциональных групп должен содержать активные атомы или группы атомов, способные реагировать с новой порцией того же или иного реагента.

3. Для осуществления реакций в процессе АМН необходимо некоторое структурное соответствие между поверхностью исходной твердофазной матрицы и данным соединением. Но главное — это наличие на поверхности достаточного числа функциональных групп, взаимное расположение которых обуславливает возможность возникновения поперечных связей между присоединившимися атомами с образованием трехмерной решетки синтезируемого твердого вещества.

4. Для синтеза слоя вещества заданной толщины с точностью до одного монослоя нужно провести необходимое число циклов реакций АМН.

5. Для синтеза слоистых структур, содержащих монослои различной химической природы, расположенные в заданной последовательности, нужно на разных стадиях АМН использовать различные низкомолекулярные соединения. Это обеспечивает расположение по заданной программе химически связанных между собой слоев различных атомов. В любом цикле АМН можно заменить прекурсоры, не прерывая процесс синтеза, и получить много-

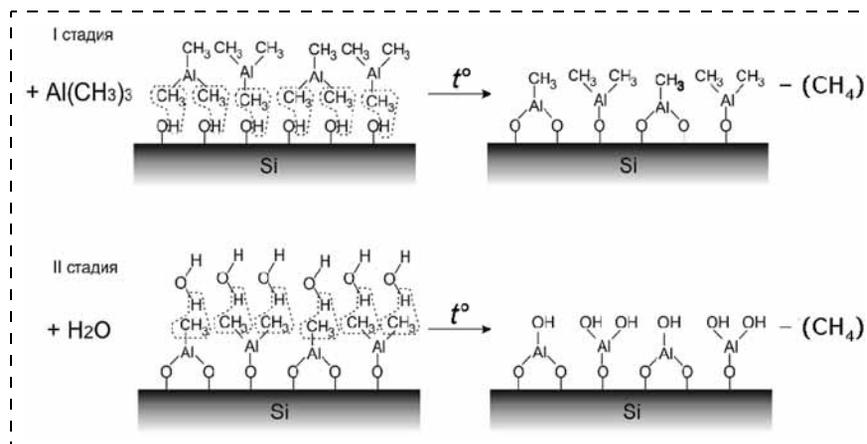


Рис. 3. Процесс атомно-молекулярного наслаивания на примере синтеза пленки Al_2O_3

слойную структуру заданного химического состава и пространственного положения с точностью до одного монослоя.

Процесс АМН слоев оксида алюминия на кремниевой подложке с применением в качестве прекурсоров триметилалюминия $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ (ТМА) и паров H_2O представлен на рис. 3. На первой стадии образец обрабатывается первым реагентом (парами ТМА), в результате чего происходит поверхностная химическая реакция с функциональными OH -группами с образованием функциональных CH_3 -групп. На второй стадии образец обрабатывается вторым реагентом (парами H_2O), и протекающая поверхностная реакция приводит к образованию функциональных OH -групп и образованию одного монослоя.

При условии надлежащей подготовки поверхности для проведения синтеза на ней пленок методом АМН, а именно при обеспечении ее 100 %-ной заселенности требуемыми функциональными группами, выявляются основные преимущества метода:

- равномерность толщины пленки по всей поверхности подложки;
- отсутствие теневых эффектов;
- синтез принципиально новых химических соединений и твердых растворов, создание которых невозможно классическими методами.

Интенсивное развитие химии элементоорганических соединения открыло широкий выбор прекурсоров для АМН, что во многих случаях является безальтернативным выбором, так как неорганические соединения с требуемыми свойствами отсутствуют. Так, например, для синтеза пленок Al_2O_3 технологически более целесообразно использовать $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ ТМА.

Технологические установки, используемые большинством зарубежных разработчиков, построены по сходному принципу, предложенному в работах В. Б. Алесковского и его коллег [11–13]. Такой тип установок называется проточным. Образцы помещаются в реактор, через который продуваются поочередно пары реагентов, с промежуточным "отдувом" инертным газом. Общим достоинством таких установок является равномерность получаемых слоев на подложках большой площади с произвольным

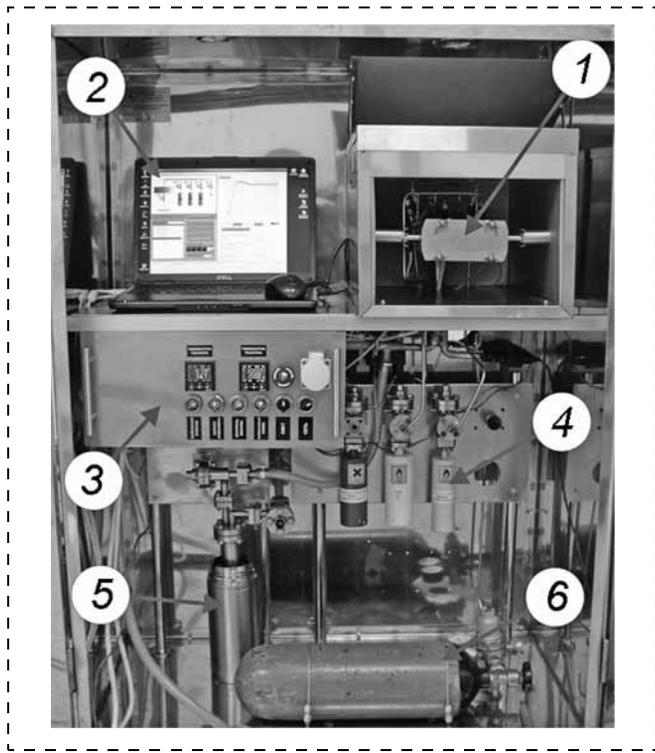


Рис. 4. Внешний вид установки атомно-молекулярного напыления (АМН):

1 — реактор; 2 — управляющий компьютер; 3 — исполнительная электроника; 4 — ампулы с реагентами; 5 — азотная ловушка; 6 — баллон с инертным газом

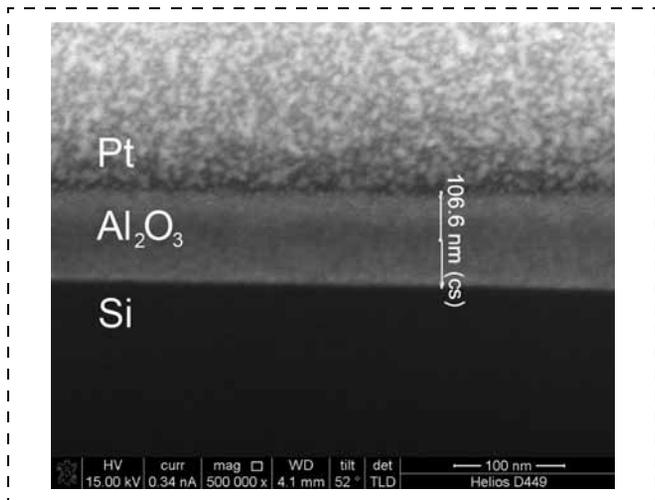


Рис. 5. Поперечный срез структуры Si—Al₂O₃—Pt

рельефом поверхности и возможность групповой обработки нескольких подложек. Недостатком является низкая скорость роста, что не существенно при получении нанометровых слоев.

В СПбГЭТУ "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), в Центре микротехнологии и диагностики размещена и действует установка для АМН проточного типа УМН-2, фотография которой представлена на рис. 4. Поперечный срез пленки оксида алюминия, синтезированной на этой установке на кремниевой подложке, представлен на рис. 5.

2. Основные области применения пористых слоев и нанослоев на основе Al₂O₃

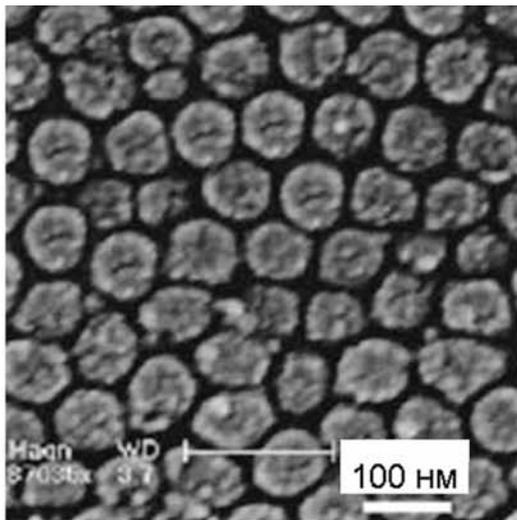
Основные области применения ПАОА — это темплатный синтез, конструктивно-функциональные нанопористые материалы, МЭМС-структуры, микросистемная техника, сенсорика и оптика, биомедицина.

2.1. Темплатный синтез на основе самоупорядоченных Al₂O₃ матриц-субстратов

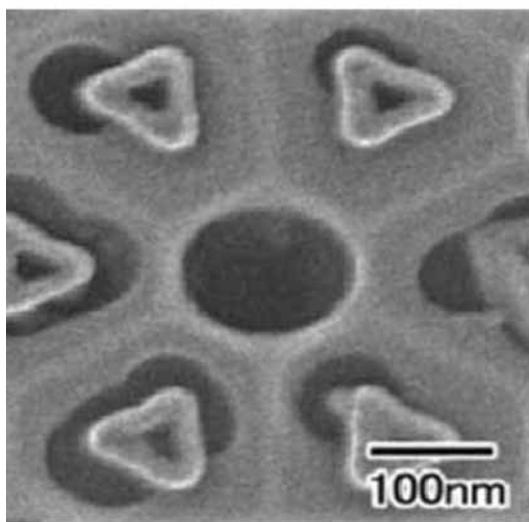
Преимущество использования ПАОА в качестве шаблона в темплатном синтезе связано с тем, что он является эффективным субстратом, задающим специальные условия роста при получении разнообразных наноматериалов (металлических, полупроводниковых и диэлектрических нанопроволок, углеродных нанотрубок и т. п.) с высокоупорядоченной структурой и позволяет относительно просто контролировать их геометрические параметры. При этом толщина слоя и диаметр пор ПАОА играют важную роль. Например, при формировании наноточек (Au, Ni, Co, Fe и GaAs [14–21]), нанопор (Si, GaAs, GaN [3, 22]), нанопроволок (ZnO) и нанотрубок (углеродные и неуглеродные) [23], используют высокоупорядоченные слои пористого оксида алюминия, полученные путем выпаривания или травления через маску [1].

Матрицы с низким аспектным отношением применяются в качестве темплата или маски для локальной модификации свойств твердых тел (период структуры 50–100 нм) [14], в том числе и в совокупности с другими технологиями (например, золь-гель [15–17]). При осаждении в поры люминесцирующих материалов в структурах наблюдается квантово-размерный эффект [1, 23]. Используя отделенный от подложки слой ПАОА в качестве маски, через которую проводится напыление, в работе [18] получены массивы квантовых наноточек Si : H (nc-Si : H) на подложке Si (рис. 6, а).

Матрицы ПАОА с высоким аспектным отношением являются основой для формирования металлических наноразмерных нитей, например, в целях создания на их основе новых магнитных материалов [7, 24], в которых наблюдается отрицательное гигантское магнитосопротивление. Кроме того, их применяют для формирования магнитных наноточек [25], например никеля, которые являются катализатором для выращивания упорядоченного массива углеродных нанотрубок [1, 23]. Особый интерес представляет формирование углеродных нанотрубок заданного размера с использованием газофазного осаждения (CVD) в пористые матрицы оксида алюминия [1]. На рис. 6, б представлено РЭМ-изображение упорядоченных массивов углеродных нанотрубок с треугольным сечением. Образец получен с использованием шаблона из ПАОА, а в качестве катализатора выступают частицы Co, электрохимически осажденные в нижнюю часть поры.



а)



б)

Рис. 6. Упорядоченные массивы различных материалов, полученных с использованием ПАОА:

а — массив искусственных нанокристаллов $nc-Si : H$, полученных напылением через маску из ПАОА [18]; б — массивы углеродных нанотрубок с треугольным сечением [1]

2.2. Использование ПАОА в микросхемотехнике

ПАОА используется в качестве функционального материала в высокотемпературных нано- и микроэлектромеханических системах. Данный материал характеризуется низкой стоимостью, он технологичен, обладает хорошей упругостью [4], а также высокой упорядоченностью, инертностью и прочностью.

ПАОА позволяет формировать материалы с высоким аспектным отношением, которые можно использовать в качестве нанореакторов, при формировании хроматографической колонки [1, 19]. Структуры, полученные при осаждении магнитных материалов в ПАОА с высоким аспектным отношением, могут служить прототипом устройств хранения информации со сверхвысокой плотностью записи [20].

Структуры с низким аспектным отношением могут применяться в качестве калибровочных решеток и печатных плат [21].

Мембраны на основе анодного оксида алюминия с самоупорядоченными порами, приготовленные специальными методами, используются в качестве основного материала каталитических шаблонов для синтезирования эмиттеров [26] (которые будут рассмотрены ниже) и как фильтры для перезаряжаемых Li-батарей [1].

Синтез ПАОА с углеродными нанотрубками приводит к формированию электродных материалов для электрохимических двухслойных конденсаторов (EDLC, Electric double-layer capacitor) [27]. Однородные углеродные нанотрубки, выращенные в высокоупорядоченном пористом оксиде алюминия, проявляют хорошие характеристики для EDLC с повышенной удельной емкостью.

Диэлектрики с малой эквивалентной электрической толщиной по сравнению с оксидом кремния, с более высокой диэлектрической проницаемостью ("high-k-" подзатворные диэлектрики), равномерностью толщины, сплошностью на подложках большой площади и низкими токами утечки требуются в следующем поколении приборов на основе МДП-структур для замещения оксида кремния. Для решения этой задачи нужна прецизионная технология, такая как АМН, которая позволяет, кроме того, получать многослойные композиционные пленки различного химического состава в едином цикле роста. Другой задачей, которая решается с помощью технологии АМН-ALD, является переход на медную металлизацию СБИС. Этим методом успешно получают как барьерные, проводящие слои из нитридов переходных металлов, так и сами слои металлизации. Еще одной задачей, представляющей интерес для современных СБИС и ССИС¹, является получение тонких пленок диэлектриков с низкой диэлектрической проницаемостью (*low-k*-диэлектрики) для межслойной изоляции в многоуровневых ИС.

2.3. Автоэмиссионные микросистемы

Формирование в порах оксида металлических столбиков приводит к проявлению автоэмиссионных свойств полученной структуры [1, 26]. Автоэмиссионные катоды (холодные эмиттеры) — это источники электронов, принцип работы которых основан на явлении автоэлектронной эмиссии, т. е. на туннелировании электронов под действием приложенного электрического поля через потенциальный барьер на границе раздела "твердое тело — вакуум". Широкий спектр применения автоэмиссионных катодов (приборы вакуумной электроники, эффективные источники света различного назначения, плоские автоэмиссионные дисплеи для мониторов и телевизоров) требует формирования больших матриц автоэмиссионных катодов. Для этих

¹ ССИС — сверхскоростная интегральная схема.

целей используются высокоупорядоченные нанопористые структуры ПАОА, в которых поры заполнены металлом. Управляющий электрод (сетка) формируется в результате вакуумного напыления металла на поверхность стенок пор и позволяет управлять потоком электронов.

Нанопористый ПАОА, модифицированный никелем, может применяться в качестве автоэмиссионного катода в интегрированном ионизационном детекторе для микроаналитической системы в целях детектирования летучих веществ на основе ионизационных процессов в среде тепловых электронов. В работах [28, 29] рассмотрены структурные свойства модифицированного ПАОА с контролируемой топологией и размером пор, заполненных никелем, а также параметры тестовых структур для микроаналитических систем. Образцы подложек ПАОА толщиной 60...100 мкм изготовлены в ИФ АНБ (г. Минск) при анодировании алюминия в 3 %-ном водном растворе щавелевой кислоты в гальваностатическом режиме и отделены от алюминиевой основы. Методом фотолитографии сформирована система локальных участков для осаждения никеля. При использовании напыленного металла в качестве анода, а внешнего металлического электрода в качестве катода электролитическим осаждением отверстия заполнялись никелем. В ре-

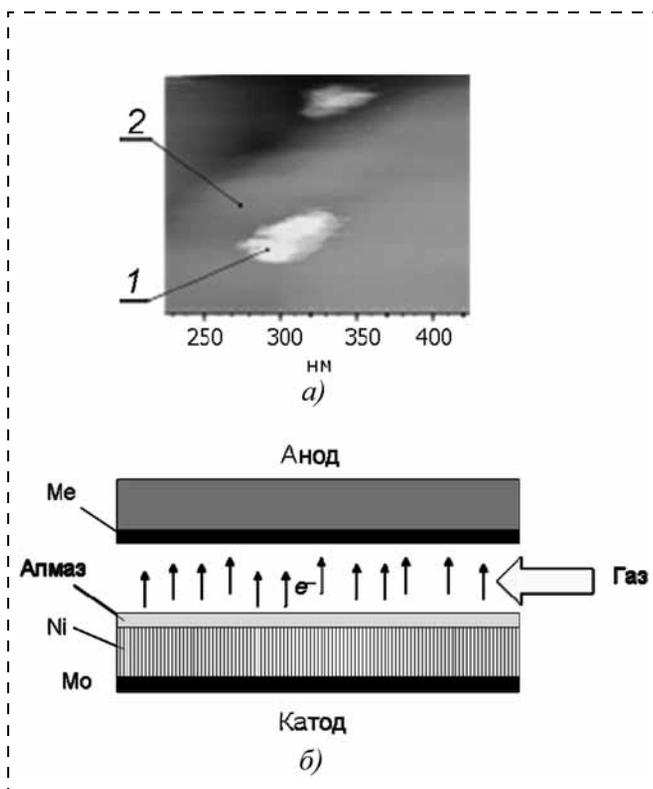


Рис. 7. Фрагмент поверхности автоэмиссионного катода, сформированного на основе нанопористого анодного Al_2O_3 (ПАОА) с осажденным в нанопорах Ni (светлая область), визуализированный с помощью АСМ в электростатической моде (а). Средний размер пор 60 нм; схема проточного ионного сенсора летучих веществ с катодом на основе ПАОА (б):

1 — Ni; 2 — Al_2O_3

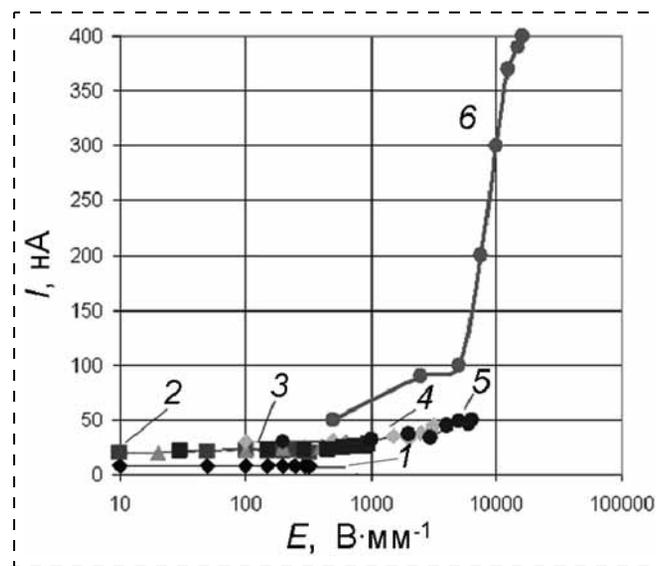
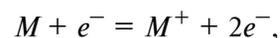


Рис. 8. Вольт-амперные характеристики эмиссионного тока в системе нанопористый катод, модифицированный никелем — медный анод. Номера зависимостей соответствуют различным размерам зазора между катодом и анодом:

1 — 1 мм; 2 — 300 мкм; 3 — 200 мкм; 4 — 100 мкм; 5 — 50 мкм; 6 — ~1 мкм. Полная площадь анода 9 мм^2

зультате получали образцы диэлектрических подложек с осажденным в естественных порах в пределах локальных участков никелем. На рис. 7, а приведено изображение полученного образца с помощью АСМ в электростатической моде, которая позволяет визуализировать торцы пор I , заполненных Ni, эмитирующих электроны.

При электронной ионизации молекулы определяемого вещества попадают в поток электронов, движущихся от эмитирующего их катода к аноду. Энергия движущихся электронов обычно 70 эВ, что, согласно формуле де Бройля, соответствует длине стандартной химической связи в органических молекулах (около 0,14 нм). Электроны вызывают ионизацию молекул с образованием катион-радикалов:



где M — молекула летучего вещества; e^- — электрон; M^+ — катион-радикал.

В миниатюрных аналитических системах (рис. 7, б) удается регистрировать эмиссию в атмосферных условиях. Вольт-амперные характеристики описанного нанотрубчатого катода на основе ПАОА (рис. 8) показывают [28], что при сближении на расстояние порядка 1 мкм наблюдается катодный ток, причем энергия электронов соответствует оптимальному диапазону ионизации молекул летучих веществ.

Очевидно, что применение автоэмиссионных катодов на основе ПАОА в микроаналитических системах [30, 31] и сенсорах летучих веществ имеет преимущества по сравнению с радиоактивными источниками β -частиц.

2.4. Сенсоры с использованием слоев ПАОА

Тонкие оксидные пленки широко используются в различных типах сенсоров [32, 33]. В газовых сенсорах резистивного типа на основе нанокристаллических полупроводниковых оксидов развитие тонкопленочной технологии постепенно становится доминирующим, что обусловлено, прежде всего, легкостью интеграции таких сенсоров в микроэлектронику. Известны МДП-структуры с пористым слоем диэлектрика, которые могут быть использованы в качестве высокочувствительных элементов газовых сенсоров для детектирования газов-восстановителей, и сенсоры для детектирования молекул ДНК в растворе на основе тонких пленок ПАОА [34]. Возможность контроля параметров пористой структуры позволяет использовать мембраны из мезопористого и микропористого оксида алюминия в качестве сита или фильтра, например для воды [32]. ПАОА применяется в качестве газоселективных мембран и в качестве основы для создания мембранных катализаторов [33, 34]. Формируются мембраны с диаметром пор от 17 до 190 нм и толщиной от 60 до 200 мкм. Для улучшения селективности газоразделения смесей, содержащих водород, на мембрану методом термического напыления наносят палладий.

На основе ПАОА реализуют датчики влажности, обладающие высокой чувствительностью и быстродействием [4, 35]. На алюминиевой подложке формируется тонкий золотой контакт, который не препятствует проникновению влаги в поры оксида. Между ним и алюминиевой подложкой измеряется емкость, которая зависит от парциального давления водяных паров. Подходящий период структур — 100, 70, 30 нм. Чем меньше период структуры, тем в более влажной окружающей среде эффективно работает датчик.

2.5. Использование ПАОА в оптических системах. Метаматериалы

ПАОА является перспективным материалом оптоэлектроники за счет анизотропного строения и ряда оптических свойств, например, двулучепреломления, фотонной запрещенной зоны [1, 4]. Фотонная запрещенная зона в ПАОА наблюдается как в видимом, так и в ближнем ИК диапазонах на пленках различной толщины. При изменении периода структуры ПАОА в диапазоне 60...500 нм центр фотонной запрещенной зоны можно смещать от 200 до 1300 нм. Все это дает возможность создавать новые нелинейные среды [22, 36].

В качестве одного из применений ПАОА в оптике можно представить органический светоизлучающий диод (OLED). Это светоизлучающий диод (LED), в котором эмиссионный слой состоит из тонкой пленки органического соединения. На основе пленок ПАОА возможна реализация катода для органических светодиодов, так как на поверхности катода в значительной степени повышаются интенсивность электролюминесценции и срок службы [37]. Модель органической электролюминесцентной ячейки на основе пористого оксида алюминия представлена на рис. 9. В целях повы-

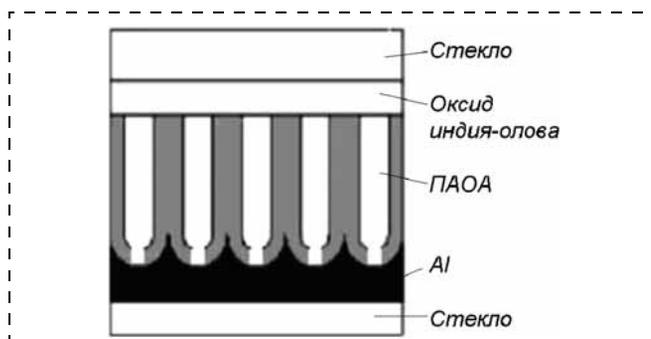


Рис. 9. Модель органической электролюминесцентной ячейки на основе ПАОА

шения эффективности электролюминесцентной сэндвич-структуры, состоящей из слоев алюминия, ПАОА, заполненного органическим фосфором, и слоя оксида индия, легированного оловом (ИТО), заключенных между стеклянными пластинами, удаляют так называемый барьерный слой путем медленного снижения напряжения анодирования до нуля. После этого наблюдается увеличение пористости ПАОА, которое пропорционально увеличению интенсивности электролюминесценции.

Перспективно создание на основе ПАОА метаматериалов типа гиперболических сред, представляющих собой одноосные материалы с разными знаками диэлектрической проницаемости основных компонент [38, 39]. При этом, как правило, создается система упорядоченных однонаправленных нанопроводов путем заполнения пор, например металлами (Ag, Au), электрохимическим осаждением. В таких системах прогнозируются необычные электромагнитные свойства: отрицательное преломление, возможность передачи распределений электромагнитного поля со сверхвысоким разрешением и др.

2.6. Применение ПАОА в биомедицинских приборах

Применение ПАОА является очень перспективным в качестве шаблона для формирования нано- и микрореакторов. Выбор данного материала объясняется его инертностью к биологическим объектам, способностью формировать микрореакторы с заданными топологическими размерами, обусловленными поставленными целями и размерами биологического объекта. В настоящее время большой интерес уделяется наноустройствам для целевой доставки биомолекул и макромолекул в организм. Например, доставка в наночастицах, в которых расщепление стенок для высвобождения лекарственного средства осуществляется с помощью химического или ферментативного воздействия [40, 41]. Изучаются альтернативные системы высвобождения на основе синтезированных в матрице ПАОА нанопробирок, в которых открытый конец закупоривается химически нестабильным веществом. Процесс доставки лекарственных препаратов управляется также и размером пор в нанокapsулах и пробирках, влияющих на скорость молекулярного транспорта через пористую оболочку.

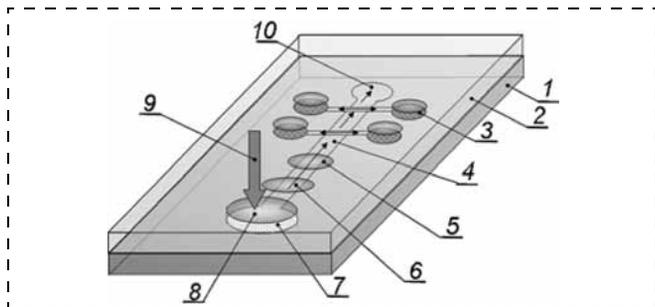


Рис. 10. Базовый состав одноразовой лаборатории на чипе:

1 — база; 2 — корпус; 3 — реакторы для тестирования жизнеспособности микроорганизмов; 4 — канал для транспорта колоний; 5, 6 — оптические окна с линзой для устройств идентификации объектов; 7 — ростовая платформа для культивации микроколоний бактерий; 8 — оптическое окно для КМОП-сенсора в безлинзовом устройстве мониторинга роста; 9 — направление загрузки пробы; 10 — слив

2.7. Лаборатории на чипе

Особенности структурных и физических свойств анодного оксида алюминия обуславливают его использование в качестве перспективного материала для лабораторий на чипе (ЛНЧ) [42—46], которые явились результатом интегрирования биоорганической и аналитической химии с нанотехнологиями и технологиями микроэлектроники.

Диагностика бактериальных инфекций

Особую область применения занимают макропористые слои оксида алюминия с диаметром пор, равным нескольким микрометрам, которые могут использоваться в микробиологическом анализе [47, 48]. В основу микробиологической лаборатории на чипе может быть заложена концепция оптимизации традиционного высоко достоверного микробиологического анализа, основанного на росте культур микроорганизмов. Причем на основе ПАОА создаются миниатюрные топологически структурированные платформы для культивирования индивидуальных микроколоний патогенных микробных клеток и их автоматического перемещения в смежные функциональные модули ЛНЧ. Базовый состав лаборатории на чипе с ростовым модулем на основе ПАОА представлен на рис. 10.

Диагностика вирусных инфекций

Предварительная подготовка пробы крови для исследования ВИЧ-инфекции может осуществляться с помощью макропористой мембраны на основе ПАОА [43, 44]. Такая мембрана (совместная разработка СПбГЭТУ "ЛЭТИ", Санкт-Петербург, и Института физики Академии наук Беларуси, Минск), по сравнению с мембранами из лавсана, полученными методом бомбардировки тяжелыми ионами, имеет строго заданное положение и размер цилиндрических пор (рис. 11, а, б).

Возможность прецизионного подбора размера пор и их монодисперсное распределение по размерам в мембранах на основе ПАОА позволяет создавать фильтрационные устройства нового поколения,

с повышенной селективностью. Интегрированные в ЛНЧ в качестве входных фильтров для пробы, такие мембраны могут служить подложками для выделенных фракций пробы (рис. 12, а), а при сопряжении с КМОП-сенсором позволяют проводить иммуно-флуоресцентный экспресс-анализ (рис. 12, б), например для диагностики ВИЧ/СПИД [44].

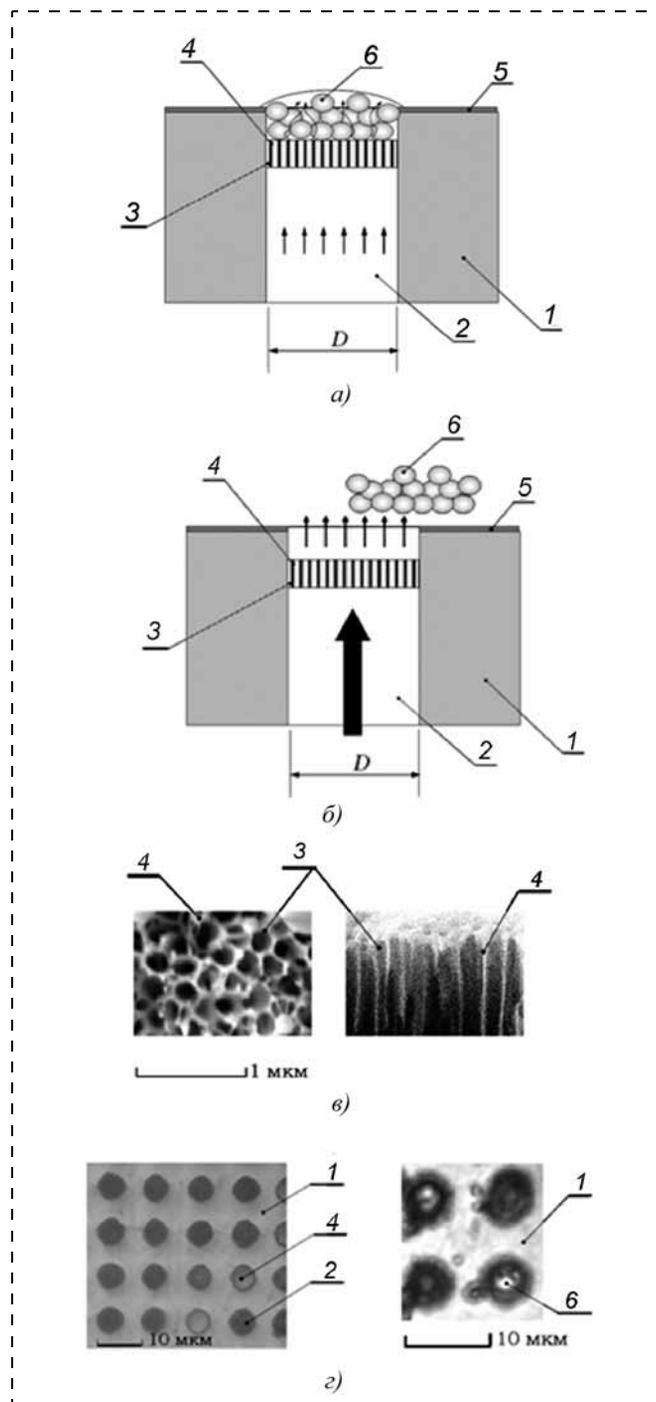


Рис. 11. Сечение отверстия в ростовой пластине диаметром D и ростовой nanopористой площадки с колонией микроорганизмов (а); момент отрыва колонии от ростовой площадки под действием гидроудара (б); поверхность и скол nanopористого оксида алюминия (в); пластина с ростовыми площадками и начало роста колоний (з):

1, 4 — анодный оксид алюминия; 2 — микропора заданного диаметра; 3 — нанопора; 5 — гидрофобное покрытие; 6 — микроорганизм, образующий колонию

Области применения пористого оксида алюминия

Область применения	Тип ПАОА	Пример применения	Ссылка
Технология получения нанокomпозиционных материалов и наноструктур (матрицы роста, шаблоны)	Нанопористый	Наноточки (nc-Si:H, Au, Ni, Co, Fe, GaAs)	[1, 7, 24, 25]
	Мезопористый	Нанопроволоки (ZnO) и нанотрубки (углеродные и неуглеродные)	[1, 23]
	Микропористый	Новые магнитные материалы	[7, 24]
Технология интегральных схем	Нанослои и нанослоевые композиты	Подзатворные диэлектрики в МДП- структурах нового поколения; Межслойная изоляция в многоуровневых ИС	[10, 50, 51]
МЭМС	Нанопористый	Устройства хранения информации со сверхвысокой плотностью записи	[20]
	Мезопористый	Нанореакторы, хроматографическая шкала (линейка), автоэмиссионные катоды, электрохимические двухслойные конденсаторы	[19, 21, 27]
	Микропористый	Калибровочные решетки, печатные платы, фильтр для перезаряжаемых Li-батарей	[1, 19, 21]
Оптика	Нанопористый	Органические светодиоды	[38]
	Мезопористый	Новые нелинейные среды	[25, 37]
	Микропористый	Фотонные кристаллы	[1, 4]
Сенсорика	Нанопористый	Газоселективные мембраны, сенсоры для детектирования газов-восстановителей	[33, 34, 36]
	Мезопористый	Датчики влажности	[4]
	Микропористый	Фильтры для воды, сенсоры для детектирования молекул ДНК	[1, 32, 35]
Биомедицина	Нанопористый	Костный имплантат	[1]
	Мезопористый	Нанореакторы, средства и капсулы для контролируемой доставки лекарств	[28, 29]
	Микропористый	Микрореакторы для микробиологических исследований	[43–48]

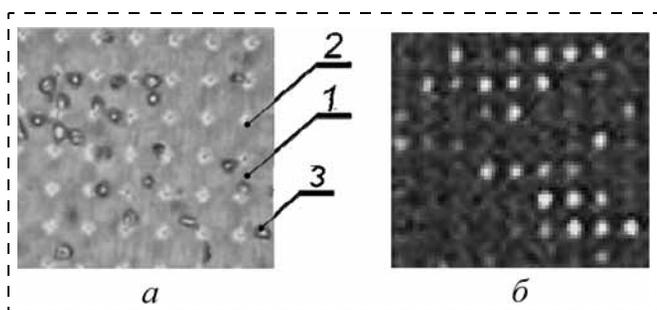


Рис. 12. Мембрана для предфильтрации клеток (крови, микробных) со структурированной матрицей микроотверстий, сформированная из ПАОА:

a — лимфоциты, выделенные из пробы крови человека на поверхности мембраны из ПАОА, диаметр пор 5,5 мкм, толщина мембраны 100 мкм; *б* — свечение проб с ФИТЦ концентрацией 10^{-7} моль · л⁻¹ в ячейках мембраны объемом 5 пл; 1 — пластина из ПАОА, 2 — пора, 3 — лимфоцит

Мембрана из ПАОА с матрицей пор диаметром 5,5 мкм применена для выделения популяций лимфоцитов из крови, при этом эритроциты отделены благодаря точному подбору размера поры.

В результате пробоподготовки получена подложка с расположенными на ней лимфоцитами. Чувствительность анализа иллюстрируется рис. 12, *б*, где показан снимок мембраны с порами объемом 5 пл, заполненными раствором ФИТЦ 10^{-7} моль · л⁻¹ с помощью ПЗС матрицы 1/4" в контактном режиме.

Заключение

В данном обзоре представлены различные области применения ПАОА и нанослоев Al₂O₃, которые можно рассматривать как одни из ключевых аспектов в развитии нанотехнологии (см. таблицу).

Шаблонный подход с использованием ПАОА, хотя впервые был исследован независимо несколькими группами из различных областей науки и техники, в настоящее время пользуется большим успехом во многих исследовательских группах по всему миру.

Работа проводилась 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, 3) ГС 14.В37.21.0793.

Список литературы

1. **Nanostructured Materials in Electrochemistry** // Ed. by Ali Eftekhari Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2008. 463 p.
2. **Льньков Л. М., Мухуров Н. И.** Микроструктуры на основе анодной алюмооксидной технологии. Мн.: Бестпринт, 2002. 216 с.
3. **Оснoвы водородной энергетики** / Под ред. В. А. Мошниковой и Е. И. Терукова. 2-е изд. СПб: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2011. 288 с.
4. **Гаврилов С. А.** Электрохимические процессы в технологии микро- и наноэлектроники: учеб. пособие / С. А. Гаврилов, А. Н. Белов. М.: Высшее образование, 2009. 257 с.
5. **Афанасьев А. В., Ильин В. А., Мошников В. А., Соколова Е. Н., Спивак Ю. М.** Синтез нано- и микропористых структур электрохимическими методами // Биотехносфера. 2011. № 1–2 (13–14). С. 39–45.

6. **Мошников В. А., Соколова Е. Н., Спивак Ю. М.** Формирование и анализ структур на основе пористого оксида алюминия // *Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ"*, 2011. Вып. 2. С. 13—19.
7. **Masuda H. et al.** Ordered Mosaic Nanocomposites in Anodic Porous Alumina // *J. Adv. Mater.*, 2003. N 15 (2). P. 161—164.
8. **Соколова Е. Н., Спивак Ю. М., Мошников В. А.** и др. Влияние технологических параметров получения слоев нанопористого Al_2O_3 на их структурные характеристики // *ФХС*, 2013. Т. 39 (в печати).
9. **Решение** о выдаче патента от 01.08.12 по заявке на полезную модель № 2012122692 "Электрохимическая ячейка для получения пористых анодных оксидов металлов и полупроводников" / П. Г. Травкин, Е. Н. Соколова, Ю. М. Спивак, В. А. Мошников.
10. **Дрозд В. Е., Романов А. А., Водолажский В. А.** и др. Атомно-молекулярная химическая сборка неорганических нанослоевых композиций на основе оксида алюминия // *Биотехносфера*. 2011. № 1—2 (13—14). С. 26—31.
11. **Алесковский В. Б.** Остовная гипотеза и опыт приготовления некоторых активных катализаторов. Автореферат докт. дисс., Ленинград, 1952 г.
12. **Алесковский В. Б.** Стехиометрия и синтез твердых соединений. Л.; Наука, 1976.
13. **Suntola T.** Atomic Layer Epitaxy // *Handbook of Crystal Growth 3*, Amsterdam: Elsevier, 1994.
14. **Белов А. Н., Демидов Ю. А., Путря М. Г.** Нанопрофилирование кремния с использованием твердой маски оксида алюминия и комбинированного "сухого" травления // *Известия вузов. Электроника*, 2009. № 2 (76). С. 39—42.
15. **Мошников В. А., Грачева И. Е., Аньчиков М. Г.** Исследование наноматериалов с иерархической структурой, полученных золь-гель методом // *ФХС*. 2011. Т. 37. № 5. С. 38—50.
16. **Гапоненко Н. В., Молчан И. С., Лютич А. А., Гапоненко С. В., Борисенко В. Е.** Люминесценция тербия и европия в структурах ксерогеля — пористый анодный оксид алюминия // *Доклады БГУИР*. 2004. № 2. С. 132—145.
17. **Ping Ye Deng, Xin De Bai, Xiao Wen Chen, and Qing Ling Feng.** Anodic oxidation of aluminum at high current density — sand mechanism of film formation // *Journal of The Electrochemical Society*. 2004. Vol. 151, Is. 5. P. B284—B289.
18. **Ding G. Q., Zhenf M. J., Shen W. Z.** Fabrication of nanocrystalline Si:H nanodot arrays with controllable porous alumina membranes // *Thin solid films*. 2006. Vol. 508. Is. 1—2. P. 182—185.
19. **Ольшанова К. М.** Практикум по хроматографическому анализу. М.: Высш. школа, 1970. 312 с.
20. **Li C. Z., Lodder J. C.** The influence of the packing density on the magnetic-behavior of alumina media. // *J. Magn. Magn. Mater.* 1990. Vol. 88. N 1—2. P. 236—246.
21. **Напольский К. С., Росляков И. В., Елисеев А. А.** и др. Калибровочные решетки на основе самоорганизующихся структур пористого оксида алюминия // *Международный научный журнал "Альтернативная энергетика и экология"*. 2009. № 11 (79). С. 87—89.
22. **Головань Л. А., Тимошенко В. Ю., Кашкаров П. К.** Оптические свойства нанокомпозитов на основе пористых систем // *Успехи физических наук*. 2007. Т. 177. № 6. С. 619—638.
23. **Анищик В. М.** и др. *Нanomaterialы и нанотехнологии* / Под ред. В. Е. Борисенко, Н. К. Толочко. Минск: Изд. Центр БГУ, 2008. 375 с.
24. **Tang X.-T., Wang G.-C., Shima M.** Perpendicular giant magnetoresistance of electrodeposited Co/Cu — multilayered nanowires in porous alumina templates // *Journal of applied physics*. 2006. Vol. 99. P. 033906.
25. **Болтушкин А. В., Шадров В. Г., Сосновская Л. Б., Немцевич Л. В.** Магнитные металл-оксидные наноструктуры на поверхности алюминия // *Материаловедение*. 2004. № 7. С. 37—43.
26. **Татаренко Н. И., Кравченко В. Ф.** Автоэмиссионные наноструктуры и приборы на их основе. М.: ФИЗМАТ, 2006. 192 с.
27. **Electric double layer capacitors.** URL: http://www.rubycon.co.jp/en/catalog/e_pdfs/edlc/Outline_Eng.pdf
28. **Мухуров Н. И., Гасенкова И. В., Зими́на Т. М., Лучинин В. В., Котова И. Ф., Тявловская Е. А.** Нанопористые структуры анодного оксида алюминия для аналитических микросистем // *Диэлектрики—2008. XX Междунар. симпоз.* Санкт-Петербург, 16—20 июля 2008 г. СПб.: СПбГПУ, 2008.
29. **Зими́на Т. М., Мухуров Н. И., Трофимов Ю. В., Котова И. Ф.** Планарный гибридно-интегральный мультисенсорный модуль на базе анодного оксида алюминия для химического анализа // *Сенсор-2000: Всеросс. конф. с междунар. участ., г. Санкт-Петербург, 21—23 июня 2000.* СПб.: Электронстандарт, 2000. С. П. С. 40.
30. **Зими́на Т., Лучинин В.** Миниатюрные аналитические платформы: ожидания, реальность и перспективы // *Нанотехнология*. 2010. Т. 23. С. 80—88.
31. **Зими́на Т. М., Лучинин В. В.** От сенсоров к микроаналитическим системам // *Химические и биологические сенсоры*. М.: Техносфера. 2005. С. 302—324.
32. **Золотухина Е. В., Спиридонов Б. А., Федянин В. И.** Обеззараживание воды нанокомпозитами на основе пористого оксида алюминия и соединений серебра // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2010. Т. 10. Вып. 1. С. 78—85.
33. **Силина Ю. Е., Спиридонов Б. А., Горшунова В. П., Кучменко Т. А.** Определение общей кислотности газовой фазы тест-полосками на основе нанопористого оксида алюминия // *Аналитика и контроль*. 2011. Т. 15. № 3. С. 324—331.
34. **Рыжиков А. С.** Модификация поверхности тонких оксидных пленок для селективного детектирования газов и биологических молекул. Автореферат дисс. на соискание ученой степени кандидата химических наук, специальность 02.00.01 — неорганическая химия, Москва, 2006 г.
35. **URL:** <http://cosaxentaur.com/page/517/dew-point-meter-lpdt>
36. **Noginov M. A. et al.** Silver-Filled Alumina Membrane: Metamaterial with Hyperbolic Dispersion and Near-Zero Singularity // *Photonic Metamaterials and Plasmonics*. 2010.
37. **Kukhta A. V., Gorokh G. G., Kolesnik E. E., Mitkovets A. I., Taoubi M. I., Koshin Y. A., Mozalev A. M.** Nanostructured alumina as a cathode of organic light-emitting devices // *Surf. Sci.* 2002. Vol. 507. P. 593—597.
38. **Атращенко А. В., Красилин А. А., Кучук И. С.** и др. Электрохимические методы синтеза гиперболических метаматериалов // *Наносистемы: Физика, Химия, Математика*. 2012. Т. 3. № 3. С. 31—51.
39. **Belov A., Gavrilov S., Shevyakov V., Redichev E.** Pulsed electrodeposition of metals into porous anodic alumina // *Applied physics A: materials science & processing*. 2011. Vol. 102. P. 219—223.
40. **Raman C., Berklund C., Kim K., Pack D. W.** Modeling small-molecule release from PLG microspheres: effects of polymer degradation and nonuniform drug distribution // *Journal of Controlled Release*. 2005. Vol. 103. N 1. P. 149—158.
41. **Matsumoto F., Harada M., Nishio K., Masuda H.** Nanometer-scale patterning of DNA in controlled intervals on a gold-disk array fabricated using ideally ordered anodic porous alumina 2005. Vol. 17. P. 1609—1612.
42. **Зими́на Т. М.** Миниатюрные аналитические системы биомедицинского назначения — лаборатории на чипе // *Биотехносфера*. 2009. Т. 1, № 1. С. 11—17.
43. **Zimina T. M., Luchinin V. V., Mukhurov N. I. et al.** Functional Elements of Laboratory-on-a-Chip for Express Identification and Antimicrobial Susceptibility Testing of Bacterial Respiratory Tract Infections // *Proc. 2010 Lab-on-a-Chip European Congr., Abstract 116.* Dublin, 24—27 May, 2010.
44. **Zimina T. M., Luchinin V. V.** Microsystems for Express Analysis // *Journal of Analytical Chemistry*. 2011. Vol. 66, N 12. P. 1136—1147.
45. **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.
46. **Зими́на Т. М.** Микро- и наноаналитические системы // *Микро- и наносистемная техника*. 2007. № 8. С. 27—49.
47. **Зими́на Т. М.** Лаборатории на чипе для телемедицины // *Биотехносфера*. 2012. № 1. С. 29—40.
48. **Возианова Ж. И.** *Инфекционные болезни*. Киев: Здоровье. 2002. Т. 1. 904 с.
49. **Дрозд В. Е., Романьчев А. И.** и др. Способ получения пленок сульфида кадмия. А. С. СССР № 1307906 от 18.06.85.
50. **Алесковский В. Б., Дрозд В. Е.** и др. Способ получения пленок сульфида цинка. А. С. СССР № 1197514 от 24.04.84.
51. **Патент РФ № RU2026733.** Пористый сорбент на основе оксида алюминия / Л. Н. Рачковская, С. Ю. Бурылин, И. И. Фролова. 20.01.1995.
52. **Петухов Д. И., Буддаков Д. А., Азиев Р. В., Елисеев А. А.** Газоселективные мембраны и мембранные катализаторы на основе пленок пористого оксида алюминия // *Вторая выставка инновационных проектов, 24 ноября 2009.* Сборник тезисов. М.: МГУ, 2009.

А. М. Ефременко, аспирант, мл. науч. сотр.,
А. В. Корляков, д-р техн. наук, директор НОЦ,
О. Н. Асташенкова, аспирант,
А. Н. Кривошеева, канд. техн. наук, науч. сотр.,
 Санкт-Петербургский государственный
 электротехнический университет "ЛЭТИ"
 им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)
 e-mail: acorl@yandex.ru

Ѓ ЄЅЄЇ ѠАЇ ĩ АРАѠРЇ ѠЄ ЊЄЇ ѠАЅ
 ѠАЄЊѠѠРЄРЇ ААЇ ĩ ѠѠ ĩ ЄАЇ ĩ Є
 ĩ ЄѠРЄАА АЄРЇ ЄЇ ЄВ
 ĩ А ЄЇ ĩ РЇ АЇ ѠѠ ĩ ĩ АЄЇ АЄАѠ
 АЄВ ѠѠРЇ ЄЊѠА
 ĩ ЄЄРЇ ЊЄЊѠАЇ ĩ ĩ Є ѠАѠЇ ЄЄЄ

Поступила в редакцию 28.09.2012

Представлены результаты исследования процессов получения пленок нитрида алюминия методом высокочастотного магнетронного распыления. Показано влияние основных технологических параметров на свойства получаемых пленок, в том числе влияние электрического поля, образованного некомпенсированным зарядом на поверхности растущей пленки AlN. Предложен механизм возникновения остаточных механических напряжений в пленках AlN при ионно-плазменном осаждении.

Ключевые слова: тонкие пленки, нитрид алюминия, текстура, магнетронное распыление, механические напряжения, пьезоэлектрические пленки

Введение

В настоящее время интенсивно исследуются свойства пленок нитрида алюминия (AlN) для применений в микросистемной технике. Интерес к этому материалу связан с его пьезоэлектрическими свойствами, высокой временной и температурной стабильностью и относительно высоким коэффициентом электромеханической связи. Получение объемных монокристаллов или эпитаксиальных слоев AlN с заданной ориентацией требует применения сложного и дорогостоящего технологического оборудования. Использование текстурированного AlN позволяет упростить его получение при сохранении приемлемых для использования в приборах пьезоэлектрических характеристик получаемых слоев.

Основные цели данной работы — разработка и оптимизация технологии формирования текстурированных пленок AlN на различных инородных подложках для применения в устройствах микросистемной техники. Для этого изучали условия формирования текстуры в пленках AlN, а также механические напряжения, возникающие в пленках в процессе их получения методом ионно-плазменного осаждения.

Получение пленок нитрида алюминия

Физические свойства пленки существенно зависят от методов ее получения. Методы получения пьезоэлектрических пленок AlN непрерывно развиваются и совершенствуются, но в качестве наиболее перспективных можно выделить магнетронное распыление [1].

Осаждение слоев нитрида алюминия осуществляли в высоковакуумной камере, оснащенной турбомолекулярным насосом, магнетронной системой распыления с высокочастотным генератором. В качестве источника осаждаемого материала использовали алюминиевую мишень, распыляемую в аргоново-азотной смеси. Остаточное давление составляло $(1...5) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Процесс проводили при постоянном напряжении смещения ($U_{см}$) "катод (мишень) — анод" в диапазоне 60...300 В. Температуру подложки варьировали в диапазоне 200...600 °С.

Пленки нитрида алюминия получали на кремнии ориентации (100), (111), стекле, а также и на поверхности пленок Si_3N_4 и Ni, осажденных на кремний. Структурно-морфологические характеристики пленок оценивали по результатам ионного микропрепарирования, электронно-графического анализа, атомно-силовой микроскопии и исследований методами эллипсометрии, Оже-спектрометрии. Основным критерием оценки качества получаемой текстуры в пленках служили результаты электронографического анализа.

Во всех случаях было отмечено появление текстурированных пленок AlN с преобладающей осью текстуры (0001), ориентированной перпендикулярно поверхности подложки. Для выяснения основных технологических факторов, влияющих на рост текстурированных пленок AlN, был проведен ряд экспериментов, в результате которых были выделены факторы, оказывающие наибольшее влияние на структурные особенности получаемых пленок.

Влияние температуры. В процессе исследований температуру подложек варьировали в диапазоне от 200 до 600 °С.

Исследования пленок AlN, выращенных на подложках Si (100), показали наличие текстуры (0001) при температуре свыше 380 °С, а на подложках Si (111) — при температуре от 300 °С, что можно объяснить ориентирующим влиянием подложек Si (111).

Исследование структуры пленок, выращенных на аморфных подложках (стекло), показало, что текстурированные пленки AlN можно получать при нагреве подложки выше 500 °С, при более низких температурах образуются преимущественно аморфные пленки.

Во всех случаях дальнейшее увеличение температуры ведет к улучшению текстуры пленки.

Влияние давления рабочих газов. Давление p рабочей смеси в камере варьировали в диапазоне $(2...8) \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., долю аргона в газовой смеси изменяли в пределах 0...50 %. При уменьшении процентного содержания аргона наблюдалось снижение скорости роста пленки, ухудшение ее струк-

Параметры процесса		Диапазон изменения параметров	Влияние на текстуру пленки
Температура подложки, $T_{\text{П}}$	Кремний (100)	200 °C → 600 °C	Текстура $T_{\text{П}} > 380$ °C
	Кремний (111)		Текстура $T_{\text{П}} > 320$ °C
	Аморфная подложка		Текстура $T_{\text{П}} > 500$ °C
p_{Ar}/p_{Σ}		0 → 50 %	Текстура улучшается
p_{Σ} (при $p_{\text{Ar}}/p_{\Sigma} = 50$ %)		$(2 \rightarrow 4) \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.	То же
		$(4 \rightarrow 8) \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.	Текстура ухудшается

туры по сравнению с пленками, полученными при соотношении $\text{Ar} : \text{N}_2 = 1 : 1$. Снижение скорости роста связано с тем, что уменьшение доли аргона в рабочей смеси снижает интенсивность распыления мишени. Рост давления с $2 \cdot 10^{-3}$ до $4 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. сопровождается улучшением текстуры полученных пленок, дальнейшее увеличение давления ведет к ухудшению текстуры [2]. Качественное влияние технологических параметров на свойства получаемых пленок представлено в табл. 1.

Особенностью метода магнетронного распыления является наличие электронной и ионной бомбардировки поверхности подложки во время роста пленки. Для изучения возможности влияния этого фактора проводили эксперименты с использованием экранирующей сетки, установленной над подложкой и изолированной от "земли". В ходе исследований варьировалось давление в рабочей камере $(2...8) \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., при этом с сетки снимался наведенный электрический потенциал.

С возрастанием суммарного рабочего давления газа в камере потенциал на сетке увеличивается, наблюдается некоторое насыщение. Знак потенциала положительный, что говорит о преимущественно ионном потоке. Насыщение может быть связано с тем, что при некотором потенциале на сетке заряд, накопленный на ней, начинает экранировать поток частиц, летящий в направлении подложки. Результаты измерений представлены на рис. 1, а.

Для подтверждения связи потенциала на сетке с потоком заряженных частиц был проведен эксперимент с ионным источником вместо магнетрона. В ходе эксперимента изменялось давление аргона. Полученная зависимость потенциала на сетке показана на рис. 1, б. Общий вид зависимостей совпадает.

Для подтверждения наличия связи между текстурой и поверхностным зарядом, возникающим в процессе роста пленки на ее поверхности, были проведены специальные эксперименты.

Изучалось влияние предварительной ионной бомбардировки образцов, которая проводилась с помощью ионного источника, на образование текстуры. По результатам электронографического анализа образцы пленок, полученных с предварительной ионной бомбардировкой, имеют лучшую текстуру. Улучшение текстуры пленки можно связать с предварительной зарядкой поверхности. Использование ионного источника для предварительной обработки поверхности позволило получить

пленки с выраженной текстурой на стеклянных подложках (рис. 2).

В ходе эксперимента также исследовали влияние потенциала на экранирующей сетке на формирование текстуры. На сетку подавали напряжение в диапазоне $-30...+30$ В и исследовали структуру образцов, находившихся под сеткой. В результате было выяснено, что при подаче на сетку отрицательных напряжений заметно улучшается текстура получаемых слоев.

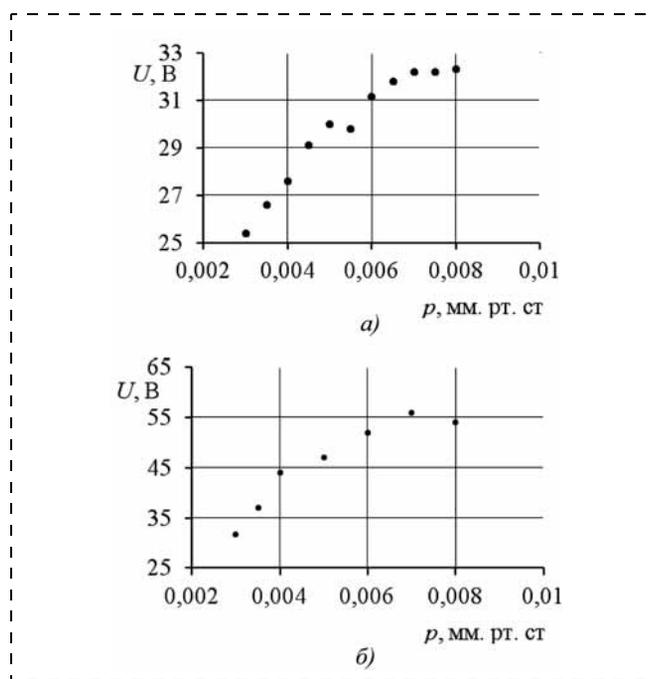


Рис. 1. Зависимость сеточного потенциала от давления в рабочей камере при использовании:

а — магнетрона; б — ионного источника

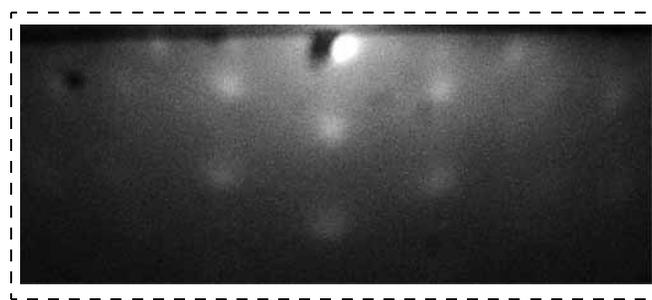


Рис. 2. Электронограмма пленки AlN на стеклянной подложке с предварительной ионной бомбардировкой

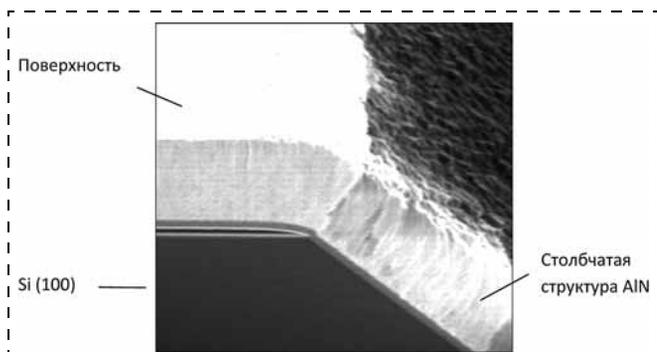


Рис. 3. Изображение среза текстуры пленки AlN на профилированной подложке

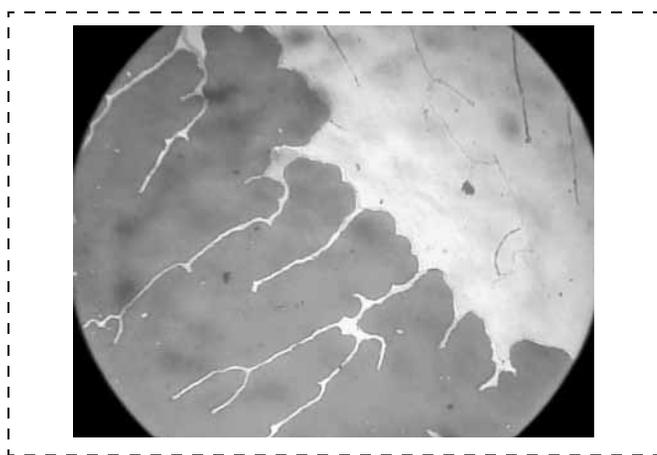


Рис. 4. Вид поверхности пленки AlN при резкой смене мощности разряда в процессе роста

При исследовании образцов на атомно-силовом микроскопе обнаружено, что поверхность образцов, полученных при противоположных значениях напряжений на сетке, имеет разный знак встроенного заряда. При исследовании скола полученных образцов обнаружено наличие значительного встроенного заряда в области интерфейса "подложка—пленка". При подаче на сетку потенциала разного знака получены пленки с разным размером кристаллитов и различными значениями сопротивления.

При изучении микроструктуры пленок AlN обнаружено также изменение направления роста кристаллитов в процессе нанесения пленок при использовании профилированных подложек (рис. 3).

На основании полученных результатов была выдвинута модель роста текстурированных пленок нитрида алюминия, основанная на влиянии электрического поля, образованного эффективным зарядом поверхности подложки, на процесс упорядочения и ориентации кристаллитов в процессе роста пленки AlN [3].

Структура слоя с отвечающей ей кристаллографической ориентацией образуется не сразу, а формируется в процессе роста. Считаем, что первый осажденный слой ориентирован в общем случае хаотически, однако если осаждение происходит на ориентированную подложку, то уже в первом слое

будет наблюдаться некоторая ориентация, которая зависит от типа подложки.

Во время горения разряда в результате бомбардировки заряженными частицами на поверхности растущей пленки может образоваться некоторый эффективный заряд. Этот заряд будет создавать в приповерхностной области подложки электрическое поле. Ориентированный рост пьезоэлектрических кристаллитов будет происходить под воздействием электрического поля. С этой точки зрения рост кристаллитов с минимальным углом разориентации является энергетически выгодным.

После выключения разряда происходит компенсация поверхностного заряда. Так как пьезоэлектрическая пленка находится в условиях жесткой фиксации в плоскости подложки, релаксация заряда должна сопровождаться появлением остаточных механических напряжений в пленке. Механическое напряжение определяется пьезомодулем, который зависит от степени текстурированности пленки, и значением поверхностного заряда, находящегося на поверхности пленки во время роста. При этом механические напряжения могут возникать не только при отключении разряда, но и при резкой смене его мощности, что часто приводит к отслаиванию отдельных участков пленки (рис. 4).

Анализ этих факторов и установление качественных взаимосвязей между параметрами процесса и свойствами осаждаемых пленок позволили более эффективно управлять ростом текстурированных слоев в используемой системе.

Структура, электрические и механические свойства пленок AlN

При изучении структуры пленок AlN использовали метод дифракции быстрых электронов. Анализ дифракционной картины показал, что пленки получаются текстурированными, с преимущественной ориентацией (0001) (оси поляризации) как на монокристаллических подложках, так и на подложках кремния с аморфными диэлектрическими и металлическими слоями.

Структуру выращенных пленок изучали также на образцах, препарированных ионным пучком на установке FIB Strata 205. На рис. 5 представлено сечение образца, на котором видна столбчатая структура пленки. На рис. 6 показан скол, образовавшийся в результате отслаивания пленки от подложки.

На снимке (рис. 6) хорошо видно, что пленка имеет двухслойную структуру. Верхний слой образован столбчатыми кристаллитами, а нижний, переходный слой, не имеет выраженной структуры. У пленок со слабо выраженной текстурой, выращенных на неориентирующих подложках, толщина переходного слоя может достигать 0,2 мкм. Имеется выраженная граница между неориентированным переходным слоем и текстурированной частью пленки, что свидетельствует о смене режима структурообразования. При этом наблюдается неравномерность сжи-

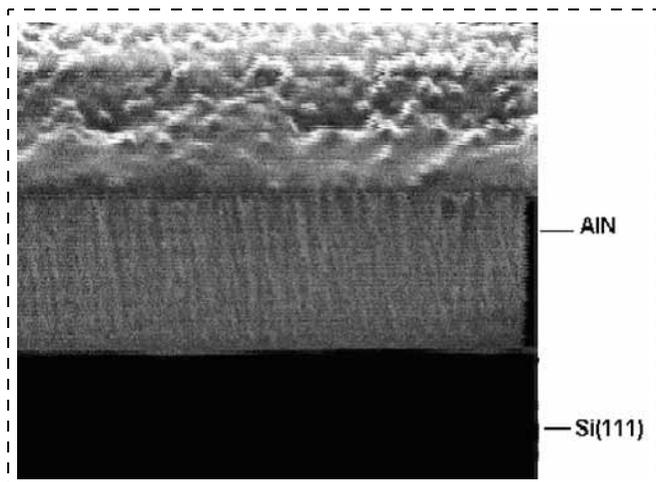


Рис. 5. Фотография поперечного среза пленки, полученного травлением ионным пучком

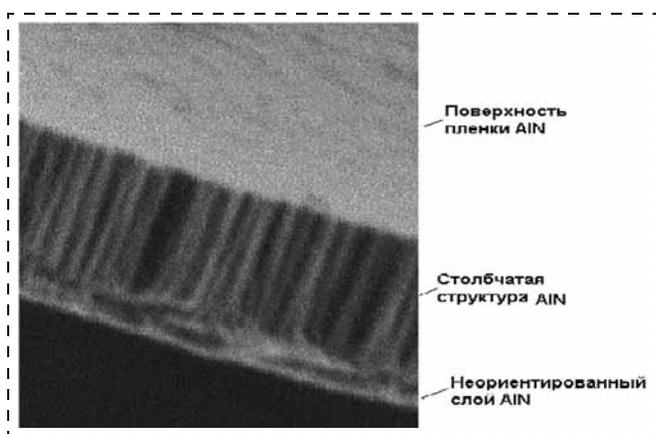


Рис. 6. Фотография скола пленки AlN

мающих механических напряжений по толщине пленки, что приводит к "скручиванию" отслоившихся пленок (рис. 7) при релаксации внутренних механических напряжений. Направление скручивания свидетельствует о более высоких сжимающих механических напряжениях в нижнем нетекстурном переходном слое.

В пленках со слабой степенью текстурированности методом Оже-спектроскопии было обнаружено большое содержание кислорода. Измерение показателя преломления пленок на кремнии методом эллипсометрии также свидетельствует о наличии кислорода в таких пленках. Полученные текстурированные пленки AlN имеют показатель преломления 1,96...2,26. Показатель преломления объемного монокристаллического нитрида алюминия равен 2,14. Установлено, что более низкий показатель преломления имеют пленки, в которых обнаружен кислород, а более высокий пока-

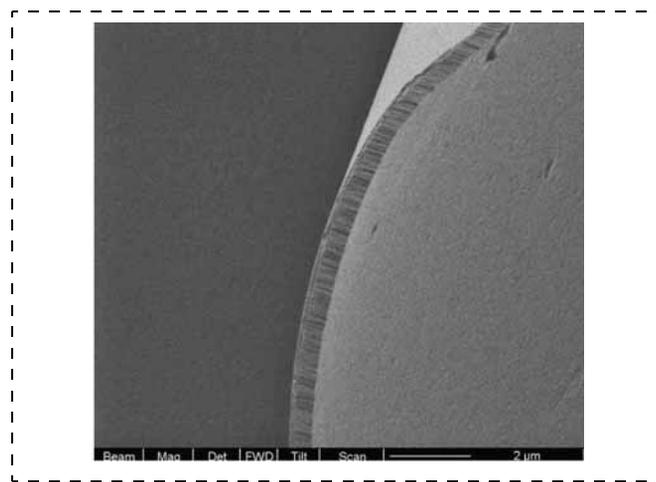


Рис. 7. Скручивание отслоившейся пленки AlN от Si подложки

затель — пленки с некоторым избытком алюминия. Были получены пленки нитрида алюминия с удельным сопротивлением до $8 \cdot 10^{14}$ Ом · см. Значение диэлектрической постоянной $\epsilon = 12,9$, полученное в пленках, согласуется с литературными данными для ориентированных пленок AlN [4]. Тангенс угла диэлектрических потерь полученных пленок на этой частоте равен 0,014.

Текстурированная пленка AlN обладает пьезоэлектрическими свойствами, что создает возможность ее использования в качестве активного элемента микромеханических структур. Однако получаемые методом магнетронного распыления пленки AlN имеют и встроенные механические напряжения, что создает дополнительные сложности при изготовлении микроструктур, особенно в комбинированных биморфных структурах (рис. 8).

Для пленок AlN получены значения внутренних сжимающих механических напряжений $\sigma = 300 \pm 100$ МПа и модуля Юнга в латеральном направлении приблизительно $E = 6$ ГПа, что существенно меньше значения для монокристаллического AlN. Это может быть объяснено деформацией межкристаллитных границ в столбчатой структуре текстурированной пленки AlN [3].

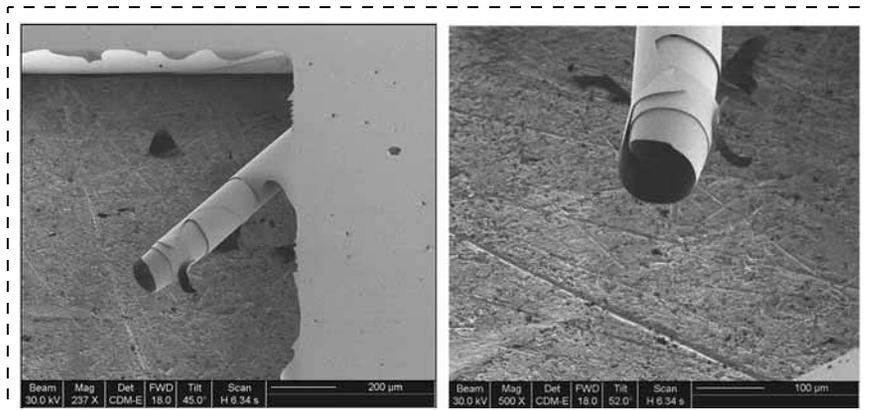


Рис. 8. Самоформирование микротрубок при разрушении биморфных мембран с высокими встроенными механическими напряжениями

Анализ результатов по исследованию механических напряжений в пленке AlN

Таким образом, в результате анализа представленных экспериментальных результатов можно констатировать, что возникновение остаточных механических напряжений в пленках AlN в процессе ионно-плазменного осаждения определяется вхождением ионизированных примесей из газовой среды, их неравномерным распределением по толщине пленки и сегрегацией на границах кристаллитов в столбчатой структуре. Накопление примеси на границе с подложкой в неупорядоченном слое может быть объяснено электромиграцией примесных атомов по границам кристаллитов по направлению тока стекания индуцированного заряда на подложку (Si). Твердофазные процессы электромиграции и сегрегации примеси приводят к формированию столбчатых структур [3] и образованию сжимающих механических напряжений в локальных участках пленки, где происходит накопление примеси (рис. 9).

Взаимодействие процессов протекания электрического тока, сегрегации и диффузии примеси, а также образования и накопления остаточных механических напряжений в структуре материала пленки может быть представлено эквивалентной схемой (рис. 10), отражающей взаимовлияние процессов [5], происходящих в открытой распределенной "микросистеме" — пленке в процессе ионно-плазменного осаждения.

При этом очевидно, что на формирование остаточных механических напряжений определенное влияние также могут оказывать и другие твердо-

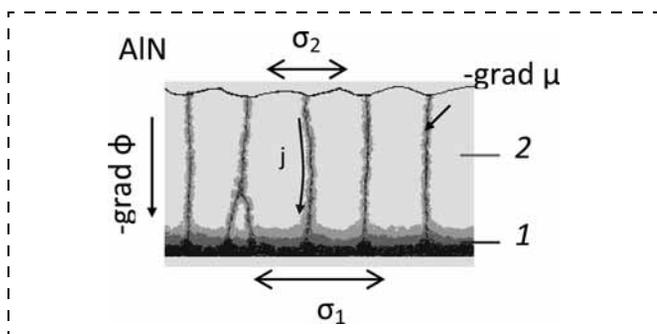


Рис. 9. Образование блочно-столбчатой структуры в пленках AlN при ионно-плазменных процессах осаждения

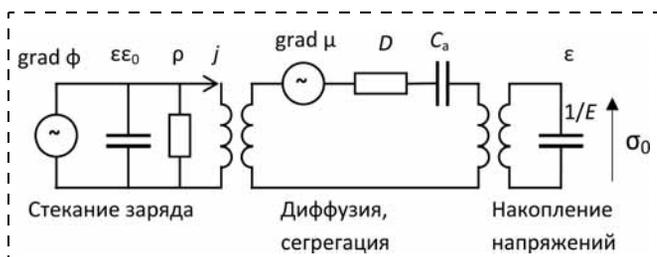


Рис. 10. Эквивалентная схема взаимодействия процессов стекания заряда, диффузии и образования механических напряжений, происходящих в пленке при ионно-плазменном осаждении

фазные процессы, происходящие во время роста и остывания пленки и изменяющие ее структуру и молярный объем.

Механические свойства пленок (модуль упругости, встроенные напряжения) зависят от условий их получения. В ионно-плазменных процессах первостепенное влияние на механические свойства пленок оказывает бомбардировка заряженными частицами и условия стока заряда. Это позволяет эффективно влиять на механические характеристики в процессе роста, управлять механическими свойствами пленок по толщине и площади подложки.

Заключение

В результате исследования влияния технологических параметров синтеза на процесс структурообразования текстурированных пленок нитрида алюминия установлено, что определяющее влияние на формирование текстуры оказывает электрическое поле, образованное некомпенсированным зарядом на поверхности растущей пленки AlN в процессе ионно-плазменного осаждения.

Наилучшие результаты, при которых получены высокотекстурированные пленки нитрида алюминия, достигнуты при использовании предварительной обработки поверхности источником ионов и отрицательного потенциала (-30 В) на экранирующей сетке. Удельное сопротивление полученных пленок нитрида алюминия — до $8 \cdot 10^{14}$ Ом · см.

Пленки AlN, полученные в процессе ионно-плазменного осаждения, характеризуются высоким сжимающим механическим напряжением около 300 МПа.

Основной механизм возникновения остаточных механических напряжений в пленках AlN при ионно-плазменном осаждении связан с вхождением ионизированных примесей в процессе ионной "бомбардировки" поверхности, твердофазными процессами сегрегации и электромиграции примеси по границам кристаллитов, в результате которого образуется "блочно-столбчатая" структура пленки с накоплением сжимающих механических напряжений в областях высокой концентрации примеси.

Работа выполнена в рамках обеспечения ОКР "2012-2.3-16-523-0011-002", выполняемой ФГУП "НПП "Исток" по договору от 22.06.2012 № 16.523.11.3019 по ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2007—2013 годы", а также при поддержке грантов Министерства образования и науки Российской Федерации по теме "Физико-технологические основы формирования высококочувствительных нано- и микро-мембранных элементов", соглашение № 14.В37.21.0082, по теме "Физико-технологические основы управления механическими напряжениями в микро- и наноструктурах для создания высококочувствительных микро-механических систем", соглашение № 14.132.21.1691, в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 годы и Програм-

мы стратегического развития университета (СПбГЭТУ "ЛЭТИ") "Развитие междисциплинарных исследований и инструментально-технологической базы как основа непрерывного инженерного образования по приоритетным направлениям российской экономики" за 2012–2016 годы.

Список литературы

1. **Закономерности** формирования текстуры в пленках нитрида алюминия при плазмохимическом осаждении / Ефременко А. М., Казак-Казакевич А. З., Кривошеева А. Н., Корляков А. В., Лучинин В. В. // Вакуумная техника и технология. 2006. Т. 16, № 3. С. 241–244.

2. **Ефременко А. М., Исаев С. А., Кривошеева А. Н., Корляков А. В.** Получение текстурированных слоев нитрида алюминия для микромеханических актюаторов // Материалы V Междунар. семинара "Карбид кремния и родственные материалы". В. Новгород, 2005. С. 94.

3. **Ефременко А. М., Корляков А. В., Кривошеева А. Н., Лучинин В. В.** Получение текстурированных слоев нитрида алюминия для микромеханических актюаторов // Вакуумная техника и технология. 2007. Т. 17, № 3. С. 189–198.

4. **Сейдман Л. А.** Низкотемпературное нанесение пленок нитридов кремния и алюминия реактивным распылением в вакууме // Обзор по электр. техн. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование. 1990. Вып. 5 (1519). С. 1–52.

5. **Корляков А. В.** Физико-технологические основы формирования базовых элементов микросистемной техники. СПб.: Технолит, 2008. 126 с.

УДК 621.3.049.7.002

Т. М. Зимина, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., e-mail: tmzimina@gmail.com,

А. В. Соловьев, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: alexei.v.soloviev@gmail.com,

В. В. Лучинин, д-р техн. наук., проф., зав. каф., Центр микротехнологии и диагностики, Санкт-Петербургский электротехнический университет "ЛЭТИ" (СПбГЭТУ), Санкт-Петербург,

Б. П. Николаев, канд. физ.-мат. наук, нач. лаб., Государственный научно-исследовательский институт особо чистых биопрепаратов, Санкт-Петербург

УЧЕИ ПАИИ-И АОИ АУ
 ЕИИИЕААИ ААИ ЕВ РАЦИ АРА,
 И И ААЕАИ И НОЕ
 Е ААРАААОЕИ И И Е
 ОИИИ Е×ЕАИ НОЕ И ААИ ЕОИ ОО
 И АИ И ×АИНОЕО
 А И ЕЕРИ ЕАИ ЕЕЕВРИ И И ×ЕИ А

Поступила в редакцию 20.09.2012

Представлены результаты применения экспресс-методов измерения свойств магнитных наночастиц (МНЧ) магнетита (Fe_3O_4) в капиллярном чипе с интегрированным композитным планарным магнитопроводом. Размер и магнитофоретическая подвижность МНЧ измерялись методом квазиупругого рассеяния света в гомодинном и гетеродинном режиме соответственно, а агрегационная устойчивость — методом динамической микротурбидиметрии. Проведено сравнение характеристик МНЧ магнетита, синтезированного прямым и наноэмульсионным методами, и показано, что последний метод дает агрегационно-устойчивые наночастицы размером около 10 нм с магнитофоретической подвижностью около $4 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \cdot (\text{Тл} \cdot \text{А} \cdot \text{с})^{-1}$. Показано, что разработанные экспресс-методы позволяют проводить быстрые (за время порядка 0,5...3 мин) измерения свойств МНЧ, используя микрообъемы образцов (1...2 мкл) без их разбавления (при объемной концентрации МНЧ в суспензии до 10 %).

Ключевые слова: магнитные наночастицы, капиллярный чип, квазиупругое светорассеяние в капилляре, микротурбидиметрия, магнитофорез в капилляре

Введение

В настоящее время магнитные наночастицы (МНЧ) все шире применяются в биомедицинских технологиях. В медицинских приложениях *in vivo* на основе МНЧ разрабатываются эффективные терапевтические и диагностические методы. Так, МНЧ применяют при терапии новообразований, когда нагрев в высокочастотном магнитном поле МНЧ, локализованных в заданной области организма, служит для непосредственного уничтожения клеток новообразований [1]. Также МНЧ применяют для локализованного высвобождения лекарственных средств (декапсулирование) [2], для адресной доставки лекарств в пораженный орган [3]. В этом случае удается минимизировать нежелательное токсическое действие этих лекарств на другие органы [4]. Кроме того, МНЧ успешно применяют для контрастирования при МРТ диагностике *in vivo* [5].

Однако МНЧ успешно используются не только *in vivo*, но также и *in vitro* для создания высокоселективных методов клинического анализа на основе интегральных аналитических микросистем — лабораторий на чипе [6–8]. Такие системы являются весьма перспективными для реализации экспресс-методов обнаружения биопатогенов в биологических образцах, а также для быстрой характеристики МНЧ при отработке оптимальных методов их синтеза. Последнее очень важно для оптимизации метода синтеза, так как экспресс-анализ позволяет испытать большее число образцов, варьируя различные параметры при синтезе.

Цель данной работы состоит в том, чтобы показать возможность быстрого определения свойств МНЧ в капиллярном чипе с помощью метода квазиупругого рассеяния света (КРС). Такой подход

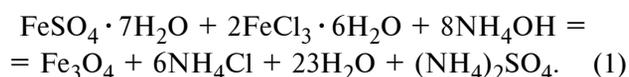
имеет ряд преимуществ по сравнению с обычно используемыми методами характеристики МНЧ:

- применение КРС позволяет характеризовать МНЧ размером менее 10 нм, что невозможно, например, в методе визуализации траекторий [9];
- использование капиллярного чипа позволяет проводить измерения в концентрированных суспензиях МНЧ, когда в макроскопической оптической ячейке подобные измерения и интерпретация их результатов очень сложны из-за многократного рассеяния и сильного затухания лазерного излучения в суспензии;
- микрообъем пробы позволяет резко сократить расход суспензии для проведения измерения;
- измерения размеров МНЧ, их магнитофоретической подвижности и агрегационной устойчивости осуществляются в одной и той же экспериментальной установке, что значительно сокращает время проведения комплексного экспресс-анализа.

В данной работе проведены измерения МНЧ магнетита, полученного методом наноэмульсионного синтеза с применением неионного поверхностно активного вещества (ПАВ) Tween 81, а также МНЧ, полученных прямым синтезом с использованием декстрана в качестве стабилизатора [10]. Рассмотрены результаты оптических измерений размера, подвижности и агрегационной устойчивости МНЧ магнетита (Fe_3O_4). Размер МНЧ определяли методом КРС на основе анализа корреляционной функции рассеянного света в гомодинном режиме [11, 12]. Магнитофоретическая подвижность МНЧ определялась методом КРС с применением оптического гетеродинамирования (оптического смещения) [10–12], а также специально разработанным авторами методом турбидиметрии в отраженном свете. Агрегационная стабильность МНЧ оценивалась методом динамической микротурбидиметрии [13, 14].

Синтез МНЧ магнетита

Микроэмульсионный метод. Для синтеза МНЧ магнетита, в соответствии с обобщенным уравнением реакции осаждения Fe по схеме Массарта (1) [15], использовали микроэмульсионный метод [10]:



Обратные мицеллы с солюбилизированными компонентами реакции (1), служащие "микрореакторами" для синтеза МНЧ, формировали с помощью неионного поверхностно-активного вещества (ПАВ) Tween 81 (полиоксиэтиленсорбитал моноолеат, "Sigma-Aldrich") [10]. Для проведения реакции смешивали два образца эмульсий следующего состава:

1) солюбилизированный водный раствор солей $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (чистый, Нева Реактив, ГОСТ 4147–74)

и $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (чистый, Нева Реактив, ГОСТ 4148–78), взятых в весовой пропорции 2 : 1, в растворе Tween 81 в пентадекане $\text{C}_{15}\text{H}_{32}$ (чистый, Реахим) в объемной концентрации 25 %;

2) солюбилизированный водный раствор амиака 6n NH_4OH (особочистый, Нева Реактив, ГОСТ 24147–80) в растворе Tween 81 в пентадекане.

Для приготовления растворов использовали деионизованную воду с удельным сопротивлением 17 МОм·см. В результате смешивания эмульсий получали обратные мицеллы с наночастицами Fe_3O_4 , заключенными в солюбилизированной дисперсной водной фазе. Полученную наноэмульсию магнетита подвергали ультразвуковой обработке при частоте $f = 24$ кГц и мощности 0,1 кВт и затем фильтровали с помощью мембранных фильтров MF-Millipore™ (Millipore, США) со средним размером пор 0,22 мкм.

Синтез МНЧ магнетита с использованием декстрана. МНЧ магнетита были также синтезированы по стандартной процедуре [10] с использованием $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ в водном растворе NH_4OH (уравнение (1)). Для стабилизации частиц использовали декстран с молекулярной массой $M = 40\,000$ а. е. м. Декстран растворяли в 0,5 М водном растворе NaOH и добавляли к суспензии МНЧ при интенсивной ультразвуковой обработке системы.

Изготовление планарного капиллярного чипа

Измерения подвижности МНЧ проводили в полимерном капиллярном чипе, изготовленном в виде сэндвич-структуры с помощью толсто пленочных технологий. В промежуточном слое чипа нанесен полосковый магнитопровод, изготовленный методом печати из магнитного композита (полимер/железная пудра). Измерительный капилляр имеет глубину 50 мкм, высоту 3 мм и длину 15 мм. Чип имеет входные отверстия для загрузки эмульсии МНЧ (рис. 1).

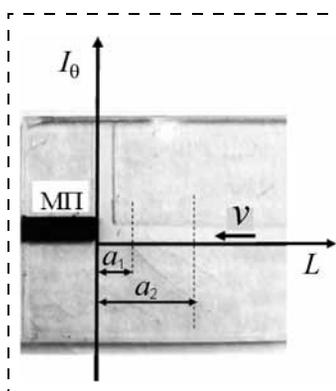


Рис. 1. Капиллярный чип с магнитопроводом МП для измерения магнитофоретической скорости v магнитных наночастиц (МНЧ);

МП — композит полимер/железная пудра; a_1 и a_2 — расстояния от источника магнитного поля МП до точек измерения скорости

Методы измерения

Гомодинный режим КРС для измерения размеров МНЧ. Оценка размеров МНЧ проводилась с помощью метода КРС [11, 12]. Экспериментальная установка для измерений представлена на рис. 2. Угол рассеяния составлял $\alpha = 30^\circ$ при длине волны падающего излучения $\lambda = 645$ нм и световой мощ-

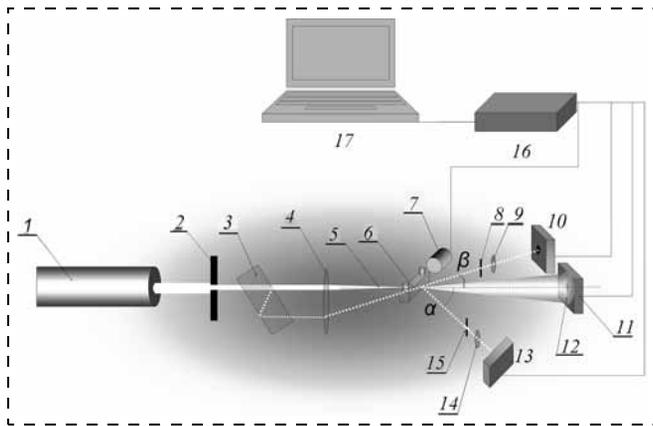


Рис. 2. Экспериментальная установка для измерений методами КРС (гомодинным и гетеродинным вариантами) и динамической турбидиметрии:

1 — лазерный полупроводниковый источник когерентного излучения; 2 — диафрагма; 3 — светоделительная пластинка; 4 — собирающая линза; 5 — поток когерентного излучения; 6 — капиллярный чип; 7 — источник магнитного поля; 8, 15 — диафрагмы; 9, 14 — фокусирующие линзы; 10, 13 — малоапертурные полупроводниковые фотоприемные устройства; 11 — полупроводниковый приемник для сигнала спекл-поля; 12 — участок спекл-поля; 16 — амплитудно-цифровой преобразователь; 17 — компьютер; α — угол рассеяния; β — угол между опорным пучком и оптической осью системы

ности $P = 30$ мВт. В эксперименте измеряли автокорреляционную функцию (АКФ) интенсивности рассеянного света. Время накопления сигнала составляло около 1 мин. Сигнал в гомодинном режиме регистрировался малоапертурным полупроводниковым фотоприемным устройством 13.

Время корреляции τ_k , связанное с эффективным гидродинамическим радиусом частицы, находили из следующего выражения, аппроксимирующего АКФ:

$$G \approx A + B \exp(-2Dq^2\tau) = A + B \exp(-\tau/\tau_k). \quad (2)$$

Здесь A и B — безразмерные константы, зависящие от геометрии эксперимента; D — коэффициент диффузии частиц; q — волновой вектор рассеяния; τ и τ_k — время и время корреляции соответственно;

$$q = \frac{4\pi n \sin(\alpha/2)}{\lambda}, \quad (3)$$

где $n = 1,33$ — показатель преломления воды при 20°C .

Средний гидродинамический радиус МНЧ вычисляли по следующей формуле:

$$R = \frac{kTq^2\tau_k}{3\pi\eta}, \quad (4)$$

где k — константа Больцмана; T — температура среды; η — вязкость среды.

Гетеродинный режим КРС для измерения магнитофоретической подвижности МНЧ. При использовании техники оптического гетеродинирования сигнал регистрируется малоапертурным фо-

топриемным устройством 10 (рис. 2). АКФ интенсивности рассеянного света частицами, движущимися со скоростью v , можно описать выражением

$$G \approx \cos(qv\tau) \exp(-q^2 D\tau). \quad (5)$$

Используя приближенное выражение $qv\tau_M = \pi$, можно оценить скорость движения как:

$$v = \frac{\pi}{q\tau_M}, \quad (6)$$

где τ_M определяют из экспериментальной АКФ по положению ее первого минимума. Измерения скорости МНЧ производились в капиллярном чипе (см. рис. 1).

Расчет магнитофоретической подвижности МНЧ проводили следующим образом. Предположим, что МНЧ имеет сферическую форму с радиусом r . Тогда сила F , действующая на нее в магнитном поле B , может быть записана как [16]

$$F = \frac{4\Delta\chi}{3\mu_0} \pi r^3 B \frac{\partial B}{\partial x}, \quad (7)$$

где $\Delta\chi$ — разность величин магнитной восприимчивости МНЧ и среды; μ_0 — магнитная постоянная. Чтобы найти скорость движения МНЧ, необходимо приравнять эту силу к силе сопротивления Стокса $F_s = 6\pi\eta vr$, которая возникает при движении сферической частицы радиусом r со скоростью v в жидкости с вязкостью η . Тогда скорость магнитофоретического движения можно записать как

$$v = \frac{2\Delta\chi}{9\mu_0\eta} r^2 B \frac{\partial B}{\partial x} = \frac{m_{\text{МФ}}}{\mu_0} B \frac{\partial B}{\partial x}, \quad (8)$$

где вводится величина $m_{\text{МФ}}$, которая характеризует способность магнитной частицы двигаться в данной среде под действием внешнего магнитного поля и называется магнитофоретической подвижностью. Измеряя скорость МНЧ и зная величины магнитного поля и его градиента в точке нахождения частицы, можно найти $m_{\text{МФ}}$ по формуле

$$m_{\text{МФ}} = \frac{v\mu_0}{B \partial B / \partial x}. \quad (9)$$

Динамическая микротурбидиметрия для исследования агрегационной устойчивости суспензий МНЧ. Спеклы (от английского speckle — пятнышко) являются результатом интерференции волн когерентного источника света, рассеянных на неоднородностях среды. Рассеянные волны различаются по фазе и создают интерференционную картину на поверхности детектора (11, 12 на рис. 2) с амплитудой и интенсивностью, изменяющимися случайным образом.

Спеклы могут сформироваться в дальнем поле (режим Фраунгофера) и в ближнем поле (режим Френеля). Режим определяется числом Френеля

$$F = \frac{d^2}{L\lambda}, \quad (10)$$

где d — диаметр лазерного пучка; L — расстояние от рассеивающего образца до детектора; λ — длина волны падающего излучения.

В дальнопольном режиме $F \gg 1$. Если $F \ll 1$, то режим называется ближнепольным. При условии $F \ll 1$ распространение света можно рассматривать в рамках геометрической оптики.

Свойства спеклов в дальнопольном режиме зависят только от диаметра лазерного пучка (d), длины волны падающего излучения (λ) и расстояния от образца до детектора (L). Средний размер спеклов $d_s = \lambda \times L \times d^{-1}$. В ближнепольном режиме свойства спеклов тесно связаны со свойствами рассеивающих объектов, поэтому их можно использовать для характеристики суспензий.

Метод микротурбидиметрии состоит в измерении динамики локальной интенсивности ближнепольного спекл-поля. Это достигается использованием детектора с малой входной апертурой, так чтобы на его поверхность попадало в среднем 2...3 спекла. Это исключает эффект усреднения по всему спекл-полю и повышает чувствительность метода [17].

Кинетика агрегации суспензии наночастиц обычно описывается уравнением Смолуховского [17]. Из приближенного решения этого уравнения характерное время агрегации может быть записано следующим образом:

$$t_a = \frac{3\eta}{4kTN_0s}, \quad (11)$$

где η — динамическая вязкость среды; k — постоянная Больцмана; T — температура среды; N_0 — начальная концентрация частиц; s — коэффициент слипания, определяемый как вероятность формирования агрегата при столкновении частиц.

Временная зависимость распределения частиц по размерам может быть приближенно описана следующим уравнением [18]:

$$n(i, \tau) \propto N_0 \frac{\exp(-i/\tau)}{\tau^2}, \quad (12)$$

где i — число частиц в агрегате; $\tau = t/t_a$ — безразмерное время агрегации.

Уравнение (12) показывает, что даже при малых временах в ходе агрегации появляется не нулевая вероятность возникновения больших кластеров частиц (состоящих из сотен и более изначальных частиц). Если несколько таких больших кластеров попадет в рассеивающий объем, то это вызовет значительные флуктуации спекл-поля, которые были рассмотрены ранее. Этот эффект используется для обнаружения начальной стадии агрегационного процесса, и по нему можно оценить характерное время агрегации данной суспензии.

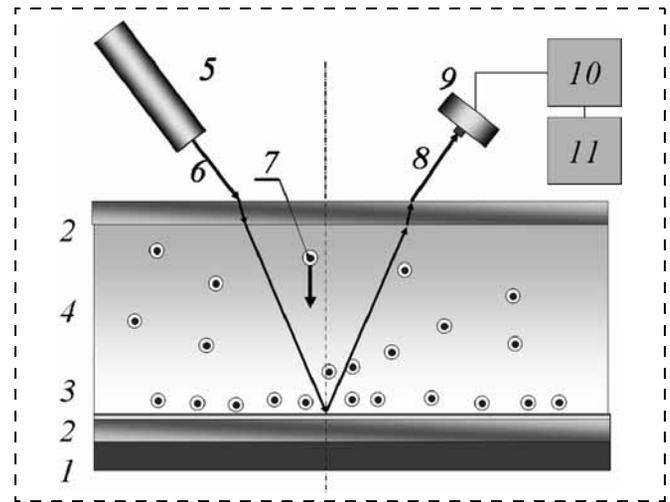


Рис. 3. Схема измерения метода турбидиметрии в отраженном свете для экспресс-оценки магнитофоретической подвижности МНЧ в микрокапиллярном чипе:

1 — магнит; 2 — прозрачный корпус капиллярного чипа; 3 — зеркальный слой; 4 — суспензия МНЧ; 5 — лазер; 6 — пучок падающего излучения; 7 — МНЧ (стрелкой показано направление дрейфа МНЧ в магнитном поле); 8 — пучок отраженного излучения; 9 — фотоприемное устройство; 10 — преобразователь сигнала; 11 — ПС

Метод турбидиметрии в отраженном свете. Разработан метод экспресс-оценки скорости движения МНП в магнитном поле (рис. 3). Установка содержит капиллярный чип с МНП, лазерный диод, зеркало, постоянный супермагнит (ПС) и фотодиод в качестве детектора. После создания магнитного поля в оптической ячейке с МНП интенсивность отраженного света I постепенно уменьшается из-за формирования более плотного слоя МНЧ вблизи поверхности зеркала, рассеивающего и поглощающего как падающий, так и отраженный свет.

По характерному времени спада I можно найти среднюю скорость наночастиц в магнитном поле с заданным градиентом и, следовательно, оценить их магнитофоретическую подвижность.

Результаты измерений

Измерение размера МНЧ. Результаты измерения размера МНЧ приведены в табл. 1. Образцы 1 и 2 были синтезированы с использованием микроэмульсионного метода, а образцы 3 и 4 — с использованием декстрана в качестве стабилизатора.

Из табл. 1 видно, что размер частиц, полученных наноэмульсионным методом, составляет около 10 нм, что соответствует однодоменным суперпарамагнитным частицам [10].

Таблица 1
Размеры частиц синтезированных магнитных наносуспензий

Номер образца	Время корреляции, 10^{-6} , с	Эффективный радиус, нм
1	0,8	10
2	0,9	11
3	2,56	36
4	2,36	40

Магнитофорез МНЧ. Проведено исследование магнитофореза МНЧ. Для обеспечения необходимой конфигурации магнитного поля в измерительном объеме планарного капиллярного чипа к капилляру подведен магнитопровод МП из магнитного полимерного композита (см. рис. 1). Такой магнитопровод является более технологичным, чем, например, стальной, и не уступает ему по эффективности. С использованием магнитопровода измерены скорости движения магнитных наночастиц в капилляре на расстоянии $a_1 = 3$ мм и $a_2 = 13$ мм от торца магнитопровода. Значения скоростей, измеренных для четырех различных образцов, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Скорость МНЧ частиц в магнитном поле

Номер образца	Значение $\tau_m, 10^{-3}$ с	Скорость $v, 10^{-6}$ м·с ⁻¹	Значение $\tau_m, 10^{-3}$ с	Скорость $v, 10^{-6}$ м·с ⁻¹
	$a_1 = 3$ мм		$a_2 = 13$ мм	
1	6,94	1,12	10,5	0,74
2	4,53	1,72	9,73	0,80
3	2,05	3,80	7,02	1,11
4	1,74	4,48	6,48	1,20

Для расчетов использовали эмпирические выражения, полученные для величин магнитной индукции и градиента магнитного поля в зависимости от расстояния x от намагниченного магнитопровода:

$$B = 1,39 \cdot 10^{-2} \exp(-x/0,005) \text{ Тл}; \quad (13)$$

$$\frac{\partial B}{\partial x} = 2,78 \exp(-x/0,005) \text{ Тл/м}. \quad (14)$$

Магнитофоретическая подвижность образцов m_{MF} определена по формуле (9) и представлена в табл. 3.

Таблица 3

Магнитофоретическая подвижность m_{MF} наночастиц

Образец №	$m_{MF}, 10^{-13} \cdot \text{м}^3 \cdot (\text{Тл} \cdot \text{А} \cdot \text{с})^{-1}$
1	3,51
2	3,78
3	6,78
4	6,63

Проведена оценка магнитофоретической подвижности МНЧ методом турбидиметрии в отраженном свете с использованием капиллярного чипа. На рис. 4 представлена зависимость I от времени для образца 2. Характерное время спадания I составляет 30 с, что соответствует характерной скорости $1,7 \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-1}$ и находится в разумном согласии со скоростями МНЧ для этого образца, измеренными методом КРС (см. табл. 2).

Агрегационная устойчивость суспензий МНЧ. Оценка агрегационной устойчивости суспензий МНЧ проведена с использованием описанного выше метода динамической микротурбидиметрии. Для практических применений суспензии МНЧ должны быть стабильны, т. е. при отсутствии связывающих агентов (как, например, комплементарных антигенов к связанному с МНЧ антигену) неспецифическая агрегация должна быть сведена к минимуму,

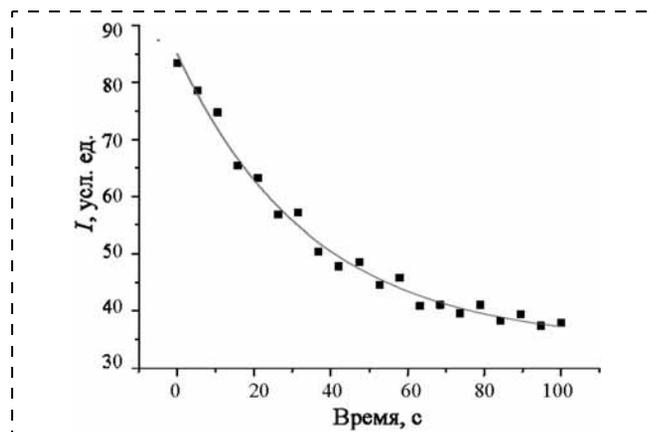


Рис. 4. Зависимость интенсивности отраженного света от времени в ходе магнитофореза

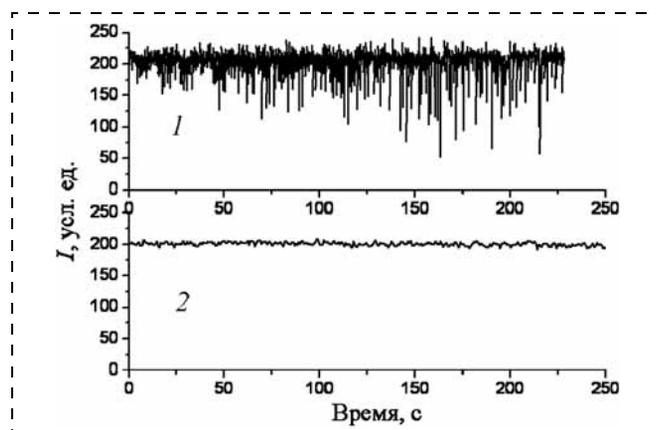


Рис. 5. Временная зависимость интенсивности (I) спекл-поля в измерениях методом динамической микротурбидиметрии в капиллярном чипе:

1 — при неспецифической агрегации МНЧ в нестабильной суспензии; 2 — в стабильной суспензии МНЧ

и ее характерное время должно намного превосходить время, необходимое для экспресс-диагностики. Только такие суспензии могут быть применены для детектирования соответствующего биопатогена.

Все измерения агрегационной устойчивости проводились в ближнепольном спекл-поле при числе Френеля около 3 ($d = 10^{-2}$ см, $L = 5$ см и $\lambda = 6,45 \cdot 10^{-5}$ см).

Суспензия, синтезированная с применением декстрана (образец 4, кривая 1 на рис. 5), проявляет признаки нестабильности уже в течение трех минут измерений, тогда как суспензия, полученная микроэмульсионным способом, остается стабильной на этом временном интервале (образец 1, кривая 2 на рис. 5).

Заключение

Изготовлен планарный капиллярный чип с композитным магнитопроводом, в котором проведены измерения свойств МНЧ методами КРС. Размер МНЧ, их магнитофоретическая подвижность и агрегационная устойчивость были измерены в течение трех минут при использовании 1...2 мкл суспензии МНЧ с объемной концентрацией МНЧ до 10 %. Магнитные наночастицы магнетита синтезированы методом наноэмульсионного синтеза, а также

прямым методом. При наноземulsionном методе синтеза размер частиц составил около 10 нм, что соответствует однодоменным суперпарамагнитным наночастицам. Определены скорости и магнитофоретическая подвижность МНЧ в суспензиях, синтезированных различными методами, и проведена оценка их агрегационной устойчивости.

Таким образом, показано, что разработанные методы позволяют проводить комплексный экспресс-анализ свойств МНЧ с характерными размерами около 10 нм на одной экспериментальной установке, используя микрообъемы образцов без их разбавления.

Работа проводилась при финансировании Минобрнауки РФ в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2012—2013 гг.: № ГС 14.В37.21.0568 и № ГС 14.В37.21.0793.

Список литературы

1. Corot C., Robert P., Idée J. M., Port M. Recent advances in iron oxide nanocrystal technology for medical imaging // Adv Drug Deliv Rev. 2006. V. 58. N 14. P. 1471—504.
2. Hong R. Y., Feng B., Chen L. L., Liu G. H., Li H. Z., Zheng Y., Wei D. G. Synthesis, characterization and MRI application of dextran-coated Fe₃O₄ magnetic nanoparticles // Biochem. Eng. J. 2008. V. 42. P. 290—300.
3. Eastoe J., Hollamby M. J., Hudson L. K. Recent advances in nanoparticle synthesis with reversed micelles // Adv. Colloid Interface Sci. 2006. V. 128—130. P. 5—15.
4. Muller B. W., Muller R. H. Particle size distributions and particle size alterations in microemulsions // J. Pharm. Sci. 1984. V. 73. P. 919—22.
5. Gupta A. G., Gupta M. Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications // Biomaterials. 2005. V. 26. P. 3995—4021.
6. Peng S., Wang C., Xie J., Sun S. Synthesis and Stabilization of Monodisperse Fe. Nanoparticles // J. Am. Chem. Soc. 2006. V. 128. P. 10676—10677.

7. Veselova O. V., Nikolaev B. P., Shliakov A. M. Study of the ternary system Tween 81-*n*-C₁₆H₃₄-H₂O at the range of -40 to +50 °C. // Colloid J. 1985. V. 6. P. 1027—1033.

8. Nikolaev B. P., Toropov P. K., Shliakov A. M. Study of the function of multienzyme systems of Escherichia coli cellular structures in organic media microemulsions by (31)P-NMR and spin probing (Rus.) // Bioorgan. Khim. 1993. V. 2. P. 150—160.

9. Häfeli U. O., Lobedann M. A., Steingroewer J., Moore L. R., Riffle J. Optical method for measurement of magnetophoretic mobility of individual magnetic microspheres in defined magnetic field. // J. of Magnetism and Magnetic Materials. 2005. V. 293. N 1. P. 224—239.

10. Nikolaev B. P., Eliseev O. V., Marchenko Ya. Yu., Yakovlevaa L. Yu., Zimina T. M., Soloviev A. V., Luchinin V. V. Preparation of Magnetite Nanoemulsion Stabilized by Tween 81 for MRI Contrast Enhancement // AIP Conference Proceedings. 2010. V. 1311. P. 458—465.

11. Cummins H. Z., Pike E. R. Photon correlation spectroscopy and velocimetry // NATO advanced study institutes series: Physics (V. 23), NATO Plenum Press. 1977. 589 p.

12. Pecora U. ed. Dynamic Light Scattering: Applications of Photon Correlation Spectroscopy. New York: Pentium Press, 1985.

13. Soloviev A. V., Zimina T. M. On-chip near-field speckle analysis of nanoparticles for bio-medical express-diagnostics // ICPC NANONET, 3rd Annual Workshop, 24—25 May, 2011.

14. Soloviev A. V., Zimina T. M. On-chip Near-Field Speckle Analysis of Early Stage Aggregation Kinetics in Suspension of Nanoparticles // Proceedings of the IEEE Russia. North West Section. 2011. V. 1. 2011. P. 13—18.

15. Massart R. Preparation of aqueous magnetic liquids in alkaline and acidic media // IEEE Trans. Magn. 1981. V. 17. P. 1247—1248.

16. Zborowski M., Osters G. R., Moore L. R., Milliron S., Chalmers J. J., Schechter A. N. Red Blood Cell Magnetophoresis // Biophys J. 2003. V. 84. N 4. P. 2638—2645.

17. Соловьев А. В., Зими́на Т. М., Лучинин В. В. Способ исследования агрегационной способности частиц коллоидной системы. Патент РФ № RU 2405133, опубликован 27.11.2010.

18. Von Smoluchowski M. Drei Vorträge über Diffusion, Brownsche Molekularbewegung und Koagulation von Kolloidteilchen // Phys. Z. 1916. V. 17. P. 585—599.

19. Soloviev A. V., Zimina T. M. On-chip Near-Field Speckle Analysis of Early Stage Aggregation Kinetics in Suspension of Nanoparticles // Proc. of the IEEE Russia. North West Section. 2011. V. 1. P. 13—18.

УДК 537.534.7, 537.533.2

М. А. Кузнецова, мл. науч. сотр.,
e-mail: mary_k@pochtamt.ru,

В. В. Лучинин, д-р техн. наук, проф.,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет "ЛЭТИ"
(СПбГЭТУ)

Ô Î Ñ Ò Ó Ô Õ Ö × Ù Ú Û Ü Ý Þ ß à á â ã
ä å æ ç è é ê ë ì í î ï ð ñ ò ó ô õ ö × ù ú û ü ý þ ß à á â ã
ä å æ ç è é ê ë ì í î ï ð ñ ò ó ô õ ö × ù ú û ü ý þ ß à á â ã
ä å æ ç è é ê ë ì í î ï ð ñ ò ó ô õ ö × ù ú û ü ý þ ß à á â ã
ä å æ ç è é ê ë ì í î ï ð ñ ò ó ô õ ö × ù ú û ü ý þ ß à á â ã
ä å æ ç è é ê ë ì í î ï ð ñ ò ó ô õ ö × ù ú û ü ý þ ß à á â ã
ä å æ ç è é ê ë ì í î ï ð ñ ò ó ô õ ö × ù ú û ü ý þ ß à á â ã
ä å æ ç è é ê ë ì í î ï ð ñ ò ó ô õ ö × ù ú û ü ý þ ß à á â ã

Поступила в редакцию 20.09.2012

Представлены результаты комплексного анализа возможностей и ограничений на применение острогофокусированного ионного пучка для объектов микросистемной техники (МСТ) и различных методов исследований. Детально проанализированы особенности применения данной технологии на примере создания карбидокремниевых автоэмиссионных острий и диодных структур на их основе.

Ключевые слова: карбид кремния, ионный пучок, автоэлектронная эмиссия, диод, ионно-стимулированное травление, ионно-стимулированное осаждение

Введение

Управляемость и контролируемость технологии острогофокусированного ионного пучка по отношению к объектам различной физико-химической природы, строения, формы и геометрических размеров, их интеграция в рамках одной системы являются отличительной чертой ионно-лучевых технологий. Данная технология реализуется в режимах локального микрофрезерования и прецизионного избирательного ионно-стимулированного травления или осаждения, что позволяет оперативно проводить операции препарирования, изготовления, реконструкции микро- и наноразмерных гомогенных и гетерогенных объектов, прототипирование в целом [1].

Учитывая возможности практического использования ионного пучка при создании приборов нового поколения, в данной статье показана его применимость для формирования наноразмерных ав-

тоэмиссионных острийных эмиттеров для диодных/триодных структур на подложках карбида кремния. Представленные результаты отражают более чем семилетний опыт работы авторов на установке остросфокусированного ионного пучка Strata FIB 205 xP, а также последние исследования, выполненные на более современной системе Helios Nanolab FEI Company с интеграцией в рабочей камере электронного и ионного пучков.

К сожалению, остросфокусированный (единицы нанометра) высокоэнергетический (десятки киловольт, плотность тока до 10^3 А/см²) ионный пучок не является "безобидным" и имеются определенные ограничения на его применение в условиях различного класса объектов и методик использования [2]. Можно выделить семь основных факторов, влияющих на конечный результат:

- распыление материала при формировании изображения;
- переосаждение распыленного материала;
- имплантация ионов галлия и образование радиационных дефектов;
- аморфизация и перестройка поверхности;
- образование "складок";
- образование "капельной фазы";
- образование зоны "смещения" при ионно-стимулированном осаждении слоев [3].

Далее эти факторы будут рассмотрены подробнее.

Особенности воздействия ионного пучка при формировании 2D и 3D микро- и наноразмерных объектов

Переосаждение распыленного материала. При создании поперечных слоев для анализа внутренней структуры объекта одним из лимитирующих качество изображений факторов является повторное осаждение. Повторное осаждение скрывает маленькие объекты, так как распыленный материал покрывает окружающую поверхность. Особенно заметно повторное осаждение при создании трехмерных структур. Вокруг, например, созданных отверстий виден четкий валик, его наличие затрудняет точную идентификацию приповерхностных слоев, толщина "заваленного" края может достигать 50 нм. При создании угловых структур запыляются уже созданные части сечения.

Чтобы предотвратить появление данного эффекта, требуется использование паров йода во время травления. Йод реагирует с распыляемым материалом с образованием летучих компонентов, которые откачиваются. Также возможно использование защитных платиновых покрытий, предварительно осаждаемых в зоне создания поперечного сечения, таким образом можно сохранить для анализа приповерхностные слои.

Имплантация ионов галлия и образование радиационных дефектов. Первичный галлиевый пучок обладает значительной энергией (ускоряющее напряжение до 30 кВ), его ионы вызывают каскад столкновений в решетке мишени. Это приводит к

накоплению вблизи траектории иона вакансий, междоузельных атомов и сложных дефектов (кластеров). По данным Оже-спектроскопии, для карбида кремния пик профиля имплантации находится на глубине ~20 нм.

Данный эффект обязательно требуется учитывать при работе со сверхтонкими слоями, например с подзатворным диэлектриком, прямое воздействие на него может полностью вывести из строя транзистор. Даже очень небольшие дозы имплантации и образовавшиеся из-за этого радиационные дефекты снижают время жизни неосновных носителей заряда в кремнии, также снижается и подвижность носителей. Вследствие этого возможно изменение удельного сопротивления. Таким образом, требуется осторожность при использовании метода остросфокусированного ионного пучка для анализа даже на стадии контроля пластин для последующего изготовления интегральных микросхем (ИМС), например. Кроме этого, имплантация ионов имеет и положительные стороны для улучшения контраста изображения: имплантация галлия делает поверхность более проводящей. Например, до модификации непроводящий нитрид выглядит темным, тогда как после модификации он светлый. Это говорит о том, что приповерхностный слой стал проводящим за счет имплантации.

Аморфизация и перестройка поверхности. Плотности тока остросфокусированного галлиевого пучка значительны и достигают значения $(2...3) \cdot 10^3$ А/см². При столь высоких плотностях тока и дозах облучения практически всегда происходит формирование аморфных слоев. Тем не менее, из-за высоких плотностей тока имплантируемых ионов образцы иногда достаточно ощутимо нагреваются, что приводит к увеличению дозы аморфизации, происходит частичный отжиг радиационных дефектов. Анализ методом дифракции быстрых электронов показал, что аморфизованный слой на кремнии имеет толщину до 40 нм. Доза, необходимая для образования аморфного слоя, на кремнии составляет $2 \cdot 10^{14}$ см⁻², для арсенида галлия — на порядок меньше. Это соответствует времени воздействия порядка 1 мкс.

Артефакты воздействия ионного пучка

Образование складок. При создании поперечных сечений возникает ряд артефактов, остающихся после травления ионным пучком. Один из них — это "складчатость поверхности" — вертикальные полосы на плоскости сечения. Их появление связано с топографией поверхности вышележащих слоев. Полосы возникают в том случае, когда есть ступенчатое изменение высоты поверхности образца или когда сечение проходит через отверстия, пустоты в материале. Также их возникновению способствует различие в коэффициентах травления, например, металлических шин и пассивирующего диэлектрика в ИМС и МСТ.

Таблица факторов ограничения и способов оптимизации режимов воздействия острогофокусированного ионного пучка

Фактор ограничения		Направления оптимизации режимов и подавление образования артефактов
Особенности воздействия ионного пучка	Ограничение предельного разрешения из-за распыления материала	<ul style="list-style-type: none"> • Минимизация значения перекрытия пучка в точке раstra • Уменьшение соотношения сигнал—шум • Выбор участков для контроля с малым коэффициентом распыления
	Переосаждение распыленного материала	<ul style="list-style-type: none"> • Уменьшение токов распыления • Использование газовой химии, например паров йода • Использование параллельных процессов при создании резов сложной формы
	Импламентация и образование радиационных дефектов	<ul style="list-style-type: none"> • Сканирование и травление под небольшим углом • Уменьшение ускоряющего напряжения, по крайней мере, при первичном позиционировании и подготовке к травлению • Использование защитных сверхтонких металлических пленок
	Аморфизация и перестройка поверхности	<ul style="list-style-type: none"> • Использование минимально возможных токов пучка • Сокращение числа циклов сканирования • Сканирование и травление под небольшим углом для сохранения каналов в поликристаллических средах
Артефакты воздействия ионного пучка	Образование "складок"	<ul style="list-style-type: none"> • Создание сечения под углом • Использование меньших токов пучка • Быстрое полное сканирование при небольшом токе поверхности сечения во время его создания
	Образование "капельной фазы"	<ul style="list-style-type: none"> • Использование минимально возможных токов пучка • Использование паров XeF_2 в просмотрном режиме • Сокращение числа циклов сканирования
	Образование зоны "смещения"	<ul style="list-style-type: none"> • Напыление относительно толстых слоев платины для получения заданных электрических характеристик • Использование электронно-стимулированного осаждения для формирования подслоя

Образование "капельной фазы". Еще одним артефактом является характерное только для галлиевого пучка образование так называемой капельной фазы — шариков галлия на поверхности некоторых материалов, имеющих в своей структуре галлий, например арсенид и нитрид галлия. Продолжительное воздействие на поверхность среза высокоэнергетического пучка приводит к образованию шариков, на 70 % состоящих из галлия (по данным рентгеноспектрального микроанализа). Иногда они бывают достаточно большого размера (до микрометра в длину) за счет смыкания близлежащих шариков.

Образование зоны "смещения" при ионно-стимулированном осаждении. Одна из возможностей, предоставляемых ионным пучком, — ионно-стимулированное осаждение материалов из газовой фазы. При ионно-стимулированном осаждении, например платины, структура получаемого слоя достаточно сложная. Нижний слой — аморфизованная поверхность субстрата, на который происходит осаждение, он содержит лишь материал подложки, далее идет так называемая зона смещения, состав этого подслоя имеет несколько компонентов. Помимо углерода и платины (платина осаждается из металлоорганического материала) в нем содержатся материал подложки и галлий в значительном количестве. Толщина данного переходного слоя может достигать 30 нм. Слой платины, формирующийся на данном переходном слое, уже практически не будет содержать атомов подложки, хотя углерод, тем не менее, останется. Наличие такого слоя с измененными из-за примесей электриче-

скими характеристиками следует учитывать при формировании проводников. Этот слой накладывает ограничение на минимальную толщину слоя платины, который можно сформировать, если требуются достаточно хорошие электрические характеристики [4]. Изучение и анализ приведенных выше особенностей воздействия ионного пучка позволили выработать ряд методов воздействия на нежелательные эффекты.

В табл. 1 приведены основные факторы, влияющие на изменение характеристик катода, и технологические приемы, позволяющие их скомпенсировать. Основные проблемы связаны со снижением стабильности эмиссии, утечками, снижением яркости, флуктуациями эмиссионного тока, нарушением форм-фактора эмиттера. Основные варианты воздействия — тщательный подбор параметров травления, изменение углов воздействия, использование газовой химии.

Конструктивно-технологические особенности создания автоэмиссионных 3D-структур на SiC

При создании многослойных композиций, являющихся основой для формирования диодных и триодных структур методом ионно-лучевого травления, использовались, как наиболее доступные, подложки карбида кремния политипа 4H, полученные методом "ЛЭТИ". Концентрация некомпенсированной примеси в использованных подложках составила $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Селекция подложек на основе анализа кристаллографической структуры и ориентации не проводилась. Это связано с тем, что

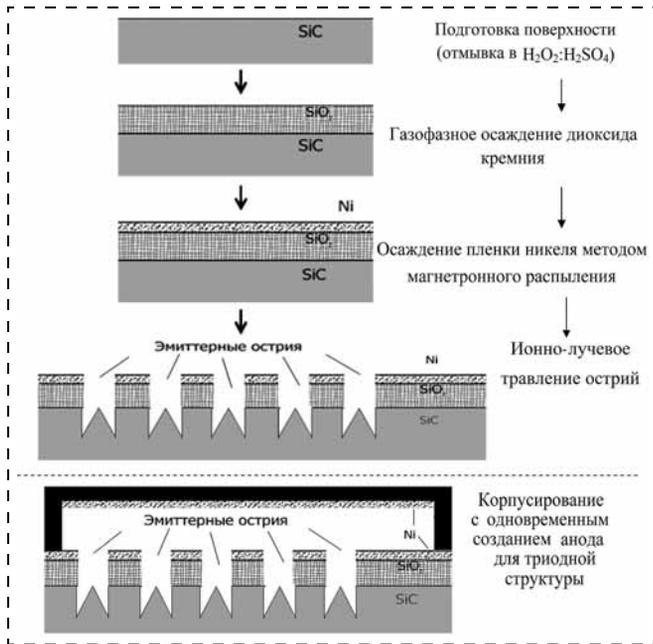


Рис. 1. Технологический маршрут изготовления автоэмиссионных SiC диодов

скорость травления остросфокусированным высокоэнергетичным ионным пучком слабо зависит от вышеупомянутых факторов. Удаление оксида не проводилось. С учетом особенностей формирования структур ионным пучком требования структурного совершенства поверхности не выдвигались.

На рис. 1 приведен технологический маршрут изготовления автоэмиссионных диодов ионно-лучевым травлением. В случае триодной структуры никелевый слой на поверхности начинает выполнять функцию сеточного электрода, а анод формируется за счет наличия контакта на обратной стороне крышки корпуса, "прижатой" к поверхности через диэлектрический спейсер. Для формирования слоев карбид кремния—диэлектрик—металл использовались следующие технологические операции:

- молекулярное наслаивание и газофазное осаждение для получения диоксида кремния (диэлектрический слой);
- магнетронное осаждение никеля (проводящий слой).

Формирование омических контактных систем является важнейшим элементом при создании любых типов полупроводниковых приборов, особенно работающих при повышенных температурах и в условиях высоких напряженностей электрических полей. Поэтому данному вопросу уделялось особое внимание.

На обратной стороне подложки создавался базовый контакт, используемый для подачи напряжения на эмиттерную структуру. Он представлял собой слой никеля толщиной 0,2 мкм, отожженный при 950 °C для создания омического контакта.

Для расчета оптимальных с точки зрения эмиссионных характеристик геометрических параметров на базе программы Comsol MultiPhysics, ver.1, была создана физическая модель автоэмиссионного острейного катода. Основной целью было полу-

чение значений параметров, обеспечивающих наибольшую напряженность электрического поля в области вершины острейного эмиттера. Модель диодной структуры имела три варьируемых параметра: D_{SiC} (расстояние между ячейками), D_{cell} (ширина ячейки), H_{SiO_2} (толщина диэлектрика). В качестве оптимальных геометрических параметров были выбраны следующие: $D_{SiC} = 2,5$ мкм (расстояние между ячейками), $D_{cell} = 3,5$ мкм (ширина ячейки), $H_{SiO_2} = 1$ мкм (толщина диэлектрика).

Базовые принципы травления остросфокусированным ионным пучком. Особенности и параметры процесса

Основной эффект, использовавшийся для получения малых радиусов закругления острий, — это гауссово распределение плотности тока по сечению пучка. Шаблон, представлявший собой концентрическую окружность, позволил получить острую структуру в центре за счет ионного травления "хвостами распределения". Использование такого шаблона исключило прямое воздействие на острие и вследствие этого позволило минимизировать внедрение ионов галлия в приповерхностный слой катода.

Все сканирующие лучевые комплексы создают изображение, травят, осаждают и т. д., используя однотипную методику. Первичный пучок сканирует поверхность образца по регулярному шаблону, называемому растром. Обычно растр состоит из серии горизонтальных линий, немного смещенных друг относительно друга по вертикали. Однако в современных системах вычислительные мощности позволяют генерировать шаблоны, состоящие из точек, положение и параметры травления в которых заданы по отдельности. В данном случае травление ионным пучком осуществлялось по шаблону, представлявшему собой последовательность точек, расположенных по суживающейся к центру спирали (рис. 2). Также для уменьшения шероховатости и минимизации рельефа на границах точек травления применялось 50 %-ное перекрытие точек. Время задержки было минимальным для предотвращения образования артефактов и получения гладкого рельефа. Основным варьируемым параметром — соотношением внешнего R_{OUT} и внутреннего R_{IN} диаметров шаблона.

В табл. 2 представлены параметры процесса формирования остросфокусированным ионным пучком одиночного острия на многослойной композиции, аналогичной представленной на рис. 1. На рис. 3 ил-

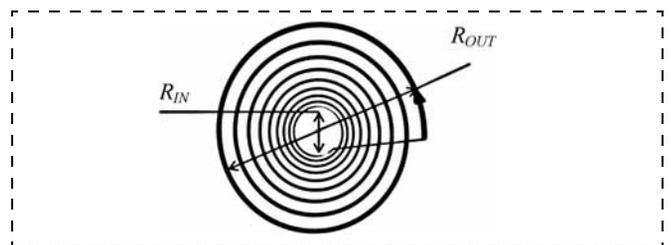


Рис. 2. Шаблон для формирования одиночного острия остросфокусированным ионным пучком:

R_{IN} — внутренний диаметр; R_{OUT} — внешний диаметр

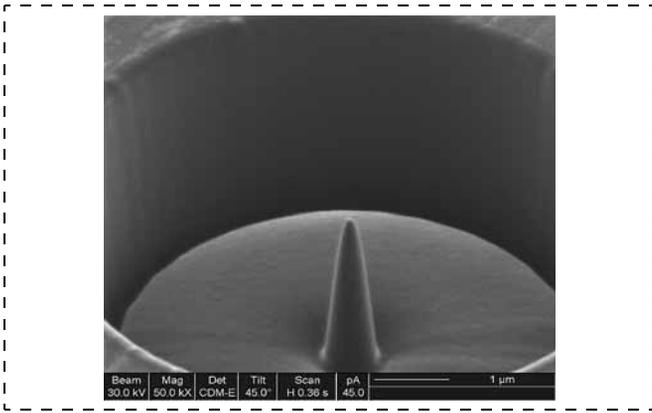


Рис. 3. Одиночное острие, сформированное на структуре "карбид кремния—диоксид кремния—металл". Радиус кривизны менее 50 нм

Таблица 2

Параметры ионного пучка и шаблона, использованные при изготовлении одиночного острия

Параметр	Значение
Ток пучка, нА	0,92
Ускоряющее напряжение пучка, кВ	30
Число точек шаблона	10^6
Перекрывание точек шаблона, %	50
Внутренний диаметр шаблона, мкм	0,3
Внешний диаметр шаблона, мкм	3,5
Доза, мкм ³ /нКл	0,15
Шаг смещения пучка, нм	6,5
Время травления, мин	2,7

люстрируется результат формирования острой структуры при использовании данных параметров.

Эмиссионный ток с единичного острия чрезвычайно мал (единицы микроампера), поэтому для получения высокой интегральной яркости были созданы матрицы острий. Формирование матрицы осуществлялось путем клонирования шаблона на расстоянии 2,5 мкм по обеим осям. На рис. 4 приведено изображение матрицы автоэмиссионных диодов с 576 элементами.

Измерение электрических характеристик одиночных острий, сформированных ионно-лучевым травлением

Для измерения электрических характеристик изготовленных структур использовался микрозонд Kleindiek, интегрированный в вакуумную камеру комплекса Helios Nanolab. Система имеет высокую

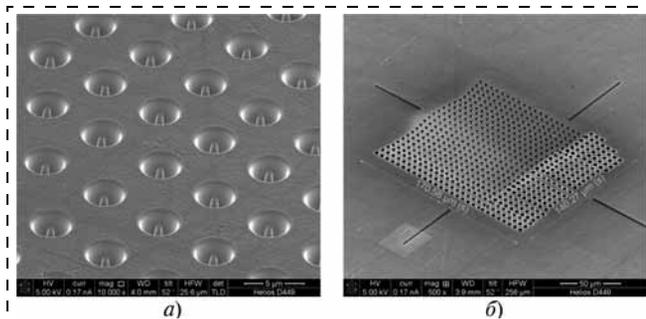


Рис. 4. Внешний вид созданной структуры: а — матрица автоэмиссионных диодов; б — общий вид матрицы 24 × 24 с 576 элементами

точность позиционирования зондов (4 нм) при диаметре зонда до 100 нм, что позволяет осуществлять их контактирование к элементам практически любой минимальной топологической нормы.

Измерения характеристик осуществлялись на единичном острие. Микрозонд, представляющий собой вольфрамовую иглу с радиусом кривизны 0,1 мкм, приближался на расстояние 0,5...1 мкм к острейшему эмиттеру. На эмиттер подавалось напряжение в интервале 0...80 В относительно заземленного образца, параллельно измерялся ток эмиссии с острия. Схема измерений и РЭМ-изображение подведенного зонда представлены на рис. 5. Определение вольт-амперных характеристик (ВАХ) одиночного острейшего катода проводилось до теплового или иного разрушения острия. В процессе эксперимента были получены ВАХ автоэмиссионных структур, которые различались геометрическими параметрами, а именно размерами и формой отдельных составных частей.

Анализ ВАХ изготовленных экспериментальных карбидокремниевых структур показал, что варьирование технологических условий изготовления и геометрических параметров структур позволяет получить значительное изменение автоэмиссионных характеристик. Уменьшение радиуса закругления автоэмиссионного острия и уменьшение расстояния между катодом и анодом приводят к увеличению крутизны ВАХ и к сдвигу начала эффективной эмиссии в сторону меньших напряжений (рис. 6).

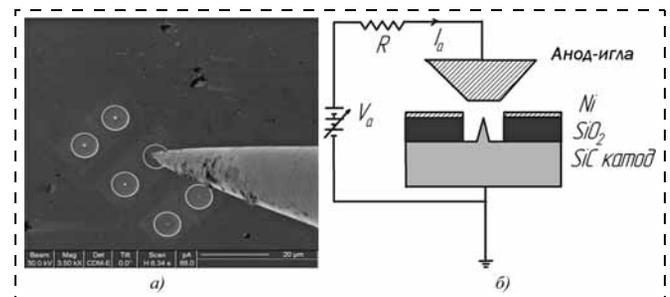


Рис. 5. Измерение ВАХ: а — подведение микрозонда к сформированному острию; б — схема измерений

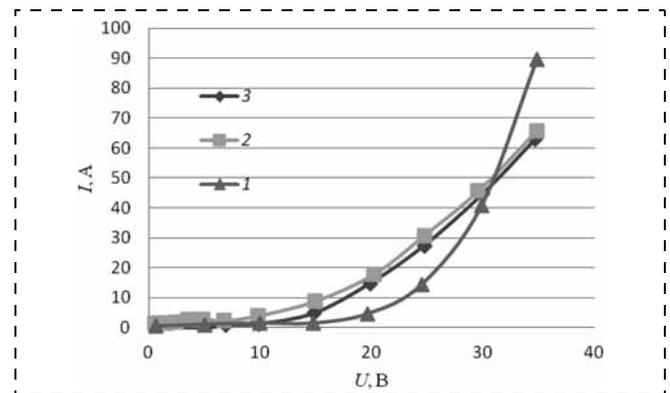


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики SiC одноострийных автоэмиссионных структур. Кривым соответствуют следующие радиусы закругления острий:

1 — 0,185 мкм, 2 — 0,09 мкм, 3 — 0,02 мкм

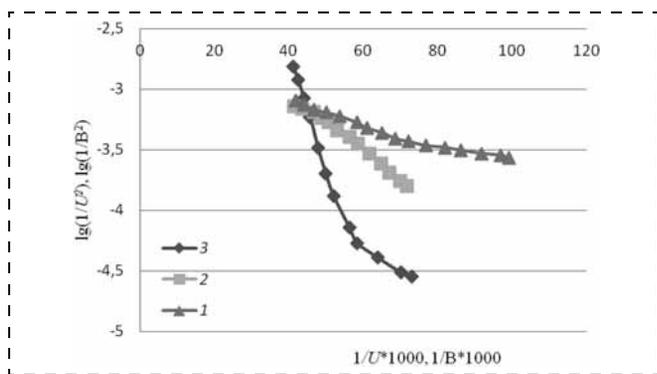


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики одиночных острий в координатах Фаулера—Нордгейма. Кривым соответствуют следующие радиусы закругления острий:

1 — 0,185 мкм, 2 — 0,09 мкм, 3 — 0,02 мкм

Совпадение экспериментальных кривых с общей формой зависимости Фаулера—Нордгейма позволило сделать вывод об автоэмиссионном характере протекающего тока. Для получения фактического значения плотности тока автоэмиссии и площади эмитирующей поверхности катода экспериментальные данные представляются в более удобной для обработки форме. На рис. 7 представлен график зависимости $\lg\left(\frac{1}{U^2}\right)$ от $\frac{1}{U}$ в той области значений напряженности поля, которая характерна для типичного автоэмиссионного процесса.

В проведенных экспериментах прямолинейным являлся только участок при больших значениях эмиссионного тока, при малых напряжениях наблюдается отклонение от линейной зависимости. В соответствии с зависимостью Фаулера—Нордгейма по наклону прямой и положению точки пересечения ее с осью $\lg\left(\frac{1}{U^2}\right)$ можно определить не измеряемые непосредственно в эксперименте величины форм-фактора и площади эмитирующей поверхности катода.

Для ряда практических применений использование матриц острийных катодов позволяет получить принципиальные преимущества по сравнению с одиночными катодами. Полный ток эмиссии структуры, а соответственно, и мощность, управляемая прибором, пропорциональны числу элементов, составляющих систему. Повышается надежность за счет многократного дублирования работы элементов. Происходит усреднение рабочих параметров и устраняется влияние возможного разброса пара-

Таблица 3

Параметры, полученные для сформированных острий. Все данные представлены для единичных острий

Параметры	Значение
Радиус кривизны острия, нм	25...185
Сила тока одного острия, мкА	До 2,5
Плотность упаковки, см ⁻²	Не более 10 ⁶
Разброс значений плотности тока для острий с одинаковыми радиусами кривизны, %	До 50
Флуктуации тока во времени	Значительные

метров при производстве. Оценка плотности тока может быть проведена исходя из следующих условий. Одна ячейка с катодом и стенками занимает площадь ~25 мкм², на 1 см² можно разместить 4 · 10⁶ катодов. При этом ток одного острия лежит в диапазоне 0,2...0,25 мкА. Основным ограничивающим фактором при таких плотностях становится отвод теплоты. Параметры полученных структур приведены в табл. 3.

Заключение

Технология остросфокусированного ионного пучка в вакууме, реализуемая в микроскопическом и технологических режимах, позволяет гибко, оперативно, без использования шаблонов решать задачи препарирования, изготовления, реконструкции микро- и наноразмерных гомогенных и гетерогенных объектов.

Учет ряда особенностей ионного пучка и использование представленных в статье методов подавления нежелательных эффектов позволяет значительно улучшить качество получаемых срезов и структур, в конечном счете расширяя границы применимости ионного пучка как способа воздействия на материал. Была разработана технология формирования карбидокремниевых острий и экспериментально установлено, что сила тока одного острия может достигать значения 2,5 мкА. При этом существует значительный разброс значений плотности тока для острий с одинаковыми радиусами кривизны, что может быть связано с артефактами и особенностями воздействия остросфокусированного ионного пучка. В процессе работы были созданы экспериментальные образцы матриц (24 × 24 элемента) автоэмиссионных карбидокремниевых диодов.

Исследования проводились в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 годы, а также в рамках "Программы стратегического развития междисциплинарных исследований и инструментально-технологической базы как основы непрерывного инженерного образования по приоритетным направлениям российской экономики" на 2012—2016 гг.

Список литературы

1. Лучинин В. В., Савенко А. Ю., Тагаченков А. М. Методы микро- и наноразмерной обработки материалов и композиций // Пет. журн. электроники. 2005. № 2. С. 3—14.
2. Кузнецова М. А., Лучинин В. В., Савенко А. Ю. Физико-технологические основы применения наноразмерной ионно-лучевой технологии при создании микро- и наносистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 8. С. 24—32.
3. Кузнецова М. А. Возможности и ограничения наноразмерных ионно-лучевых технологий // Биотехносфера. 2011. № 1—2 (13—14). С. 46—53.
4. Кузнецова М. А., Лучинин В. В. Ионно-стимулированное топологически управляемое локальное осаждение проводящих слоев на основе платины // Вакуумная техника и технология. 2009. Т. 19. № 3. С. 149—158.
5. Кузнецова М. А., Лучинин В. В., Савенко А. Ю. Наноразмерные ионно-лучевые технологии. Возможности и ограничения (тезисы) // "Микро- и нанотехнологии в электронике". Матер. Междунар. научно-техн. конф., Нальчик, 21—27 сентября 2009. С. 36—39.

МУДК 621.3.049.779

А. В. Корляков, д-р техн. наук, директор НОЦ,
e-mail: akorl@yandex.ru,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)

И АОИ А АІ АЕИ АЕЕ І РЕ
ЕТ І І ЕАЕНІ Т І АІ АЕЕЧА
Е І Т ААЕЕРІ ААІ ЕЕ УЕАІ АІ ОІ А
І ЕЕРІ НЕНОАІ

Поступила в редакцию 20.09.2012

Рассматривается метод описания микросистем в обобщенных параметрах. Приведены таблицы аналогий потенциальных и кинетических параметров систем различной физической природы. Рассмотрены особенности схемотехнического описания микросистем в сосредоточенных параметрах на основе аналогии идеальных элементов для различных физических систем. Приведены примеры схем-аналогов преобразователей для различных элементов микросистем.

Ключевые слова: метод аналогий, микросистема, преобразователь, эквивалентная схема, гиратор, мембранный элемент

Введение

При проектировании и анализе работы элементов микросистем часто приходится одновременно учитывать воздействия различной физической природы [1] (электричество, механика, теплота, звук и др.). Их анализ представляет определенные трудности, связанные с взаимовлиянием физических различных сил и потоков при функционировании микросистем на микроуровне.

Цель данной работы — развитие методов обобщенного описания и комплексного анализа элементов микросистем различной физической природы с учетом преобразований разного вида физических воздействий в процессе их функционирования.

Описание систем в обобщенных параметрах

Существует общность в уравнениях при описании систем различной физической природы. Это описывается в рамках нескольких систем аналогий [2]. В микросистемной технике при расчете и анализе работы сложных систем часто применяют электро-механические [3], электротепловые [4–6], элект-

троакустические аналогии [7]. Некоторые обобщения подхода представлены в работах [8, 9].

Феноменологический подход к этому вопросу заключается в описании систем через обобщенные физические параметры [10]:

- обобщенные координаты q_i ;
- обобщенные сопряженные импульсы p_i ;
- обобщенные скорости:

$$v_i = \dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i}; \quad (1)$$

- обобщенные силы:

$$F_i = \dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial q_i}, \quad (2)$$

где H — гамильтониан системы, равный полной энергии (кинетической и потенциальной). В дифференциальной форме, в соответствии с выражениями (1), (2), гамильтониан системы выражается как

$$dH = \sum_i (-F_i dq_i + v_i dp_i) + \frac{\partial H}{\partial t} dt. \quad (3)$$

В соответствии с этим выражением в сумме могут быть представлены параметры системы различной физической природы, определяемые выбором обобщенных координат (степеней свободы), например:

$$dH = -Fdr + vdp - Md\alpha + \omega dY - PdV + TdS, \quad (4)$$

где F , r , v , p — параметры механического поступательного движения; сила, перемещение, скорость, импульс, соответственно; M , α , ω , Y — параметры механического вращения: момент силы, угол поворота, угловая скорость, момент импульса, соответственно; P , V — акустические (пневматические) параметры — давление и объем; T , S — тепловые параметры — температура и энтропия системы.

В выражениях (3) и (4) выделяются потенциальные и кинетические составляющие полного дифференциала энергии. Между ними существует определенная аналогия. По существу, обобщенные координаты и обобщенные импульсы являются обобщенными степенями свободы a_i (параметрами системы) для гамильтониана в рамках фазового пространства (q_i, p_i) , а обобщенные силы и обобщенные скорости $(-F_i, v_i)$ — соответствующими обобщенными потенциалами A_i системы в соответствии с выражениями (1) и (2):

$$A_i = \frac{\partial H}{\partial a_i}. \quad (5)$$

Также можно определить и следующие обобщенные параметры:

- обобщенная гибкость (емкость) $C_i = dq_i/dF_i$;
- обобщенная масса (индуктивность) $m_i = dp_i/dv_i$;

Таблица аналогий потенциальных параметров различных физических систем

Вид энергии	Обобщенный параметр q	Потенциал (обобщенная сила) $F (\Delta F)$	Скорость изменения параметра $v = dq/dt$	Обобщенная емкость $C = dq/dF$	Обобщенное сопротивление $R = dF/dv$	Потенциальная энергия $U = \int Fdq$
Механическое поступательное движение	Абс. смещение, деформация $r(x, y, z)$ [м]	Механическая сила F [Н]	Скорость $v = dr/dt$ [м/с]	Гибкость $1/k = dr/dF$ [м/Н]	Механическое сопротивление $R_M = dF/dv$ [Н·с/м]	Упругая энергия $kr^2/2$ [Дж]
Механическое вращение	Угол поворота α	Момент силы $M = [rF]$ [Н·м]	Угловая скорость $\omega = d\alpha/dt$ [1/с]	Податливость кручению $1/g = d\alpha/dM$ [1/Н·м]	Сопротивление кручению $R_\omega = dM/d\omega$ [Н·м·с]	Упругая энергия кручения $g\alpha^2/2$ [Дж]
Акустика, гидростатика	Объем V [м ³]	Давление P [Па]	Скорость объемного расширения $J_V = dV/dt$ [м ³ /с]	Сжимаемость* газов $-V/P$ [м ³ /Па]; жидкостей ≈ 0	Сопротивление протекания $R_P = dP/dJ_V$ [Па·с/м ³]	Энергия изотермического сжатия газа $PV \ln(P_2/P_1)$ [Дж]
Электростатика	Электрический заряд q [Кл]	Электрический потенциал ϕ [В]	Электрический ток J [А]	Электрическая емкость $C = dq/d\phi$ [Кл/В]	Электрическое сопротивление $R = d\phi/dJ$ [Ом]	Электрическая энергия $C\phi^2/2$ [Дж]
Электрическая поляризация	Дипольный эл. момент $p_e = ql$ [Кл·м]	Напряженность эл. поля E [В/м]	Скорость эл. поляризации $J_p = dq/dt$ [А·м]	Поляризуемость $dp_e/dE = \epsilon_0 V$ [Кл·м ² /В]	Сопротивление поляризации dE/dJ_p [Ом/м ²]	Энергия эл. диполя $p_e E$ [Дж]
Тепловые системы	Энтропия S [Дж/К]	Температура T [К]	Скорость изменения энтропии $J_S = dS/dt$ [Дж/К·с]	Энтропийная (тепло) емкость $C_S = dS/dT$ [Дж/К ²]	Тепловое (энтроп.) сопротивление $R_T = dT/dJ_S$ [К ² /Вт]	Тепловая энергия $Q = \int TdS$ [Дж]
Химические реакции, диффузия	Число частиц N	Химический потенциал μ [Дж]	Скорость реакции $J_N = dN/dt$ [1/с]	Адсорбционная емкость $dN/d\mu$ [Дж ⁻¹]	Сопротивление диффузионное μ/J_N [Дж·с]	Химическая энергия $\int \mu dN$ [Дж]
Поверхностное натяжение	Площадь поверхности s [м ²]	Сила поверхн. натяжения T [Н/м]	Скорость увеличения площади ds/dt [м ² /с]	Податливость растяжению ds/dT [м ³ /Н]	Сопротивление растяжению $T/(ds/dt)$ [Н·с/м ³]	Поверхностная энергия $\int Tds$ [Дж]

- обобщенное сопротивление $R_i = dF_i/dv_i$;
 - обобщенная проводимость $1/R_i = dv_i/dF_i$.
- Построенная таким образом аналогия между различными физическими явлениями основана не просто на формальной схожести уравнений, а на представлении об обобщенных параметрах и по-

тенциалах системы (5), вытекающих из вариационных принципов [11]. Система аналогий на основе обобщенных параметров для различных физических явлений представлена в табл. 1 и 2.

Как видно из этих таблиц, многие физические явления могут быть представлены потенциальной

Таблица 2

Таблица аналогий кинетических параметров различных физических систем

Вид энергии	Обобщенный параметр p	Потенциал (об. скорость) v	Скорость изменения параметра (об. сила) $F = dp/dt$	Обобщенная индуктивность $L = dp/dv$	Обобщенная проводимость $1/R = dv/dF$	Кинетическая энергия $K = \int vdp$
Механическое поступательное движение	Импульс $p = mv$ [Н·с]	Скорость v [м/с]	Мех. сила (инерции) $F = dp/dt = ma$ [Н]	Инерционная масса $m = dp/dv$ [кг]	Механическая проводимость $1/R_M = dv/dF$ [м/Н·с]	Кинетическая энергия движения $mv^2/2$ [Дж]
Механическое вращение	Момент импульса $Y = [rp] = I\omega$ [Н·м·с]	Угловая скорость ω [1/с]	Момент силы (инерции) $M = dY/dt = I\epsilon$ [Н·м]	Момент инерции $I = dY/d\omega$ [кг·м ²]	Проводимость кручения $1/R_\omega = d\omega/dM$ [1/Н·м·с]	Кинетическая энергия вращения $I\omega^2/2$ [Дж]
Газо- и гидродинамика	Поверхностная плотность импульса $p/s = \rho v$ [Н·с/м ²]	Объемный поток $J_V = dV/dt = sv$ [м ³ /с]	Давление (ударное) $P = d(p/s)/dt$ [Па]	Инерционность потока $m/s^2 = \rho l/s$ [кг/м ⁴]	Проводимость протекания $1/RP = dJ_V/dP$ [м ³ /с·Па]	Кинетическая энергия течения $\rho(J_V)^2/2s$ [Дж]
Магнитные явления	Магнитный поток $\Phi = Bs$ [В·с]	Магнитодвижущая сила nJ [А]	ЭДС самоиндукции $\phi = d\Phi/dt$ [В]	Индуктивность $L = d\Phi/dJ$ [Гн]	Электрическая проводимость $1/R = dJ/d\phi$ [См]	Магнитная энергия $LJ^2/2$ [Дж]

Примеры схем-аналогов идеальных элементов различных физических систем

Электрическая	Проводник					
Механическая поступательная						
Механическая вращательная						
Акустическая						

и кинетической аналогией. Причем для электромагнитных явлений электростатика представлена аналогами потенциальных параметров, а магнетизм — кинетических параметров. На этом основаны известные электромеханические аналогии, где масса и упругость аналогичны соответственно индуктивности и емкости. Тепловые и диффузионные процессы представлены только потенциальными параметрами. Для тепловых процессов в качестве параметра системы (обобщенной координаты) используется энтропия, в отличие от известных электротепловых аналогий, где в качестве параметра обычно выступает количество теплоты. Это пример того, что обобщенные параметры системы не всегда строго соответствуют общепринятым в специальных областях технических дисциплин. Похожая ситуация и с элементами магнитостатики, где аналогом импульса выступает магнитный поток.

Представленные аналогии не всегда привычны для узких специалистов, но лучше описывают процессы взаимодействия систем различной физической природы, так как основаны на общих принципах сохранения энергии (3), определения мощности (Вт) в произведении обобщенных сил и скоростей, размерности действия (Дж · с) в произведении обобщенных импульсов и координат.

В рамках каждого вида физической системы (механическая, электрическая и т. д.) можно выделить пассивные идеальные элементы: диссипативного типа (сопротивление, проводимость); емкостного типа (упругость, теплоемкость); индуктивного типа (масса, момент инерции, индуктивность). Идеальные элементы характеризуют определенные фундаментальные допущения могут быть соотнесены с конкретными конструктивными элементами технической системы. Их схематичное изображение и физические аналогии представлены в табл. 3. Наряду с пассивными элементами систем также используют идеальные проводники и идеальные источники обобщенных сил и потоков [12]. Таким образом, техническая система (одной физической природы) может быть схематично представлена в виде совокупности идеальных элементов, соединенных определенным образом в соответствии с особенностями их взаимодействия. Схемы

элементов отражают "прообразы" реальных конструкций элементов. Такая схема (рис. 1) отражает структурные и функциональные свойства технической системы и эквивалентна системе дифференциальных уравнений, описывающих ее работу.

С учетом аналогий (табл. 3) схемы различных по физическим принципам работы технических систем часто отображают в конечном счете в виде электрических схем-аналогов. Это обусловлено как личными пристрастиями разработчиков, так и развитыми методами и программами анализа электрических схем. При этом преобразование механических схем в электрические схемы-аналоги происходит с учетом инверсии цепи (рис. 2). Это свя-

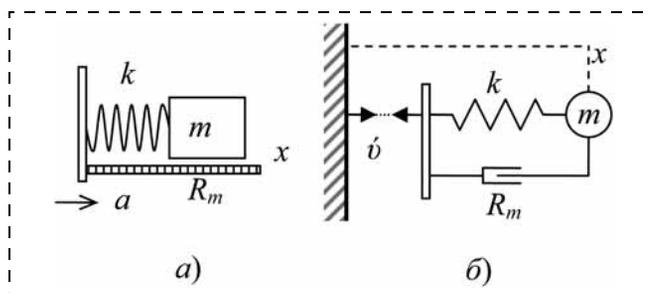


Рис. 1. Пример механической системы маятника на пружине под действием внешнего ускорения:

a — схема конструкции; б — механическая схема системы

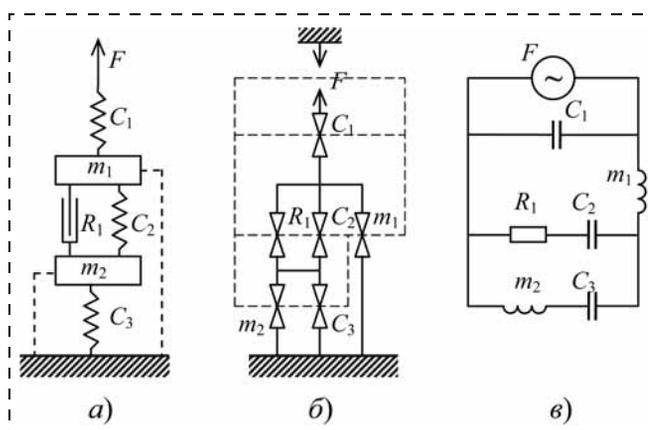


Рис. 2. Этапы построение электрической схемы-аналога:

a — механическая схема; б — инверсия цепи; в — электрическая схема-аналог

зано с тем, что в механических цепях при "параллельном" соединении суммируются силы, а в электрических цепях суммируются токи.

Но часто встречаются системы, которые включают элементы различной физической природы (электрические, механические, тепловые и т. д.). Элементы, отвечающие за взаимодействие и преобразование энергии различных физических систем, дополняют комплект идеальных элементов (см. табл. 3), позволяющих схематично описывать функционирование сложных технических систем.

Обратимые преобразователи физических параметров

Для формального описания процесса преобразования энергии и взаимодействия различных частей физической системы обычно используют систему уравнений следующего типа:

$$\begin{cases} dF_1 = k_{11}dq_1 + k_{12}dq_2 \\ dF_2 = k_{21}dq_1 + k_{22}dq_2 \end{cases} \quad (6)$$

где F_i и q_i — соответственно обобщенные силы и координаты потенциальных частей системы; k_{ii} — собственные обобщенные коэффициенты; k_{ij} — перекрестные коэффициенты взаимодействия. Систему (6) можно назвать уравнением преобразователя. Оно описывает обратимый преобразователь без внутренних источников энергии. Важным свойством уравнения преобразователя является соотношение взаимности [12] для перекрестных коэффициентов:

$$k_{ij} = k_{ji}, \quad (7)$$

которое можно получить из выражения (5) и соотношений Максвелла (равенства смешанных частных производных по полной энергии). Аналогичные соотношения существуют и для преобразования кинетических параметров сложной системы.

Преобразователи одного, как правило, потенциального типа взаимодействия и равных перекрестных коэффициентов названы преобразователями *емкостного* типа [13].

Преобразователи, отражающие взаимодействие потенциальных и кинетических параметров различных физических систем, могут быть описаны следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} dp_1 = \chi_{11}dv_1 + \chi_{12}dq_2 \\ dF_2 = \chi_{21}dv_1 + \chi_{22}dq_2 \end{cases} \quad (8)$$

где F_i и q_i — обобщенные силы и координаты потенциальной части системы, а v_j и p_j — соответственно обобщенные скорости и импульсы кинетической части взаимодействующей системы; χ_{ii} — собственные обобщенные коэффициенты; χ_{ij} — перекрестные коэффициенты взаимодействия. Соотношение взаимности для перекрестных коэффициентов выражения (8)

$$\chi_{ij} = -\chi_{ji}. \quad (9)$$

Такие преобразователи называют преобразователями *индуктивного* типа [13].

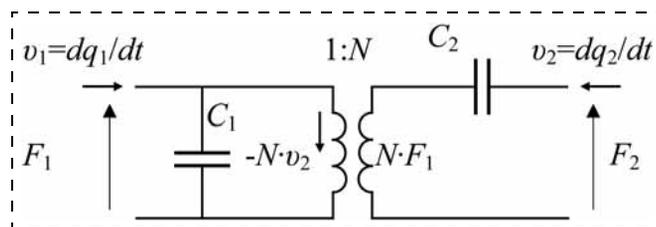


Рис. 3. Эквивалентная схема преобразователя емкостного типа

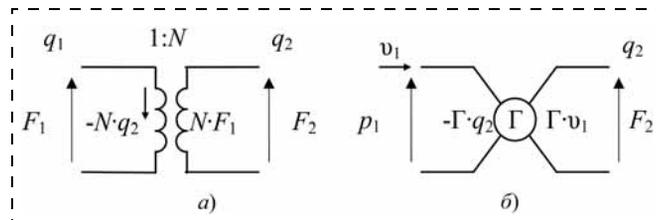


Рис. 4. Схемы-аналоги идеальных преобразователей:

а — емкостного типа; б — индуктивного типа (гиратор)

Система уравнений (6) может быть преобразована к виду

$$\begin{cases} dq_1 = C_1 dF_1 - Ndq_2 \\ dF_2 = NdF_1 + 1/C_2 dq_2 \end{cases} \quad (10)$$

где C_1 , C_2 , N — новые коэффициенты, выражаемые через k_{ij} . При этом перекрестные коэффициенты также равны по абсолютной величине. Данное выражение может быть представлено в виде эквивалентной схемы четырехполюсника (рис. 3), где перекрестные коэффициенты N характеризуют коэффициент преобразования идеального преобразователя (аналога трансформатора).

При этом упрощенное выражение (10) для обобщенных сил и координат характеризует идеальный преобразователь емкостного типа:

$$\begin{cases} dq_1 = -Ndq_2 \\ dF_2 = NdF_1 \end{cases} \quad (11)$$

соответствующий схеме-аналогу (рис. 4, а).

Идеальный преобразователь индуктивного типа (гиратор) для обобщенных потенциалов типа силы и скорости описывается системой уравнений

$$\begin{cases} dp_1 = -\Gamma dq_2 \\ dF_2 = \Gamma dv_1 \end{cases} \quad (12)$$

где коэффициент преобразования Γ (коэффициент гирации) характеризует взаимосвязь обобщенной скорости в первой системе и силы во второй системе и изображается схемой-аналогом (рис. 4, б).

Так, система уравнений преобразователя индуктивного типа может быть представлена аналогичной (8) системой:

$$\begin{cases} dp_1 = m_1 dv_1 - \Gamma dq_2 \\ dF_2 = \Gamma dv_1 + 1/C_2 dq_2 \end{cases} \quad (13)$$

где m_1 , C_2 , Γ — коэффициенты, отражающие свойства взаимодействующих систем. Выражение (13) соответствует эквивалентной схеме четырехполюсника (рис. 5) с преобразователем типа гиратор.

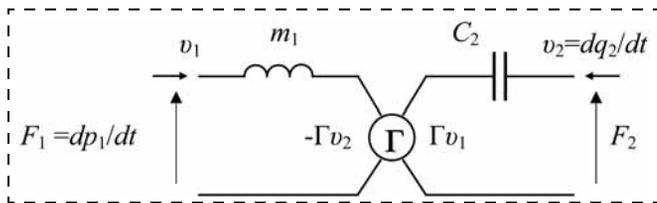


Рис. 5. Эквивалентная схема преобразователя индуктивного типа

Необходимо отметить, что в схемах преобразователей существует правило знаков [14], определяющее сонаправленный характер векторных величин с каждой стороны преобразователя и положительные направления "входящих" в преобразователь потоков. При этом обобщенные силы F_i определяются как внешние силы, действующие на элемент преобразователя.

В общем случае система уравнений преобразователя может быть записана через эквивалентные силы F_{ij} и скорости v_{ij} и комплексные сопротивления Z_{ij} :

$$\begin{cases} dF_1 = Z_{11}dv_1 + Z_{12}dv_2 \\ dF_2 = Z_{21}dv_1 + Z_{22}dv_2 \end{cases} \quad (14)$$

где $Z_{12} = Z_{21}$ для преобразователей емкостного типа, а $Z_{12} = -Z_{21}$ для преобразователей индуктивного типа.

Чисто "резистивные" обратимые преобразователи описывают термоэлектрические, электродиффузионные и другие явления, связанные с преобразованием энергии в диссипативных средах [15]. Схемы-аналоги таких преобразователей, кроме идеальных преобразователей — трансформаторов (11) и гираторов (12), включают резистивные элементы. Таким образом, преобразователь схематично можно представить как четырехполюсник с соответствующими правилами преобразования, но при этом с разных сторон такого четырехполюсника могут оказаться разные по физической природе воздействия (силы). Важно, что даже при нелинейном характере перекрестного взаимодействия будет справедливо соотношение (14), характеризующее преобразование в дифференциальном виде или в так называемых малосигнальных параметрах.

Обобщенными эквивалентными схемами и преобразователями описываются элементы сенсорных микросистем и актюаторов, в которых происходит преобразование энергии и сигнала.

Примеры эквивалентных схем преобразователей

Пример электромеханического преобразователя в виде подвижной емкостной обкладки с номинальной емкостью C , зазором x , напряжением U и зарядом на обкладках q представлен на рис. 6.

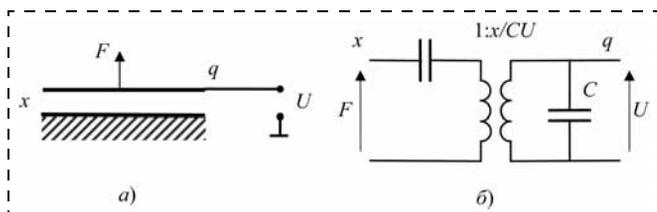


Рис. 6. Электромеханический преобразователь емкостного типа: а — конструкция; б — эквивалентная схема-аналог

Система уравнений, характеризующих такой преобразователь

$$\begin{cases} dF = -\frac{CU^2}{x^2} dx + \frac{CU}{x} dU \\ dq = -\frac{CU}{x} dx + CdU \end{cases} \quad (15)$$

в общем случае нелинейная, но в дифференциальной форме правильно отражает взаимозависимости параметров механической и электрической частей. Система уравнений (15) обладает важным свойством: определитель системы равен 0, что показывает возможность полного преобразования энергии из одной части системы в другую. Эквивалентная схема преобразователя аналогична изображенной на рис. 3. В механической части системы появляется эквивалентный упругий элемент (электрическая пружина), что связано с нелинейным характером преобразования электрической части системы. Механические параметры системы, такие как резонансная частота, добротность, также зависят от состояния электрического плеча четырехполюсника. Это также верно и для электрической части. На этом принципе построены некоторые управляемые компоненты микросистем.

Важный вывод для анализа микросистем, где взаимодействие электрических, механических, тепловых и других, в том числе внешних, факторов оказывается существенным: невозможно правильно анализировать выделенную часть (механическую, электрическую) системы изолированно без учета взаимодействия с действующими подсистемами другой физической природы. Теория преобразователей является адекватным инструментом для такого анализа.

Пример электростатического преобразователя гребенчатого типа, реализующего механическое перемещение по оси y с изменением площади обкладок y и n "зубцов" при постоянном зазоре x , приведен на рис. 7.

Система уравнений такого преобразователя линейна относительно перемещения по оси y и характеризуется отсутствием эквивалентной упругости, связанной с электрической частью системы:

$$\begin{cases} dF = 0dy + \frac{2\varepsilon_0 nhU}{x} dU \\ dq = \frac{2\varepsilon_0 nhU}{x} dy + \frac{2\varepsilon_0 nhy}{x} dU \end{cases}$$

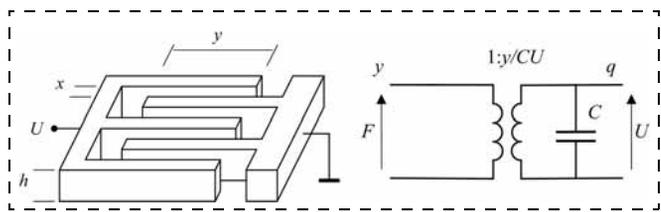


Рис. 7. Электромеханический преобразователь емкостного гребенчатого типа: а — конструкция; б — эквивалентная схема-аналог

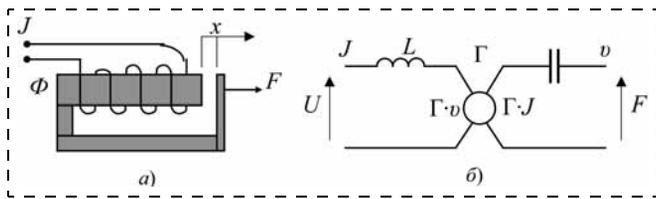


Рис. 8. Электромагнитный преобразователь индуктивного типа: а — конструкция; б — эквивалентная схема-аналог

Представленные выше преобразователи — емкостного типа, связанные преобразованием потенциальных механических и электростатических сил.

Рассмотрим для примера электромагнитный преобразователь индуктивного типа (рис. 8). Подвижная пластинка магнитопровода притягивается к катушке с током J , F — противодействующая сила.

Индуктивность переменного воздушного зазора (магнитная проводимость)

$$L = \mu_0 s/x,$$

где s — площадь сечения сердечника; x — толщина воздушного зазора. Внешняя механическая сила, компенсирующая притяжение пластинки

$$F = Ln^2 J^2 / 2x,$$

где n — число витков обмотки; J — значение протекающего по ним электрического тока. Магнитный поток в зазоре $\Phi = LnJ$. Система уравнений электромагнитного преобразователя индуктивного типа имеет следующий вид:

$$\begin{cases} dF = -\frac{Ln^2 J^2}{x^2} dx + \frac{LnJ}{x} d(nJ), \\ d\Phi = -\frac{LnJ}{x} dx + Ld(nJ). \end{cases}$$

В общем представлении, с учетом $U = n d\Phi/dt$, система уравнений электромагнитного преобразователя будет иметь вид

$$\begin{cases} dF = -\frac{Ln^2 J^2}{j\omega x^2} + dv \frac{Ln^2 J}{x} dJ, \\ dU = -\frac{Ln^2 J}{x} dv + j\omega Ln^2 dJ. \end{cases}$$

Полные эквивалентные схемы конструкций включают все задействованные преобразователи, пассивные элементы системы и действующие источники внешних сил и потоков.

В качестве примера приведено схематичное изображение механических систем с одной и двумя степенями свободы (рис. 9, 10), включая действующие электромеханические приводы.

Представленный подход разработан для анализа систем с сосредоточенными параметрами элементов.

Элементы с распределенными параметрами, у которых значения параметров непрерывным образом меняются в пространстве, при определенных допущениях могут быть сведены к элементам с эффективными (эквивалентными) значениями сосредоточенных параметров [12, 14].

Рассмотрим также для примера мембранный элемент с внутренними механическими напряжениями как систему "мембрана—пластина", где действуют как изгибные деформации, формирующие эффективную жесткость пластины k_n в нормальном направлении, так и поверхностные силы натяжения $\tau = \sigma h$, где σ — механические напряжения в пластине (мембране), h — ее толщина.

Рассмотрим данную систему как преобразователь. С одной стороны преобразователя — механическая система упругой пластины с ее эквивалентными параметрами, с другой стороны — тоже механическая система, но связанная с поверхностным натяжением (см. таблицу аналогий — табл. 1). Система уравнений такого преобразователя может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} dF = k_n dy + 2\pi y dt \\ ds = -2\pi y dy + \frac{1}{k_s} dt \end{cases}, \quad (16)$$

где F — эквивалентная механическая сила, действующая на пластину, $F = P_s n$; k_n — эквивалентная жесткость пластины; s — площадь пластины; k_s — жесткость поверхностного натяжения,

$$k_s = \frac{Eh}{2s(1-\nu)},$$

где E — модуль упругости материала пластины; ν — коэффициент Пуассона.

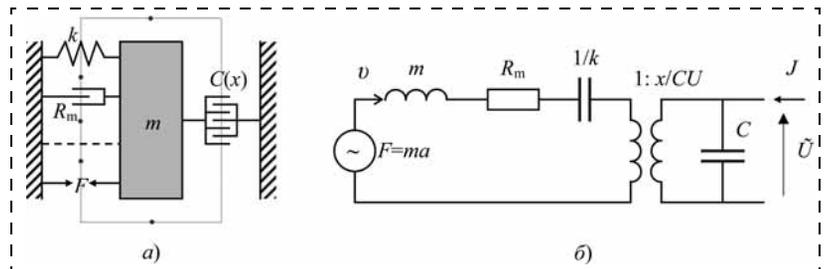


Рис. 9. Схематичное изображение механической системы акселерометра:

а — в виде механической схемы; б — в виде эквивалентной схемы-аналога

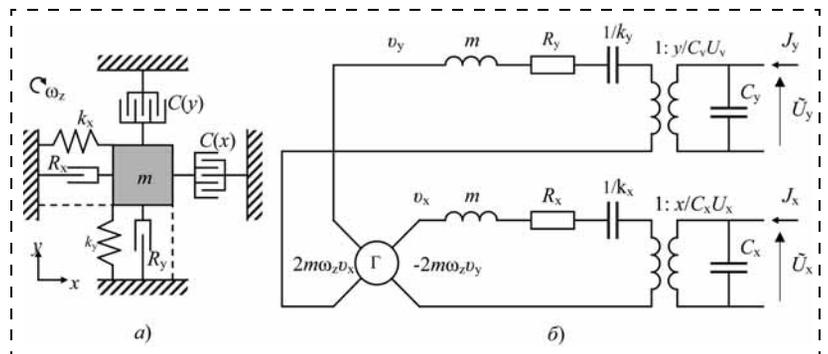


Рис. 10. Схематичное изображение механической системы микрогироскопа:

а — в виде механической схемы; б — в виде эквивалентной схемы-аналога

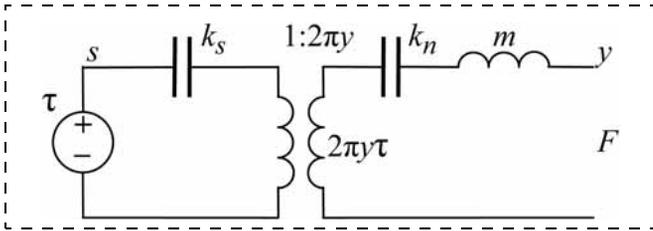


Рис. 11. Схема-аналог мембранного преобразователя с учетом действующего поверхностного натяжения τ

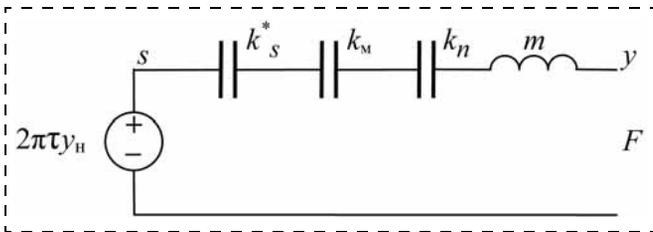


Рис. 12. Приведенная схема-аналог мембранного элемента с учетом действующего поверхностного натяжения τ

Коэффициент преобразования ($2\pi y = -ds/dy$) рассчитан исходя из формы сферического сегмента прогиба мембраны. В соответствии с (16) эквивалентная схема-аналог мембранного преобразователя представлена на рис. 11.

В схеме (рис. 11) учтены также масса и постоянно действующее натяжение в мембране. При преобразовании схемы [12] ("перенос" через преобразователь элементов в правую часть схемы) необходимо учесть особенность коэффициента преобразования, который зависит от величины y . С учетом этого в приведенной схеме (рис. 12) появляется не только постоянный источник $F_0 = 2\pi\tau y_n$, но и связанная с ним "емкость" $1/k_m$, где $k_m = 2\pi\tau$. Приведенная жесткость поверхностного растяжения $k_s^* = k_s(2\pi y)^2$.

При нулевом начальном смещении центра мембраны $y_n = 0$ в статическом режиме получим уравнение, определяемое суммарной жесткостью, которая равна сумме отдельных жесткостей (обратных емкостей):

$$F = k_n y + k_m y + k_s^* y.$$

Преобразовав полученное выражение к давлению (поделив на эффективное значение площади s_m), получим уравнение

$$P = 5,3 \frac{Eh^3}{a^4(1-\nu^2)} y_0 + 4 \frac{\sigma h}{a^2} y_0 + 4 \frac{Eh}{a^4(1-\nu)} y_0^3, \quad (17)$$

где a — радиус мембраны; y_0 — максимальный прогиб в ее центре, а постоянные коэффициенты незначительно зависят от формы прогиба.

При этом первое слагаемое в выражении (17) связано с изгибными деформациями, второе слагаемое определяет упругость мембраны и связано с наличием механических напряжений в ней, третье слагаемое связано с растяжением поверхности эле-

мента и нелинейно зависит от прогиба y_0 . В зависимости от геометрических размеров, внутренних механических напряжений и значений прогибов могут преобладать различные слагаемые в уравнении и, соответственно, отличаться режимы работы микромеханического элемента.

Заключение

Приведенные примеры использования преобразователей и эквивалентных схем наглядно показывают возможности метода аналогий при анализе работы сложных систем, учитывающих взаимодействие элементов различной физической природы. Особенно это важно, как показывает практика, для микросистем, связанных с преобразованием энергии, а также при условии малых размеров элементов, когда становятся существенными внешние физические воздействия окружающей среды, сопутствующие поля и потоки, которыми ранее на макроуровне пренебрегали.

Представление эквивалентных схем в виде электрических аналогов позволяет использовать интуицию и навыки схемотехнического анализа специалистов электротехнического (микроэлектронного) профиля, специализирующихся в настоящее время в направлении микросистемной техники.

Множество учитываемых воздействий находит отражение в полной эквивалентной схеме микросистемы и позволяет аналитически оценить степень влияния сопутствующих малых воздействий (температуры, давления, натяжения и т. д.), границы допущений в расчетных моделях элементов, прямое и обратное влияние элементов разной физической природы и принципов функционирования. Аналитическое представление результатов такого моделирования (расчета схемы) позволяет проводить целенаправленную оптимизацию конструкции и параметров микросистемы. Проектирование элементов микросистемы может быть достигнуто путем решения обратной задачи с учетом полученных аналитических оценок и предъявляемых технических требований.

Необходимо отметить, что определенные сложности представляет такого рода анализ для распределенных систем и необратимых преобразователей. Но в целом данный подход представляется продуктивным для расчета, анализа работы и проектирования микросистем с элементами, преобразователями и внешними воздействиями различной физической природы.

Работа выполнена в рамках обеспечения ОКР "2012-2.3-16-523-0011-002", выполняемой ФГУП "НПП "Исток" по договору от 22.06.2012 № 16.523.11.3019 по ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2007—2013 годы", а также при поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации по теме "Физико-технологические основы формирования высокочувствительных нано- и микромембранных элементов", соглашение № 14.В37.21.0082, 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. Климов Д. М., Лучинин В. В., Васильев А. А., Мальцев П. П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 3—6.
2. Тетельбаум И. М., Тетельбаум Я. И. Модели прямой аналогии. М.: Наука: 1979. 384 с.
3. Амеличев В. В., Вернер В. Д., Ильков А. В. МЭМС-микрофон. Выбор материалов, конструкции и технологии. Ч. 1: Электромеханический чувствительный элемент // Нано-и микросистемная техника. 2007. № 2. С. 53—62.
4. Денискин Ю. Д., Некрасова И. Ф. Применение метода моделирования для решения задач теплопроводности в электронных приборах. М.: Энергия, 1969.
5. Корляков А. В., Лучинин В. В., Никитин И. В. Применение SiC-микронагревательных систем в микросистемной технике // Микросистемная техника. 2000. № 2. С. 27—31.

6. Васильев А. А., Корляков А. В., Никитин И. В. Тепло-вые микросистемы на основе карбида кремния // Петербургский журнал электроники. 2000. № 3—4. С. 92—101.
7. Pedersen M., Olthuis W., Bergveld P. On themechanical behaviour of thin perforated plates and their application in silicon condenser microphones // Sensors and Actuators A. 1996. N 54. P. 499—504.
8. Алейников А. Ф., Гридчин В. А., Цапенко М. П. Датчики (перспективные направления развития): учеб. пособие / Под ред. проф. М. П. Цапенко. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. 176 с.
9. Корляков А. В. Физико-технологические основы формирования базовых элементов микросистемной техники. СПб.: Технолит, 2008. 126 с.
10. Петров Н., Бранков Й. Современные проблемы термодинамики/ Пер. с болг. М.: Мир, 1986. 288 с.
11. Вариационные принципы механики: Сб. ст. / Под ред. Л. С. Полака. М.: Физматлит, 1959. 932 с.
12. Лепендин Л. Ф. Акустика. М.: Высш. шк., 1978.
13. Вахитов Я. Ш. Теоретические основы электроакустики. Л.: ЛИКИ, 1970.
14. Фурдуев В. В. Электроакустика. М.-Л.: Гостехиздат, 1948.
15. Базаров И. П., Геворкян Э. В., Николаев П. Н. Неравновесная термодинамика и физическая кинетика. М.: Изд-во МГУ, 1989. 240 с.

УДК 621.395:382

А. А. Ветров, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.,
e-mail: a_vetrov@mail.ru,
А. В. Корляков, д-р техн. наук, директор,
А. Н. Сергушичев, канд. техн. наук, зам. директора,
e-mail: san1958@mail.ru,
К. А. Сергушичев, инженер,
e-mail: kirjankirjan@gmail.com,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет "ЛЭТИ"
(СПбГЭТУ)

РАЊ×ÀÒ È ÈÇÌ ÀРАЀ ÈВ
ÀÈÍ ÀÌ È×ЃЃÈÈÕ Ì ÀРАЀ ÀОРЀ À
Í ÀÍ Î РАÇÌ ÀРЀ ÛÕ ÈÎ ÈЃЃЃÍ ÈÈ
Ì ÈЕРЀ Ì ÀÌ ÀРАЀ Í ÛÕ ÝÈÀÌ ÀÍ ÒÎ Æ

Поступила в редакцию 20.09.2012

Приведены математическая модель и результаты расчетов параметров микромембранных элементов, изготавливаемых с применением технологий микросистемной техники. Разработана экспериментальная установка на основе волоконно-оптического торцевого интерферометра для высокоточных бесконтактных измерений чувствительности микромембранных элементов. Предложена методика и измерены частотные зависимости чувствительности микромембранных элементов.

Ключевые слова: микромембранный элемент, математическая модель, чувствительность, резонансная частота, оптико-электронная измерительная система, волоконно-оптический интерферометр

Введение

Современный этап развития общества характеризуется значительным расширением номенклатуры технических средств и сложных технических комплексов самого различного назначения. Обеспечение их надежности и безопасного функционирования невозможно без эффективных систем технического мониторинга, которые требуют увеличения числа контролируемых параметров и, как следствие, применения большого числа датчиков, обеспечивающих регистрацию сверхслабых механических колебаний с амплитудой до 1 нм и менее. Это приводит к необходимости кардинального уменьшения размеров датчиков при сохранении их высокой чувствительности и идентичности параметров, особенно при объединении их в мульти-сенсорные информационные системы.

Основное направление в решении этой проблемы состоит в создании ключевых элементов датчиков, таких как микромембранный элемент (МЭ), в массовых количествах по одной технологии, в частности, с применением технологии микросистемной техники (МСТ). Это диктует необходимость разработки методов расчета параметров МЭ, а также технических средств и методов их контроля.

Сложность контроля параметров МЭ обусловлена рядом особенностей:

- микро- и наноразмерные геометрические параметры и их изменения при тестовых воздействиях;
- высокая чувствительность в сочетании с ограниченной механической прочностью;

- высокая подверженность собственных параметров МЭ влиянию внешних факторов.

Эти обстоятельства делают проблематичным непосредственное применение традиционных средств и методов контроля технических параметров МЭ и требуют новых подходов к их разработке, что обуславливает актуальность и цель данной работы.

Математическая модель микромембранного элемента и расчет его параметров

Термин *микромембрана* в МСТ часто определяют как "компонент микросистемы в виде тонкой пленки или пластины, закрепленный по контуру и работающий на прогиб или вибрацию под воздействием управляющего сигнала" [1]. В теоретической механике мембрана определяется как "материальная (закрепленная по контуру) поверхность, не имеющая упругости формы" [2], т. е. в данном элементе можно пренебречь деформациями изгиба.

При условии малых деформаций уравнение, определяющее прогиб y круглой мембраны под действием нормально равномерно распределенного по площади давления p , имеет вид [2]

$$y(r) = \frac{pa^2}{4\sigma h} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right), \quad (1)$$

где a — радиус мембраны; r — текущая координата (радиус); h — толщина мембраны; σ — механические напряжения в мембране.

Чувствительность МЭ S_M может быть определена из выражения (1) как отношение прогиба центральной части мембраны к действующему на одну из ее сторон давлению:

$$S_M = \frac{y(0)}{p} = \frac{a^2}{4\sigma h}. \quad (2)$$

Для повышения чувствительности мембранных структур к воздействию внешнего давления необходимо уменьшение толщины, снижение механических напряжений и увеличение размеров МЭ. При достижении определенных соотношений в этих параметрах неизбежно приходим к определяющему влиянию остаточных механических напряжений на чувствительность мембранной структуры.

Кардинальное снижение суммарных механических напряжений в микромембране на основе Si_3N_4 , изготовленной с применением технологий МСТ, возможно с использованием гофрированной структуры. Формирование структуры гофров по периферии гибкой части мембраны (рис. 1) обеспечивает резкое снижение уровня остаточных напряжений в центральной области мембраны за счет изгибной деформации пленки в области гофра.

Для релаксированной центральной области мембраны после деформации гофра значения ос-

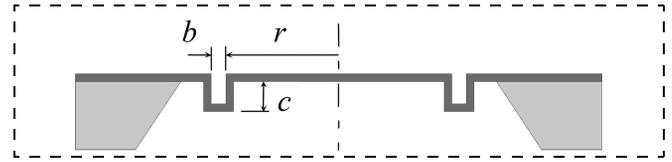


Рис. 1. Геометрические параметры гофрированной мембраны с одним гофром

таточных механических напряжений σ_1 определяются соотношением

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_0}{1 + k_g}. \quad (3)$$

Здесь σ_0 — исходное напряжения для плоской мембраны; k_g — коэффициент "разгрузки" мембраны под "действием" одного гофра:

$$k_g = 8 \frac{c^3}{h^2 r} \left(1 + \frac{3}{2} \frac{b}{c}\right), \quad (4)$$

где r — радиус гофра; b — ширина гофра; c — глубина гофра; h — толщина мембраны. При $k_g \gg 1$ получим $\sigma_1 = \sigma_0/k_g$.

Влияние второго и последующего гофров в отношении разгрузки центральной части мембраны оказывается таким же, как первого гофра по отношению к исходной плоской мембране: $\sigma_n = \sigma_{n-1}/k_g$. В итоге получим выражение для механических напряжений σ_n в центральной части мембраны с n гофрами:

$$\sigma_n = \sigma_0 / (1 + k_g)^n. \quad (5)$$

Это соотношение является оценкой, которая позволяет определить влияние геометрических параметров гофрированной структуры на изменение механических напряжений в ее центре.

В гофрированной мембране с биморфной центральной областью (с металлизированной областью) остаточный уровень механических напряжений определяется наличием в центральной части мембраны локальной области металлизации (рис. 2).

Проведенная оценка влияния биморфной композиции, локализованной в центральной части мембраны, показывает, что при остаточных напряжениях в центральной биморфной композиции не достигается полной релаксации центра мембранной области. При этом структура внутреннего гофра при релаксации напряжений в нем становится

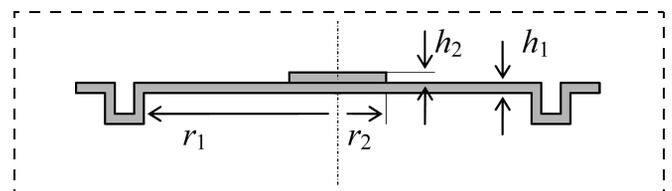


Рис. 2. Геометрические параметры центральной области гофрированной мембраны

достаточно жесткой, так как дальнейшее уменьшение радиуса r может происходить за счет сжатия его развитой окружности.

Оценка предельного значения радиальных остаточных механических напряжений σ_r в центральной области мембраны с учетом радиальной упругости внутреннего гофра определяется выражением

$$\sigma_r = \frac{H_1 h_2 r_2 (\varepsilon_{02} - \varepsilon_{01})}{r_1^2 (h_1/E_2 + h_2/E_1)}, \quad (6)$$

где ε_{01} , ε_{02} — начальные деформации первого (мембрана) и второго (металл) слоев, определяемые через их начальные механические напряжения: $\varepsilon_{0i} = \sigma_{0i}/E_i$; E_1 , E_2 — модули упругости материала слоев; h_1 , h_2 — соответствующие толщины слоев; r_1 — радиус внутреннего гофра; r_2 — радиус биморфной композиции в центральной части мембраны; H_1 — параметр, характеризующий упругость внутреннего гофра: $H_1 \approx 0,5(r_1 h_1)^{1/2}$.

Выражение (6) определяет предельно достижимое снижение механических напряжений в центральной части гофрированной мембранной структуры при наличии там определенной локализованной композиции слоев (металл на нитриде кремния). Наилучшие результаты достигаются при минимальной разнице начальных деформаций первого и второго слоев, что также определяет их пропорциональную релаксацию (синхронную релаксацию начальных деформаций).

Чувствительность гофрированного МЭ S_M может быть оценена из выражения (2), при этом для гофрированных структур в нем необходимо принять: $a = r_1$; $h = h_1$ и $\sigma = \sigma_r$.

Для расчета динамических параметров мембран с учетом акустических параметров, а также механических свойств МЭ строятся эквивалентные схемы акустомеханических преобразователей, учитывающие эквивалентные чувствительность и массу мембраны, а также чувствительности подмембранных воздушных объемов [2].

С повышением гибкости мембран и воздушного объема чувствительность преобразователя повышается, но это приводит к снижению резонансной частоты. При этом результирующая (эквивалентная) чувствительность преобразователя

$$S_e = \frac{S_M S_V}{S_M + S_V}. \quad (7)$$

Здесь S_M — чувствительность МЭ, определяемая выражением (2); S_V — чувствительность (упругость) подмембранного воздушного объема V , определяемая выражением

$$S_V = \frac{V}{\gamma p_V s}, \quad (8)$$

где s — эквивалентная площадь мембраны; p_V — давление в подмембранном объеме; $\gamma = 1,4$ — показатель политропического процесса.

Расчетные параметры микромембранных элементов

Тип структуры	Радиус внутреннего гофра r_1 , мм	Радиус металлизации r_2 , мм	Чувствительность S_e , нм/Па	Резонансная частота f_0 , кГц
1	1,2	0,5	6130	1,46
2	0,7	0,25	463	6,3
3	0,5	0,25	290	8,6
4	0,3	0,2	61	21

Основная резонансная частота f_0 определяется эквивалентной чувствительностью и суммарной массой $m = m_1 + m_{s1}$, включающей эквивалентную массу мембраны m_1 и присоединенную массу воздуха m_{s1} [2]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{S_e m}}. \quad (9)$$

На основе разработанных моделей МЭ был проведен расчет основных характеристик гофрированных мембранных структур толщиной 300 нм SiN, основные геометрические параметры которых приведены в таблице. В расчет были заложены физические характеристики мембраны, окружающей среды, известные и измеренные механические параметры пленок нитрида кремния и металла, а также ориентировочные значения толщин и размеров, которые оптимизировались исходя из требований к чувствительности МЭ и технологичности изготовления.

Основные результаты расчетов приведены в таблице для больших значений подмембранных объемов и отражают, в большей степени, собственные характеристики МЭ ($S_e \approx S_M$).

Экспериментальная установка для измерения параметров микромембранных элементов

Общая функциональная схема и принцип работы экспериментальной установки. Исходя из особенностей МЭ (микро- и наноразмерные геометрические параметры и их изменения при тестовых воздействиях; высокая чувствительность в сочетании с низкой механической прочностью; высокая подверженность собственным параметрам МЭ влиянию внешних факторов) экспериментальная установка для контроля параметров МЭ должна обеспечивать бесконтактный метод и высокую точность измерения перемещения (прогиба) мембраны при тестовых воздействиях, формирование и контроль параметров тестовых воздействий на МЭ, обработку результатов измерений.

Общая функциональная схема экспериментальной измерительной установки приведена на рис. 3. Ее основу составляет оптико-электронная измерительная система 3 на основе волоконно-оптического торцевого интерферометра [3], которая обеспечивает измерение прогиба мембраны под действием внешнего давления.

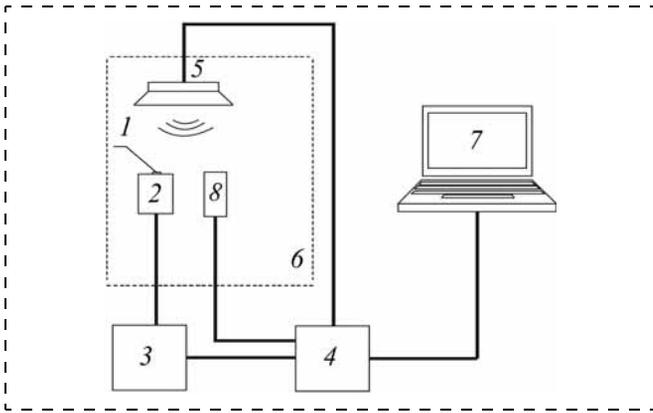


Рис. 3. Функциональная схема экспериментальной установки:
 1 — микромембранный элемент; 2 — оптико-механический модуль; 3 — оптико-электронная измерительная система; 4 — анализатор спектра ZET 017-U4; 5 — акустическая система; 6 — звукозаглушенная камера; 7 — персональный компьютер; 8 — измерительный (эталонный) микрофон

Сопряжение оптико-электронной измерительной системы с тестируемым МЭ 1 проводится с помощью оптико-механического модуля (ОММ) 2, имеющего специальную конструкцию для установки определенным образом МЭ и оптических волокон.

Многофункциональный анализатор спектра ZET 017-U4 предназначен для измерения параметров спектральных составляющих сигналов и генерации электрических сигналов с нормированными метрологическими параметрами. Встроенный усилитель анализатора позволяет подключать эталонный микрофон стандарта ICP (IEPE) без использования промежуточных усилителей. Управление анализатором спектра осуществляется с помощью персонального компьютера 7 с установленным специализированным программным обеспечением ZETLab.

Для формирования тестовых воздействий на МЭ в установке использовалась акустическая система 5 в составе звукозаглушенной камеры 6 ("Брюль и Кьер", тип 4232), обеспечивающая достаточно равномерную амплитудно-частотную характеристику тестового воздействия в заданной полосе частот. Функцию задающего генератора тестовых сигналов (широкополосного сигнала типа "белый шум") выполняют персональный компьютер 7 и анализатор спектра ZET 017-U4.

Контроль амплитуды и частоты тестовых воздействий на МЭ обеспечивали эталонный микрофон 8, расположенный в звукозаглушенной камере рядом с контролируемым МЭ, и анализатор спектра 4. В качестве эталонного использовался микрофон MPA201 с паспортной чувствительностью $S_3 = 48,4$ мВ/Па.

Оптико-электронная измерительная система на основе волоконно-оптического торцевого интерферометра. Система измерения прогиба мембраны построена на основе волоконно-оптического торцевого интерферометра (ВОТИ) [3]. В таком интерферометре одну отражающую поверхность оп-

тического резонатора образует полированный торец оптического волокна, а другую — зеркальная отражающая поверхность микромембранного элемента.

Принцип действия ВОТИ иллюстрирует рис. 4. Излучение лазера 1 вводится в одномодовое оптическое волокно 2 и через разветвитель 3 передается на оптоволокно 4. При этом часть излучения отражается от торца оптоволокна 4, а другая его часть высвечивается в воздух, отражается от мембраны 5 и возвращается обратно в оптоволокно 4. В связи с тем что установочное значение расстояния l от торца оптоволокна до мембраны не превышает половины длины когерентности излучения лазера, излучение, отраженное от торца оптоволокна, интерферирует с излучением, отраженным от мембраны, и на фотодетекторе 6 регистрируется мощность излучения, изменяющаяся в зависимости от расстояния l между торцом волокна и мембраной.

В общем случае результат интерференции представляет собой суперпозицию нескольких волн, возникающих в результате многократных переотражений светового пучка между торцом волокна и мембраной. Однако на достаточном удалении мембраны от торца оптоволокна (при $l > l_{гр} = 2,5l_0$, где $l_0 = 2\pi n \omega^2 / \lambda$, где n — показатель преломления; λ — длина волны излучения лазера; ω — радиус поля оптической моды в волокне) с высокой точностью можно принимать в расчет только первое отражение [5]. Для стандартного кварцевого одномодового волокна при $\lambda = 1,55$ мкм, $n = 1,468$ и $\omega = 5,2$ мкм параметр $l_0 \approx 80$ мкм и $l_{гр} \approx 200$ мкм.

В этом случае для излучения с высокой когерентностью мощность излучения на фотодетекторе можно представить соотношением [4]

$$P(l) = P_1 + P_2(l) + \sqrt{P_1 P_2(l)} \cos(4\pi l / \lambda),$$

где P_1 и $P_2(l)$ — мощности излучений, отраженного от торца волокна и возвращенного в волокно после отражения от зеркала соответственно. На рис. 5 приведена зависимость нормированной мощности излучения на фотодетекторе $P_n(l)$, называемая характеристикой преобразования интерферометра, для достаточно узкого интервала изменения l , когда медленно меняющаяся составляющая $P_2(l) \approx \text{const}$.

Одним из основных параметров измерительных систем является отношение сигнал/шум, так как именно оно определяет минимальное регистрируемое изменение измеряемой величины в данном случае перемещения.

Уровень полезного сигнала системы P_c определяется перемещением мембраны $\delta l < \lambda/4\pi$ и чувстви-

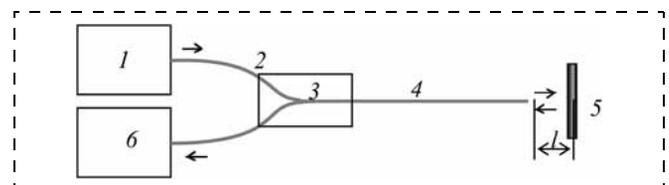


Рис. 4. Схема построения ВОТИ

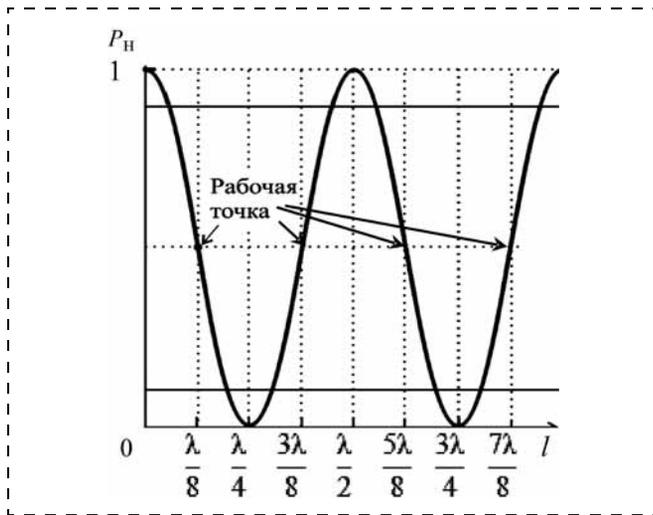


Рис. 5. Характеристика преобразования интерферометра

тельностью ВОТИ к перемещению, которая может быть найдена через производную соотношения (9):

$$P_c = \frac{dP(l)}{dl} \delta l.$$

Учитывая, что мощность $P_2(l)$ по сравнению с интерференционной составляющей $\cos(4\pi l/\lambda)$ изменяется медленно, с достаточно высокой точностью можно полагать, что

$$dP(l)/dl \approx 2\sqrt{P_1 P_2(l)} (4\pi/\lambda) \sin(4\pi l/\lambda). \quad (10)$$

Отсюда нетрудно заметить, что на некоторой совокупности оптимальных расстояний

$$\lambda_{\text{опт}} = \lambda/8(1 + 4m), \quad (11)$$

где m — целое число, чувствительность ВОТИ достигает максимальных значений

$$dP(l)/dl = 2\sqrt{P_1 P_2(l)} (4\pi/\lambda) = S_H 4\sqrt{P_1 P_2(l)}, \quad (12)$$

где

$$S_H = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (13)$$

представляет собой нормированную к размаху интерференции $4\sqrt{P_1 P_2(l)}$ чувствительность, которая определяется только длиной волны излучения и не зависит от мощности. При выполнении условия (11) рабочая точка интерферометра находится в оптимальном положении — на середине одного из монотонных участков характеристики преобразования (рис. 5), где чувствительность системы максимальна и составляет для $\lambda = 1,55$ мкм величину $S_H \approx 4,05$ мкм⁻¹.

Интегральный уровень собственных шумов $P_{\text{ш}}$ измерительной системы на основе ВОТИ опреде-

ляется главным образом мощностью оптического излучения на входе фотодетектора [4], определяемой соотношением (9).

С учетом сделанных замечаний отношение сигнал/шум измерительной системы с точностью до постоянного множителя K , который назовем *уровнем собственных шумов*, нормированным относительно размаха интерференции, можно представить выражением

$$N = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = \frac{1}{K} \frac{2\sqrt{P_1 P_2(l)} S_H \sin(4\pi l/\lambda) \delta l}{P_1 + P_2(l) + 2\sqrt{P_1 P_2(l)} \cos(4\pi l/\lambda)}.$$

С учетом формул (12) и (13) для оптимального положения рабочей точки это выражение преобразуется к виду

$$N = \frac{1}{K} \frac{2\sqrt{P_1 P_2(l)}}{P_1 + P_2(l)} S_H \delta l = \frac{1}{K} V(l) S_H \delta l, \quad (14)$$

где

$$V(l) = \frac{2\sqrt{P_1 P_2(l)}}{P_1 + P_2(l)} = \frac{P_{\text{max}}(l) - P_{\text{min}}(l)}{P_{\text{max}}(l) + P_{\text{min}}(l)} \quad (15)$$

представляет собой известную формулу для видности (контраста) интерференционной картины, где P_{max} и P_{min} — максимальная и минимальная мощности излучения соответственно, определяемые из формул (9) при $\cos(4\pi l/\lambda) = \pm 1$.

Таким образом, отношение сигнал/шум системы определяется длиной волны излучения λ и контрастом интерференционной картины $V(l)$, который зависит от расстояния l между торцом оптоволокну и мембраной. Несложно показать [4], что максимальный контраст $V(l) = 1$ достигается при $P_1 = P_2(l)$ на некотором номинальном расстоянии:

$$l_{\text{ном}} = l_0 \sqrt{\frac{R_1(1-R)^2 - R}{R}}, \quad (16)$$

где $l_0 = 2\pi n \omega^2/\lambda$, а R_1 и R — коэффициенты отражения мембраны и торца волокна соответственно.

Для кварцевого одномодового волокна френелевский коэффициент отражения границы раздела кварц—воздух $R = 0,036$. В этом случае при $\lambda = 1,55$ мкм и $R_1 = 1$ расчетное значение номинального расстояния от торца оптоволокну до зеркала составляет $l_{\text{ном}} \approx 410$ мкм. При этом зона с контрастом по уровню 0,9 и более составляет достаточно большой диапазон расстояний — от 200 до 640 мкм [5]. Именно в этом диапазоне расстояний необходимо устанавливать торец оптоволокну относительно мембраны при проведении измерений ее чувствительности.

С учетом этого при настройке системы для достижения в ней наилучшего отношения сигнал/шум

нужно приложить к мембране достаточное тестовое воздействие и путем медленного перемещения МЭ добиваться наилучшего контраста выходного напряжения.

Из соотношения (14) при $N = 1$ и $V(l) = 1$ определим минимальное регистрируемое перемещение мембраны, обусловленное уровнем собственных шумов системы:

$$\delta l = \frac{K}{S_H}. \quad (17)$$

Экспериментальные измерения нормированного уровня собственных шумов для $\lambda = 1,55$ мкм составили $K \approx 10^{-4}$. В этом случае расчетная оценка пороговой чувствительности системы к перемещению МЭ показывает значение $\delta l \approx 0,025$ нм [5].

Таким образом, основными достоинствами системы на основе ВОТИ являются высокая точность измерений, а также относительная простота технической реализации и предварительной настройки. Проблема, присущая всем интерферометрическим системам, которая связана с самопроизвольным уходом рабочей точки из оптимального положения под действием паразитных внешних факторов, в измерительной установке решена на основе автоматического регулирования положения рабочей точки путем перестройки длины волны излучения лазера [6].

Оптико-механический модуль (ОММ). ОММ необходим, прежде всего, для установки МЭ и оптоволокну на номинальном расстоянии $l_{\text{ном}}$ от МЭ в соответствии с выражением (16). Кроме того, конструкция ОММ должна обеспечивать минимальное паразитное влияние подмембранного воздушного объема и изменения внешнего атмосферного давления на результаты измерений параметров МЭ.

Будем полагать, что влиянием подмембранного объема на собственную чувствительность МЭ S_M можно пренебречь, если оно составляет не более 10 % от измеренной эквивалентной чувствительности согласно (7). В этом случае примем $S_e = 0,9S_M$ и из соотношения (7) получим $S_V = 10S_M$. Тогда из выражения (8) определим необходимый подмембранный объем для измерения чувствительности МЭ радиусом r_1 :

$$V = 10S_M p_V / \pi r_1^2. \quad (18)$$

В конструкции ОММ предусмотрен специальный канал для выравнивания внешнего атмосферного давления и давления в подмембранном объеме, поэтому можно принять $p_V \approx 10^5$ Па.

Учитывая, что расчетная максимальная чувствительность МЭ с большим радиусом $r_1 = 1,2$ мм составила $S_M \approx 6,1$ мкм/Па, из (18) получим минимальное значение подмембранного объема ОММ $V = 38\,600$ мм³. Конструкция ОММ, удовлетворяющего этому требованию, представлена на рис. 6.

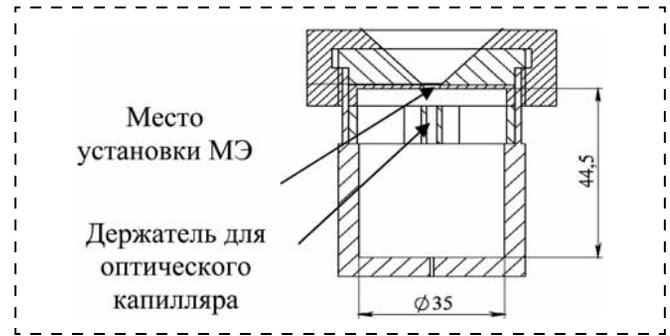


Рис. 6. Конструкция ОММ

МЭ устанавливается в ОММ с помощью специального герметика, что, во-первых, обеспечивает минимальные паразитные механические воздействия на МЭ, а во-вторых, позволяет после измерений провести неразрушающий демонтаж МЭ. Оптоволокно к МЭ подводится через прецизионный оптический капилляр, который устанавливается в специальный держатель. В такой конструкции удастся достаточно просто устанавливать вручную номинальное расстояние $l_{\text{ном}}$ между торцом оптоволокну и мембраной.

Методика и экспериментальные результаты контроля параметров микромембранных элементов

Методика измерения частотной зависимости чувствительности МЭ состоит в следующем.

Вначале на МЭ подается значительное звуковое давление, при котором колебания мембраны существенно превышают интервал монотонности статической характеристики преобразования интерферометра (режим "перемодуляции"). По осциллограмме выходного сигнала оптико-электронной измерительной системы определяются верхняя U_{max} и нижняя U_{min} границы напряжения, соответствующие P_{max} и P_{min} . Разность этих напряжений определяет размах статической характеристики преобразования интерферометра:

$$\Delta U = (U_{\text{max}} - U_{\text{min}})/2. \quad (19)$$

Затем на МЭ подается широкополосный звуковой сигнал ("белый шум"), и на осциллографе наблюдается переменная составляющая выходного напряжения U - интерферометра. Для снижения погрешности измерений чувствительности мембраны, обусловленной нелинейностью характеристики преобразования интерферометра, мощность звукового сигнала подбирается так, чтобы $U/\Delta U \lesssim 0,25$. В этом случае погрешность из-за нелинейности преобразования составляет менее 1 %.

При воздействии тестового звукового сигнала типа "белый шум" с помощью анализатора спектра проводится измерение частотных составляющих напряжения выходных сигналов оптико-электрон-

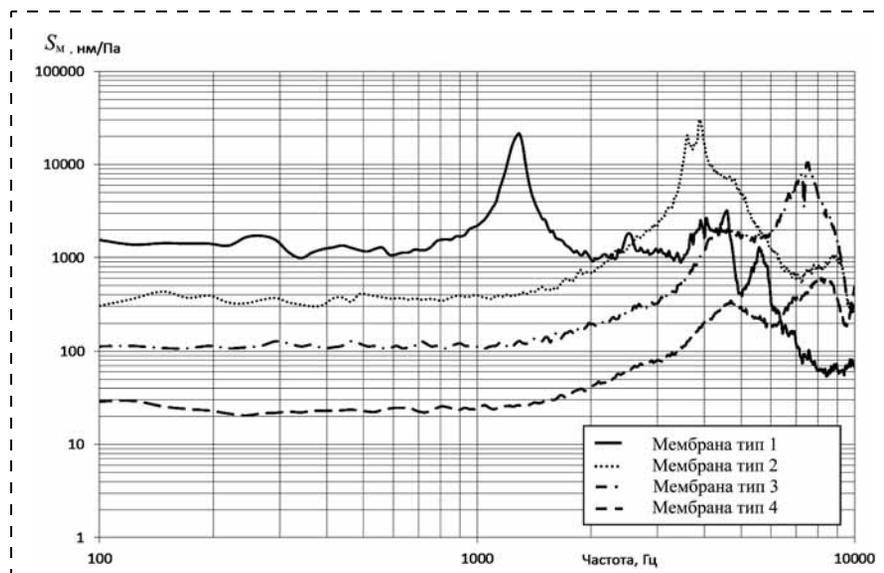


Рис. 7. Частотная зависимость чувствительности микромембранных элементов различных типов, изготовленных в ЦМИД СПбГЭТУ

ной измерительной системы U_{\sim} и эталонного микрофона $U_{\text{э}}$. По результатам измерения напряжения $U_{\text{э}}$ на выходе эталонного микрофона и его паспортной чувствительности $S_{\text{э}}$ определяется частотная зависимость действующего значения звукового давления p , создаваемого акустической системой в области контролируемого МЭ:

$$p_i = \frac{U_{\text{э}i}}{S_{\text{э}}}, \quad (20)$$

где i — номер отсчета по частоте на анализаторе спектра.

По результатам измерения переменного напряжения U_{\sim} на выходе измерительной системы определяется частотная зависимость чувствительности МЭ к давлению:

$$S_{Mi} = \frac{U_{\sim i}}{\Delta U} \frac{1}{S_{H} p_i},$$

где S_{H} — нормированная чувствительность оптико-электронной измерительной системы, определяемая (13).

Экспериментальные результаты контроля параметров МЭ различных типов (см. таблицу); изготовленных в ЦМИД СПбГЭТУ, приведены на рис. 7.

Оценивая полученные расчетные и экспериментальные результаты, следует отметить их определенное совпадение, что в целом свидетельствует об адекватности принятой математической модели и методики измерений параметров МЭ. Вместе с тем, в ряде случаев эти результаты существенно различаются, что доказывает необходимость уточнения физических параметров в расчетной модели, а также дальнейшего совершенствования средств и

методов измерений параметров микромембранных элементов.

Заключение

Предложенная математическая модель МЭ, изготавливаемых с применением технологий МСТ, имеющих плоскую и гофрированную структуру с металлизированной областью в центре МЭ, позволяет проводить расчеты чувствительности и собственной резонансной частоты МЭ различной конструкции.

На основе торцевого волоконно-оптического интерферометра разработана экспериментальная установка для проведения высокоточных (до 0,025 нм) бесконтактных измерений частотной зависимости смещения МЭ под действием

звукового давления. Разработана методика и проведены экспериментальные исследования частотной зависимости чувствительности гофрированных МЭ различной конструкции. Измеренные усредненные значения собственной резонансной частоты изготовленных МЭ составили от 1,2 до 11 кГц, а чувствительности — от 1500 до 30 нм/Па соответственно.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации по теме "Физико-технологические основы формирования высокочувствительных нано- и микромембранных элементов", соглашение № 14.В37.21.0082, 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. Вернер В. Д., Коломенская Н. Г., Лучинин В. В., Телец В. А. и др. Изделия микросистемной техники — основные понятия и термины // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 12.
2. Лепендин Л. Ф. Акустика. М.: Высшая школа, 1978.
3. Ветров А. А., Комиссаров С. С., Сергушичев А. Н. Волоконно-оптический торцевой интерферометр — универсальный элемент построения датчиков смещения // Оптический журнал. 2008. Т. 75, № 1. С. 3—6.
4. Ветров А. А., Сергушичев А. Н., Ширшов А. А. Волоконно-оптические виброакустические датчики. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2010. 168 с.
5. Ветров А. А., Комиссаров С. С., Сергушичев А. Н., Туркин М. В., Ширшов А. А. Анализ и оптимизация параметров интерференционного волоконно-оптического микрофона // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 6. С. 31—38.
6. Ветров А. А., Комиссаров С. С., Сергушичев А. Н. Адаптивная система управления интерференционным волоконно-оптическим датчиком // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 1. С. 29—37.

УДК 621.3.049.7

О. С. Бохов, канд. техн. наук, нач. лаб.,
А. М. Спивак, электроник 1 кат.,
Ю. А. Орехов, нач. лаб.,
 Санкт-Петербургский государственный
 электротехнический университет "ЛЭТИ"
 им. В. И. Ульянова (Ленина),
 e-mail: boshov@mail.ru

Ì È Í ÈÀÒÐÍ ÒÀ
 Í ÀÀÈÃÀÒÈÊ Í Í Î -
 Î ÒÈÁÍ ÒÀÒÈÊ Í Í ÒÀ
 È Í ÒÀÁÒÈÊÍ ÀÁÍ Í ÒÀ Ì Î ÒÈÈ
 Í À Î Ñ Í Î ÀÀ
 Ì ÈÈÒÍ ÒÈÀÈÒÒÍ Ì ÀÒÁÍ È × ÒÈÈÈÒ
 ÑÈÑÒÈÁÍ

Поступила в редакцию 20.09.2012

Рассмотрено применение микроэлектромеханических систем для создания миниатюрных навигационно-ориентационных интегрированных модулей в целях улучшения массогабаритных параметров и энергопотребления, при этом рассмотренный интегральный подход дает возможность обеспечить характеристики устройств, в ряде задач сопоставимые с системами на лазерных гироскопах, и дополнительные преимущества, такие как время холодного старта, устойчивость к перегрузкам, повышенная живучесть.

Ключевые слова: навигация, МЭМС, акселерометр, гироскоп

Введение

В настоящее время интенсивно идет развитие микроэлектромеханических систем (МЭМС) для инерциальной навигации. Миниатюрные размеры МЭМС-приборов позволили внести их в конструкцию большинства мобильных устройств (фотоаппараты, мобильные телефоны, планшетные компьютеры). Современные автомобильные навигационные системы также используют инерциальные датчики для позиционирования момента потери связи со спутником. Более того, считавшиеся вследствие невысокой точности ранее недостижимыми для микроэлектромеханических инерциальных блоков сферы применения, включая космос и авиацию, постепенно открываются для современных устройств на МЭМС. Улучшение параметров датчиков МЭМС также достигается за счет интегра-

ции нескольких инерциальных датчиков в единую сборку с температурными сенсорами и процессорными модулями. Такое объединение позволяет за счет компенсации температурных дрейфов, погрешности ориентации отдельных сенсоров значительно улучшить характеристики устройства, в то же время сохранить его миниатюрность.

Интенсивные разработки, ведущиеся СПбГЭТУ в течение нескольких лет в данной области, значительный задел в системах традиционной инерциальной навигации, а также наличие современной, в большинстве своем индивидуально изготовленной калибровочной аппаратуры и отладочных стендов позволили выявить основные недостатки инерциальных сенсоров, разработать наиболее эффективные методы их компенсации, создать ряд уникальных малогабаритных аппаратно-программных блоков.

Цель данной работы — построение алгоритма полного конструкторско-технологического маршрута разработки и изготовления чувствительного инерциального датчика и обеспечение процесса его интеграции в навигационно-ориентационные модули с требуемыми характеристиками.

Разработка микроэлектромеханических чувствительных элементов для миниатюрных навигационно-ориентационных интегрированных модулей

Проектирование чувствительного МЭМС-элемента проводили исходя из требований к миниатюрному навигационному интегрированному модулю, представленных в табл. 1.

Проектирование и моделирование работы микрогироскопа и маршрута его изготовления осуществляли в программной среде CowentorWare. На рис. 1 представлена эквивалентная схема и трехмерная модель чувствительного элемента миниатюрного гироскопа, разработанного исходя из требований, представленных в табл. 1.

Проектирование включало в себя разработку технологических маршрутов производства микрогироскопа (на основе технологии "Кремний на

Таблица 1

Технические требования к микрогироскопу

Параметр	Значение
Диапазон	+/-300 °/с
Чувствительность	5 мВ/°/с
Шум	0,1 °/с /√Гц
Температура	от -20 до +60 °С
Ток	73 мА
Напряжение питания	4,75...5 В
Полоса пропускания	0,3 кГц

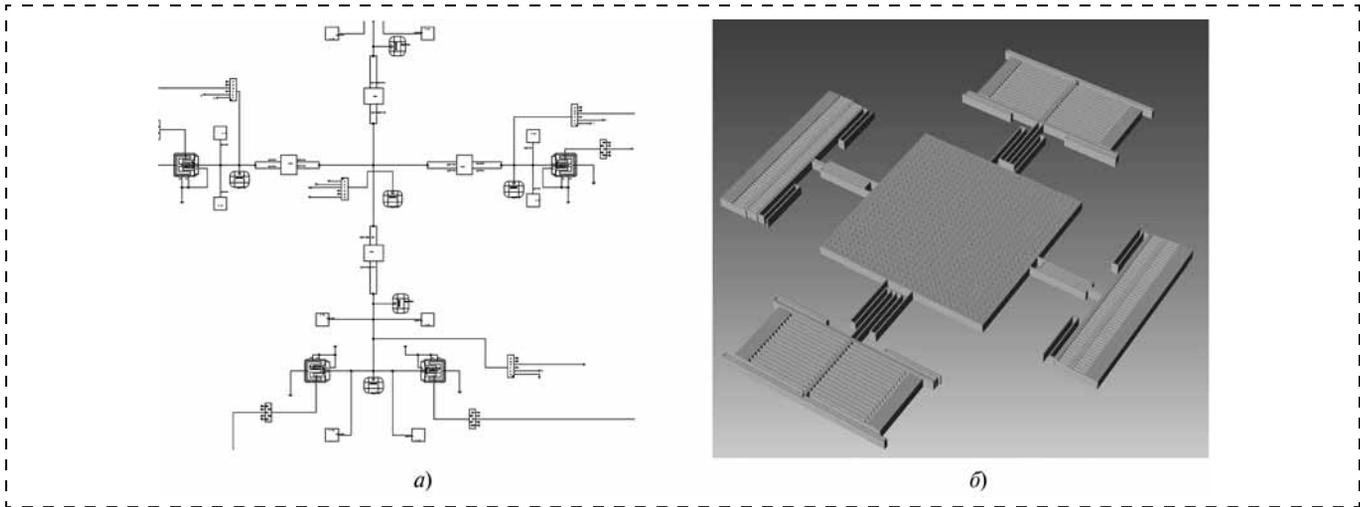


Рис. 1. Эквивалентная схема микрогироскопа (а) и трехмерная модель чувствительного элемента (б) миниатюрного гироскопа

Process Editor - [FabProcess1.proc]

File Edit View Tools Windows Help

Number	Step Name	Layer Name	Material Name	Thickness	Mask Name	Photoresist	Depth	Mask Offset	Sidewall Angle	Comments
0	Substrate	Substrate	SILICON	450	GND					Substrate thickness is ...
1	Thermal Oxidation	Burriedoxide	THERM_OXIDE	2						
2	Grow Crystal Silicon	Device	SILICON	60						BSOI wafer 60um for ...
3	Alignment Etch				MARKS	-	0.4	0	0	Etching of Alignment M...
4	Sputtering	Metal1	GOLD_BASED	0.4						Deposit of metallic lay...
5	Wet Etch				METAL1	+		0	0	Etching of metallic laye...
6	Deep Reactive Ion Etch (DRIE)				SILICON	+	60.4	0	0	Deep reactive ion etch...
7	Deep Reactive Ion Etch (DRIE)				HOLE	-	60.4	0	0	Deep reactive ion etch...
8	Release HF Etch		THERM_OXIDE							Sacrificial layer HF etc...

Рис. 2. Пример технологического маршрута микрогироскопа

изоляторе" (КНИ) и применения микрокоринкапсулирования на подложке посредством анодного срачивания) (рис. 2), разработку фотошаблонов кристалла изделия и построение виртуальной трехмерной модели изделия (рис. 3) с последующим изготовлением прототипов.

Микрогироскоп проектировали на базе технологии КНИ с толщиной конструкционного слоя кремния 60 мкм (рис. 4). Топологическая норма составляла 2 мкм. Особенностью технологии является

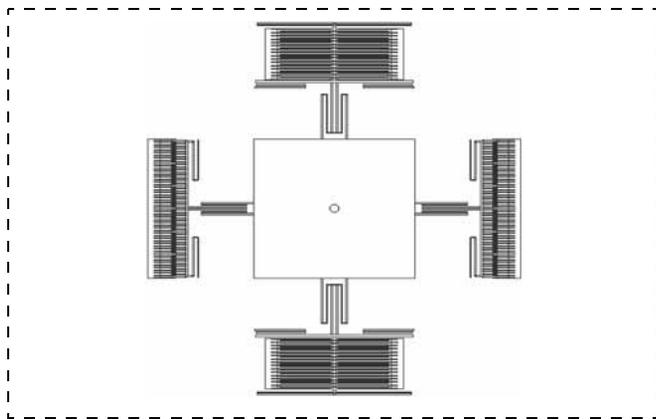


Рис. 3. Пример фотошаблона микрогироскопа

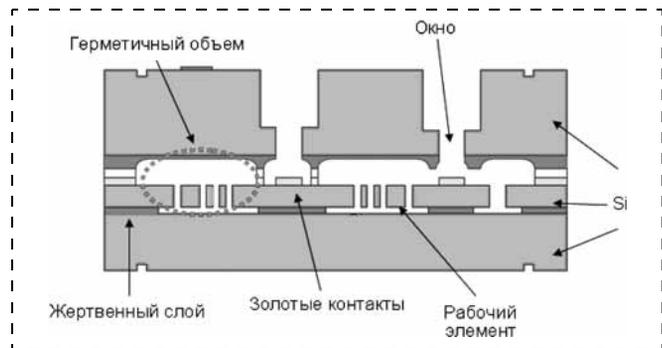


Рис. 4. Эскиз кросс-секции микрогироскопа

микрокорпусирование, которое выполнялось прямо на кристалле в виде технологической операции, входящей в состав общего маршрута изготовления.

В соответствии с разработанными технологическими маршрутами была изготовлена опытная партия микрогироскопов. На рис. 5 представлены фотографии модели кристалла. Результаты технологического моделирования (рис. 5) совпадают с характеристиками изготовленных экспериментальных образцов (рис. 6).

Зависимость перемещения чувствительной массы от поданного напряжения приведена на рис. 7.

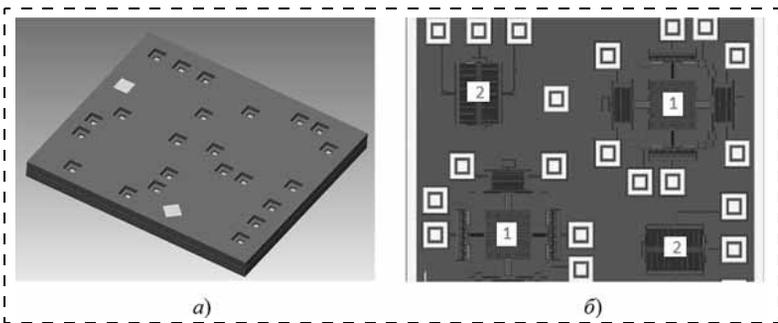


Рис. 5. Модель кристалла микрогироскопа:

a — трехмерная модель чипа; *б* — модель топологии кристалла (на кристалле расположены два микрогироскопа 1 и два акселерометра 2)

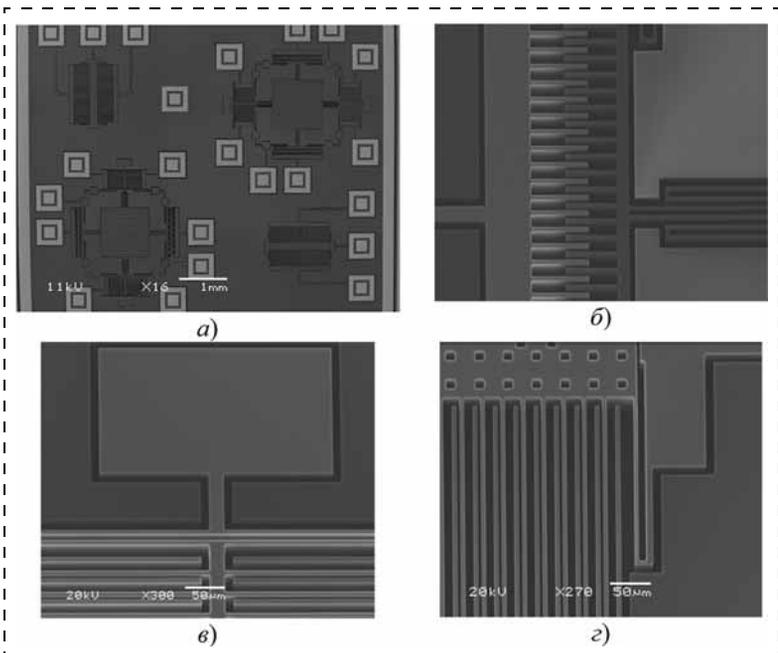


Рис. 6. Технологические фрагменты кристалла микрогироскопа:

a — общий вид; *б* — элемент привода движения; *в* — сенсор перемещения; *г* — чувствительный элемент

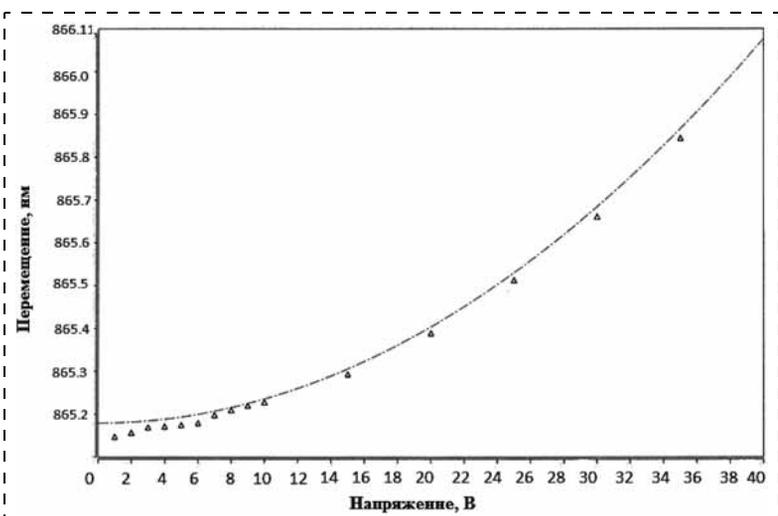


Рис. 7. Зависимость перемещения чувствительной массы микрогироскопа от напряжения:

Δ — экспериментальный результат; - - - - - теоретический расчет

Базовые принципы при разработке миниатюрных навигационных модулей на МЭМС-элементах

При разработке миниатюрных навигационных модулей на базе МЭМС-элементов используют следующие базовые принципы.

1. *Дифференциальное включение датчиков*, которое позволяет значительно уменьшить тепловой дрейф нуля, для этого по каждой оси измерения включают как минимум два датчика.

2. *Начальная ортогонализация датчиков*. Она достигается тонкой регулировкой положения датчиков на несущем шасси. Однако применение регулировки обуславливает увеличение размеров прибора.

3. *Сглаживание мощных импульсных механических воздействий*. Мощные импульсные механические воздействия могут вывести датчик за динамический диапазон чувствительности, что кратковременно приведет к выдаче ложной информации навигационной сборкой. Методы решения этой проблемы — применение датчиков с большим динамическим диапазоном (что может вызвать уменьшение точности показаний) и применение демпферов для крепления шасси в корпусе.

4. *Термостабилизация датчиков*. Дрейф нуля микромеханических датчиков зависит от температуры и имеет сложный нелинейный характер. Чтобы уменьшить его в точных приборах большого размера, можно применить элементы Пельтье. В маленьких приборах низкой точности применяют монокристаллическое шасси как можно меньшего объема из материала с хорошей теплопроводностью, на которое крепят датчики, обеспечивая максимальный тепловой контакт. Температура такого шасси измеряется термодатчиком, расположенным максимально близко к навигационным датчикам. По этой температуре, зная данные термокалибровки датчиков, можно значительно увеличить точность.

5. *Улучшение методик калибровки*. Калибровка по температуре позволяет уменьшить температурное влияние на точность, а механическая калибровка на специальном многоосевом поворотном стенде — почти полностью уменьшить влияние неперпендикулярности установки осей датчиков относительно друг друга.

6. *Применение методик измерения траектории движения с некоторыми известными параметрами*. Если в некоторые моменты измеряемого движения нам с высокой точностью известны его параметры, то в такие моменты мы можем корректировать показания инерциального модуля путем введения в него этих параметров. В частности, был успешно реализован метод преры-

Параметры сигнала, обработанного фильтром Кальмана

Исходный сигнал	Обработанный сигнал	Тип фильтра
~2 мВ	~0,5 мВ ~0,1 мВ	Статический фильтр Кальмана Адаптивный фильтр Кальмана

вистого движения с известными скоростям и ускорениями. Это позволило в моменты остановок корректировать показания датчиков (вводить сигнал, корректирующий дрейф нуля).

Рассмотрим реализацию инерциальной сборки, включающей триаду акселерометров, триаду гироскопов и вычислительный модуль, реализованный на базе конечного автомата.

Работа программного модуля, обеспечивающего расчет ориентации объекта и его ускорений, выполняется по алгоритму, проиллюстрированному на рис. 8.

Данные с чувствительных элементов поступают на вход фильтров Кальмана. Для акселерометров используют простые фильтры первого порядка, для гироскопов — составные фильтры, представляющие пару фильтров Кальмана первого порядка, один из которых настроен на выделение постоянной составляющей сигнала. Параметры ковариационной матрицы настраивают в зависимости от используемых чувствительных элементов.

Блок ортогонализации каждого канала использует данные аналогичных чувствительных элементов двух других осей приборной системы координат, чтобы компенсировать возможные разориентации осей ПСК и осей чувствительности датчиков. Коэффициенты ортогонализации a_{xn} , a_{yn} , a_{zn} находятся методом наименьших квадратов при предварительной калибровке, которая сводится к аппроксимации экспериментальных зависимостей следующими выражениями:

$$f_x^{орт} = a_{x0}f_x + a_{x1}f_y + a_{x2}f_z + a_{x3}f_x^2 + a_{x4}f_y^2 + a_{x5}f_z^2 + a_{x6}f_xf_y + a_{x7}f_xf_z + a_{x8}f_zf_y; \quad (1)$$

$$f_y^{орт} = a_{y0}f_x + a_{y1}f_y + a_{y2}f_z + a_{y3}f_x^2 + a_{y4}f_y^2 + a_{y5}f_z^2 + a_{y6}f_xf_y + a_{y7}f_xf_z + a_{y8}f_zf_y; \quad (2)$$

$$f_z^{орт} = a_{z0}f_x + a_{z1}f_y + a_{z2}f_z + a_{z3}f_x^2 + a_{z4}f_y^2 + a_{z5}f_z^2 + a_{z6}f_xf_y + a_{z7}f_xf_z + a_{z8}f_zf_y. \quad (3)$$

Эффективность работы фильтра Кальмана представлена в табл. 2.

Блоки ортогонализации можно заменить на более сложные "объединяюще-фильтрующие". Последние целесообразно использовать в случае, когда система имеет избыточное число сенсоров. Задачей блока является нахождение такого значения векторной величины (линейного ускорения, угловой скорости), которое будет максимально соответствовать совокупности измерений ее проекций. Критерием соответствия может выступать среднее квадратичное отклонение проекций предлагаемого вектора на оси чувствительности от соответствующих измерений. В этом случае "ортогонализация" пойдет к тому базису, в котором указаны направления осей чувствительности. При использовании указанного решения калибровка сводится к нахождению направлений осей чувствительности в необходимом базисе.

Кроме того, при достаточном числе сенсоров возможна реализация механизмов, определяющих "степень доверия" к каждому сенсору.

Проведенные нашим коллективом эксперименты показали высокую эффективность подавления таким способом "ложных" показаний вышедшего из строя датчика, однако это может снижать точ-

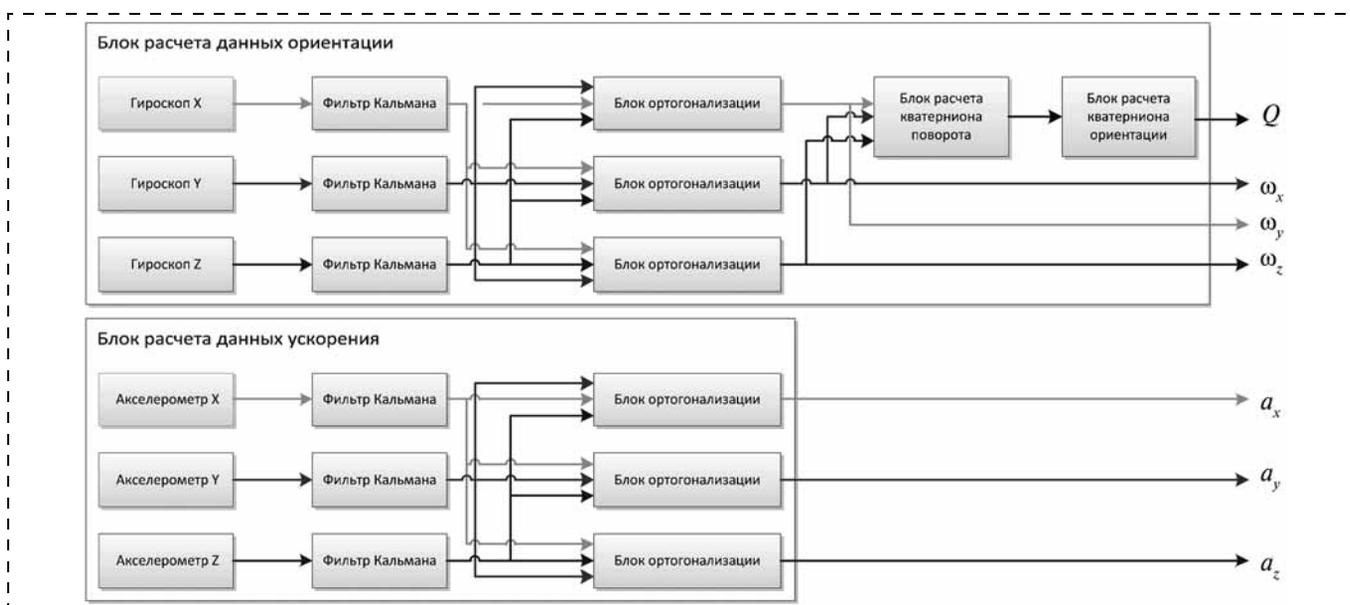


Рис. 8. Упрощенная схема расчета ориентации и ускорений объекта

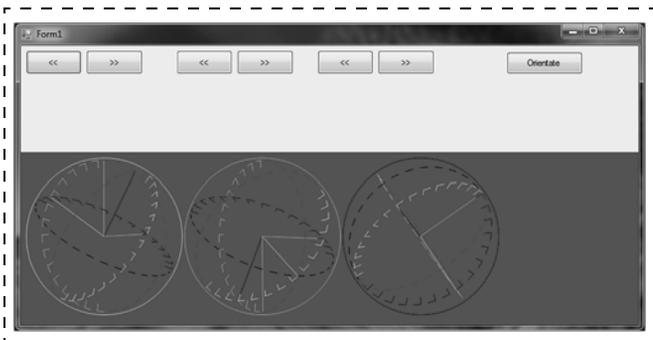


Рис. 9. Интерфейс программного обеспечения

ность определения вектора измеряемой величины в штатном режиме работы.

Представление ориентации объекта может быть реализовано различными способами: матрицей направляющих косинусов, углами Эйлера, кватернионом ориентации и т. д. Представление в виде кватерниона имеет ряд плюсов. В первую очередь это меньшее количество математических операций при обработке, простая процедура коррекции по инклинометрическим показаниям, исключение проблемы "GIMBALLOCK".

Кватернион ориентации объекта в пространстве $Q_{\text{ориент}}(t)$ рассчитывается перемножением кватерниона ориентации в предыдущий момент времени $Q_{\text{ориент}}(t - \delta t)$ и кватерниона поворота $Q_{\text{вращ}}(t)$.

Начальный кватернион ориентации $Q_{\text{ориент}}(t_0)$ выбирается как единичный кватернион умножения:

$$Q_{\text{ориент}}(t_0) = \{1, 0, 0, 0\}.$$

Такой выбор подразумевает совпадение в начальный момент времени приборной (локальной) и глобальной систем координат. Результирующий кватернион $Q_{\text{ориент}}(t)$ показывает ориентацию объекта относительно его же положения в начальный момент времени t_0 . Для компенсации ошибки вычислений, связанной с представлением чисел и реализацией математических операций в процессоре, после расчета выполняется нормализация кватернионов. Формируемый вектор ускорения A объекта передается из модуля в приборной системе координат. В случае, когда A требуется перевести в глобальную систему, следует воспользоваться следующим выражением:

$$A_{\text{глоб}} = Q_{\text{ориент}}(t) \cdot A \cdot Q_{\text{ориент}}(t)^{-1}.$$

Для тестирования математический аппарат алгебры кватернионов, матриц и векторов был реализован на языке высокого уровня C#, также было создано базовое тестовое программное обеспечение, взаимодействующее с отладочным аппаратным модулем, его интерфейс приведен на рис. 9.

На рис. 10 представлен навигационный модуль, разработанный в СПбГЭТУ.

При работе систем навигации частота измерений достаточно высока, чтобы использовать малоугловые приближения для кватерниона $Q_{\text{вращ}}(t)$ или матрицы поворота. Однако повсеместно применяемые решения, использующие только первые члены разложений угловых функций, бывают недостаточными для обеспечения необходимой точности. В новых систе-

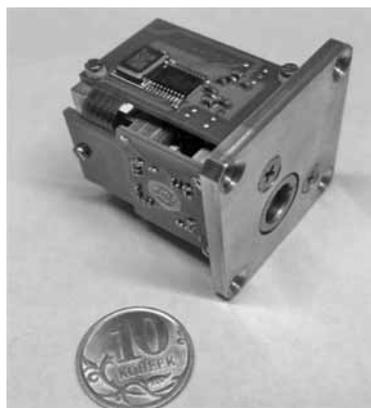


Рис. 10. Навигационный модуль общего применения



Рис. 11. Трехосный автоматизированный стенд

мах, разрабатываемых в СПбГЭТУ, используются разложения с членами более высоких порядков, что позволяет обеспечивать точность, сохраняя высокую скорость работы математических блоков.

Для исследования технических характеристик миниатюрных навигационных модулей был использован трехосный поворотный стенд. Внешний вид и технические характеристики стенда приведены на рис. 11 и в табл. 3.

Специализированное программное обеспечение стендов позволяет:

- реализовывать сценарии автоматизированных испытаний инерциальных датчиков согласно требованиям международных стандартов;

Таблица 3

Технические характеристики малогабаритного трехосного испытательного стенда

Параметр	Значение
Диапазон угловых перемещений по трем осям	Не ограничен
Предельная погрешность позиционирования по трем осям	2"
Диапазон задаваемых угловых скоростей по трем осям	± 360 °/с
Нестабильность угловой скорости за оборот по трем осям	Не более 0,005 %
Отклонение от ортогональности осей стенда	Не более 1"
Диапазон задаваемых температур	-20...+40 °C
Стабильность поддержания задаваемой температуры	± 1 °C
Максимальная масса испытуемого объекта	5 кг

- задавать квазигармонические движения, характерные для потенциального носителя;
- обеспечивать трансляцию потребителю в режиме реального времени показаний датчиков углов сенда, что дает возможность более глубокого анализа качества работы инерциальных измерительных модулей в выработке параметров угловых перемещений.

Заключение

Применение микроэлектромеханических систем для создания миниатюрных навигационно-ориентационных интегрированных модулей обеспечивает снижение массогабаритных параметров и энергопотребления, при этом интегральный подход дает возможность обеспечить характеристики устройств, в ряде задач сопоставимые с системами на лазерных гироскопах, и дополнительные преимущества, такие как время холодного старта, устойчивость к перегрузкам, повышенная живучесть.

В Центре микротехнологии и диагностики СПбГЭТУ реализован системный подход к изготовлению и тестированию миниатюрных навигационных модулей, включая:

- > определение требований к системе в целом;
- > разработку и изготовление специализированных чувствительных элементов;
- > калибровку чувствительных элементов;
- > разработку и изготовление миниатюрных навигационных модулей на базе созданных чувствительных элементов;
- > калибровку и настройку навигационных модулей на специализированном оборудовании.

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.

УДК 621.315.592

О. С. Бохов¹, канд. техн. наук, нач. лаб. НОЦ,
М. П. Духновский², нач. отд.,
А. Б. Козырев¹, д-р техн. наук, проф.,
А. В. Корляков¹, д-р техн. наук, проф.,
А. Н. Королев², д-р техн. наук, проф., перв. зам. дир-ра,
А. В. Лагош¹, инженер,
В. В. Лучинин¹, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,
С. И. Топталов¹, канд. техн. наук, доц., вед. науч. сотр. НОЦ

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ), e-mail: boschov@mail.ru; mlpeltech@gmail.com; akorl@yandex.ru; anton.lagosh@gmail.com; mas_ter62@mail.ru

² Федеральное государственное унитарное предприятие «НПП "Исток"», e-mail: duhnovskiyimp@mail.ru, istkor@elnet.msk.ru

Г Е С Е Т І Т О Р А А Е В Р U E A
 І A E T A A A R E O I O A
 P A A E T O A O I E x A N E E A I T A O E E
 Г A T N I T A A
 І E E P I Y E A E O P I I A O A I E x A N E E O
 E E P x A E

Поступила в редакцию 20.09.2012

Рассмотрены особенности построения микроэлектромеханических (МЭМ) ключей различного принципа действия. Рассмотрены особенности СВЧ МЭМ ключей с использованием алмазоподобных материалов. Приведены

разработанные модели ключей и проведен комплексный анализ их характеристик. Рассмотрены конструкции и технологии для производства МЭМ ключей. Представлены фазовращатели, созданные на базе МЭМ ключей для фазированных антенных решеток, и фазированные антенные решетки для различных частотных диапазонов на МЭМ ключах.

Ключевые слова: микроэлектромеханические ключи, фазовращатели, фазированные антенные решетки, алмазоподобные материалы

Введение

В последние годы наблюдается значительный рост интереса к изделиям, в которых используются в качестве базовых компонентов микроэлектромеханические ключи.

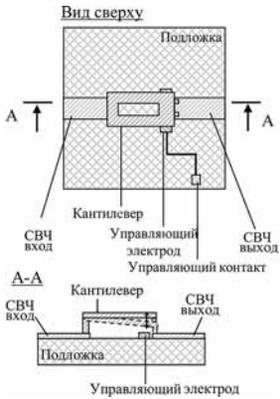
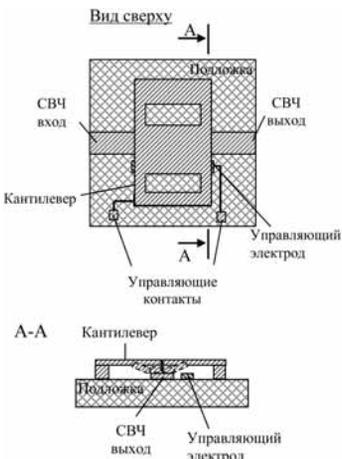
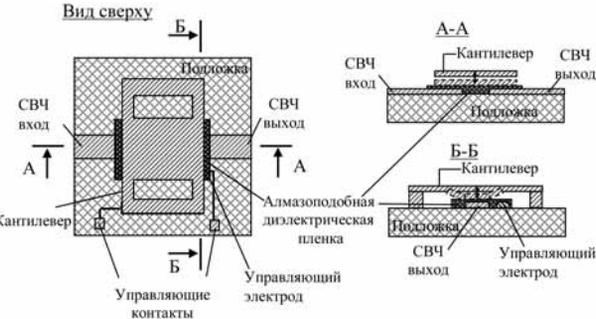
В данной статье рассмотрен комплексный подход к проектированию устройств на базе микроэлектромеханических (МЭМ) ключей, включающий как проектирование ключа, так и разработку завершеного СВЧ модуля в виде фазовращателя.

Варианты конструктивного исполнения МЭМ ключей

Из всего разнообразия принципов построения МЭМ элементов наиболее эффективным для СВЧ применений является электростатический. Это обуславливается тем, что для его получения наилучшим образом подходит так называемая поверхностная микромеханика, хорошо совместимая с существующими технологиями изготовления монокристаллических интегральных схем.

Первоначально представим результаты анализа (табл. 1) возможных конструкций электростатических МЭМ элементов двух типов — с омическим и емкостным контактом.

Варианты конструктивного исполнения, достоинства и недостатки МЭМ ключей

Конструкция	Достоинства и недостатки
<p>МЭМ коммутатор с омическим контактом и односторонним подвесом кантилевера</p> 	<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> — технологическая простота изготовления; — широкий диапазон рабочих частот (до 40 ГГц) <p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> — низкий уровень мощности СВЧ сигнала (<1 Вт) вследствие большой плотности тока в упругих частях кантилевера; — необходимость использования "холодного" режима переключения; — низкое быстродействие ~10 мкс; — старение контактов (10^{11} циклов); — высокий уровень управляющего напряжения (~100 В)
<p>МЭМ коммутатор средней СВЧ мощности с омическим контактом и односторонним подвесом кантилевера</p> 	<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> — технологическая простота изготовления; — максимальная коммутируемая мощность до 10 Вт; — широкий диапазон рабочих частот (до 20 ГГц) <p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> — необходимость использования "холодного" режима переключения; — низкое быстродействие (~10 мкс); — старение контактов (10^{11} циклов); — высокий уровень управляющего напряжения (~100 В)
<p>МЭМ коммутатор средней СВЧ мощности с омическим контактом и двусторонним подвесом кантилевера</p> 	<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> — технологическая простота изготовления; — максимальная коммутируемая мощность до 10 Вт; — широкий диапазон рабочих частот DC — 20 ГГц; — низкий уровень управляющего напряжения (20...30 В); — высокое быстродействие (~1 мкс) <p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> — необходимость использования "холодного" режима переключения; — старение контактов (10^{11} циклов)
<p>Емкостной коммутатор средней СВЧ мощности с двусторонним подвесом кантилевера</p> 	<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> — максимальная коммутируемая мощность до 10 Вт; — низкий уровень управляющего напряжения (20...30 В); — не требуется использование "холодного" режима переключения; — отсутствует старение контактов; — высокое быстродействие (~1 мкс) <p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> — сложность технологического изготовления; — ограничение рабочей полосы частот (~20...40 %)

Наиболее критичным параметром в МЭМ переключателях, по сравнению с альтернативными методами коммутации, является время переключения. Данный параметр не только определяется конструктивно-технологическими особенностями, но и связан с другими задаваемыми параметрами, в частности с управляющим напряжением.

В большинстве конструкций МЭМ переключателей используется электростатическое управление подвижной обкладкой для замыкания (контактного или емкостного) микрополосковой линии. При этом напряжение включения оценивается из зависимости (рис. 1) прогиба подвижной упругой подвешенной обкладки от подаваемого на нее управляющего напряжения U . Данная зависимость определяется из статического равновесия силы упругого подвеса и электростатической силы притяжения обкладок:

$$k(x_0 - x) = \frac{\varepsilon_0 S U^2}{2x^2},$$

где k — коэффициент упругости подвеса; x_0 , x — соответственно начальная и текущая координаты подвижной управляющей обкладки; ε_0 — электрическая постоянная; S — площадь управляющей обкладки.

Из анализа нелинейной зависимости (рис. 1) получено критическое напряжение включения U_k , характеризующееся необратимым падением (залипанием) подвижной обкладки на подложку. Критическое значение прогиба $x_k = 2/3(x_0)$. При этом критическое напряжение включения U_k определяется выражением

$$U_k = \sqrt{\frac{8kx_0^3}{27\varepsilon_0 S}}. \quad (1)$$

Время переключения МЭМ элемента можно связать с резонансной частотой подвижной обкладки. Время включения можно оценить как

$$t_{\text{вкл}} = \frac{1}{2f_0} \frac{U_k}{U_{\text{вкл}}}, \quad (2)$$

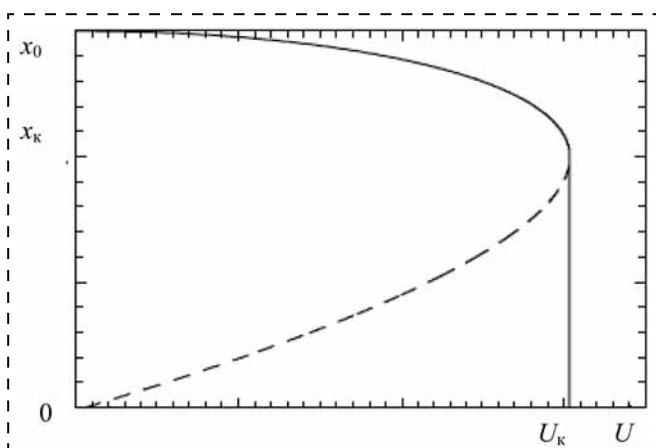


Рис. 1. Статическая зависимость прогиба подвижной обкладки от подаваемого на нее управляющего напряжения

где f_0 — резонансная частота колебаний подвижной обкладки; $U_{\text{вкл}}$ — используемое рабочее напряжение включения, которое обычно превышает U_k в 1,2...1,5 раза. Время выключения (размыкания), как правило, больше, чем время включения, и определяется частью периода свободных колебаний подвижной обкладки. Его можно оценить как

$$t_{\text{выкл}} = \frac{1}{2f_0}. \quad (3)$$

Резонансная частота механических колебаний упруго подвешенной обкладки f_0 определяется упругостью подвеса k и эффективной массой, которая в основном сосредоточена в подвижной управляющей обкладке:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\rho S h}}, \quad (4)$$

где ρ — плотность материала обкладки; h — ее толщина.

Из сравнения выражений (1) и (3), (4), характеризующих основные параметры микромеханического ключа — управляющее напряжение и скорость переключения, можно сделать вывод об их взаимосвязи. Так, выразив резонансную частоту через критическое напряжение включения U_k , получим выражение, определяющее быстродействие МЭМ переключателя при заданном управляющем напряжении:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{27\varepsilon_0 U_k^2}{8x_0^3 \rho h}}. \quad (5)$$

Из полученного выражения видно, что при заданном управляющем (критическом) напряжении для повышения частоты механических колебаний необходимо в конструкции предусмотреть минимально возможный зазор x_0 под управляющим электродом, наименьшую плотность ρ материала подвижного электрода и его минимальную толщину h .

Плотности возможных для применения материалов ($\rho_{\text{Si}} = 2,33 \text{ г/см}^3$; $\rho_{\text{SiC}} = 3,22 \text{ г/см}^3$; $\rho_{\text{алмаз}} = 3,5 \text{ г/см}^3$) незначительно влияют на резонансную частоту (кроме золота $\rho_{\text{Au}} = 19,32 \text{ г/см}^3$). Толщина пленки также влияет на жесткость подвеса, напряжение включения, виброустойчивость и прочность конструкции, поэтому ограничена снизу значениями в десятые доли микрометра. Значение воздушного зазора x_0 под управляющим электродом наиболее сильно влияет на механическую частоту элемента, но его наименьшее значение, в первую очередь, определяется исходя из заданного минимального коэффициента затухания в выключенном состоянии, а также технологическими ограничениями, связанными с вытравливанием жертвенного слоя из-под подвижного механического элемента. Как правило, значение зазора составляет не менее единиц или долей микрометра.

Технологически достижимые значения толщины обкладки и зазора в диапазоне 0,5...0,8 мкм позволяют получить оценку минимального времени переключения порядка 500 нс. Характерно, что у лучших мировых аналогов МЭМ переключателей минимальное время переключения также находится на уровне 1 мкс.

Габаритные размеры активной области переключающего МЭМ элемента, в основном, определяются размерами (площадью) подвижного электрода и зависят от управляющего напряжения. Уменьшение этих размеров приводит к увеличению управляющего напряжения за счет уменьшения площади управляющей обкладки и возрастанию жесткости подвеса.

При типовой конструкции МЭМ элемента (рис. 2) можно оценить жесткость микромеханического подвеса из выражения:

$$k = \frac{Ebh^3}{12l\left(\frac{L^2}{2} + \frac{Ll}{6} + \frac{l^2}{3}\right)}, \quad (6)$$

где E — модуль упругости; B , L — соответственно ширина и длина управляющей обкладки; b , l — соответственно ширина и длина упругого подвеса элемента.

Необходимо отметить, что основные оценочные выражения не зависят от конкретного вида упругого механического подвеса, который также может быть реализован в виде консоли или мостика. В результате проведенных оценок, в соответствии с выражениями (3), (5) для конструкции микромеханического элемента на основе пленки карбида кремния, получены значения основных параметров структуры при $U_k = 20$ В (рис. 2). Время переключения элемента $t_{\text{выкл}} = 515$ нс.

Особенности СВЧ МЭМ ключей с использованием алмазоподобных материалов

Алмаз и алмазоподобные материалы на сегодняшний день считаются одними из самых перспективных материалов для МЭМС-устройств. Они имеют целый ряд преимуществ по сравнению с традиционными материалами МЭМС-устройств и систем. К ним относятся низкий коэффициент трения и высокая устойчивость к изнашиванию,

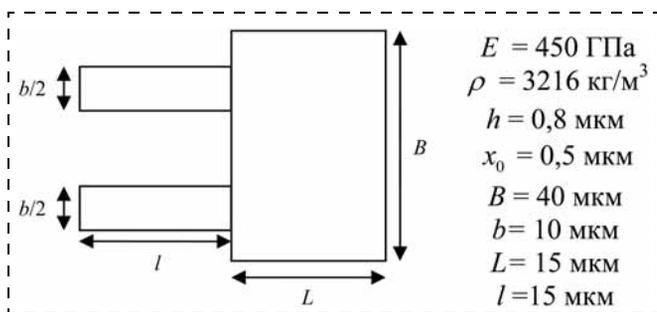


Рис. 2. Эскиз и параметры конструкции подвижного микромеханического элемента на основе пленки SiC

что особенно важно для микросистем, содержащих компоненты с поверхностью скольжения. Они химически инертны и устойчивы; обладают отличной теплопроводностью и низким коэффициентом теплового расширения, а также отличными трибологическими свойствами. Возможность создания высоколегированных алмазных пленок позволяет обеспечить условия для стекания заряда и избежать "слипания" электродов МЭМ ключа [1—4].

На основе анализа свойств алмазных и алмазоподобных материалов с точки зрения применимости для создания МЭМ ключей сделаны следующие выводы:

- высокие значения модуля упругости пленок на основе алмаза и карбида кремния дают возможность реализовать конструкции микромеханических элементов с повышенной виброустойчивостью, а с учетом более низкой плотности материала (по сравнению с металлами) — значительно повысить резонансную частоту микромеханической структуры, что позволяет снизить время срабатывания (переключения) микромеханического ключа;
- применение алмазных и алмазоподобных диэлектрических пленок с высоким значением пробивного напряжения позволяет снизить деградационные явления при высоких управляющих напряжениях;
- высокие значения коэффициента теплопроводности структур на основе алмаза и карбида кремния дают возможность реализовать конструкции микроэлектромеханических ключей с большими токами коммутации; высокая механическая прочность основы для коммутируемых структур должна снизить механическую деградацию контактных областей;
- тепловая стойкость, низкие температурные коэффициенты теплового расширения и модуля упругости позволяют значительно расширить температурный диапазон эксплуатации МЭМ ключей при использовании в качестве подвижных деформируемых элементов структур на основе алмаза и карбида кремния.

Разработка микроэлектромеханического ключа

Традиционный электростатический МЭМ ключ представляет собой структуру, которая состоит из тонкой металлической пластины, зафиксированной на одном конце и свободно нависающей над

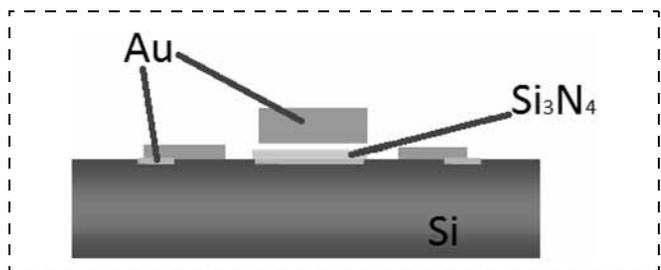


Рис. 3. Эскиз кросс-секции

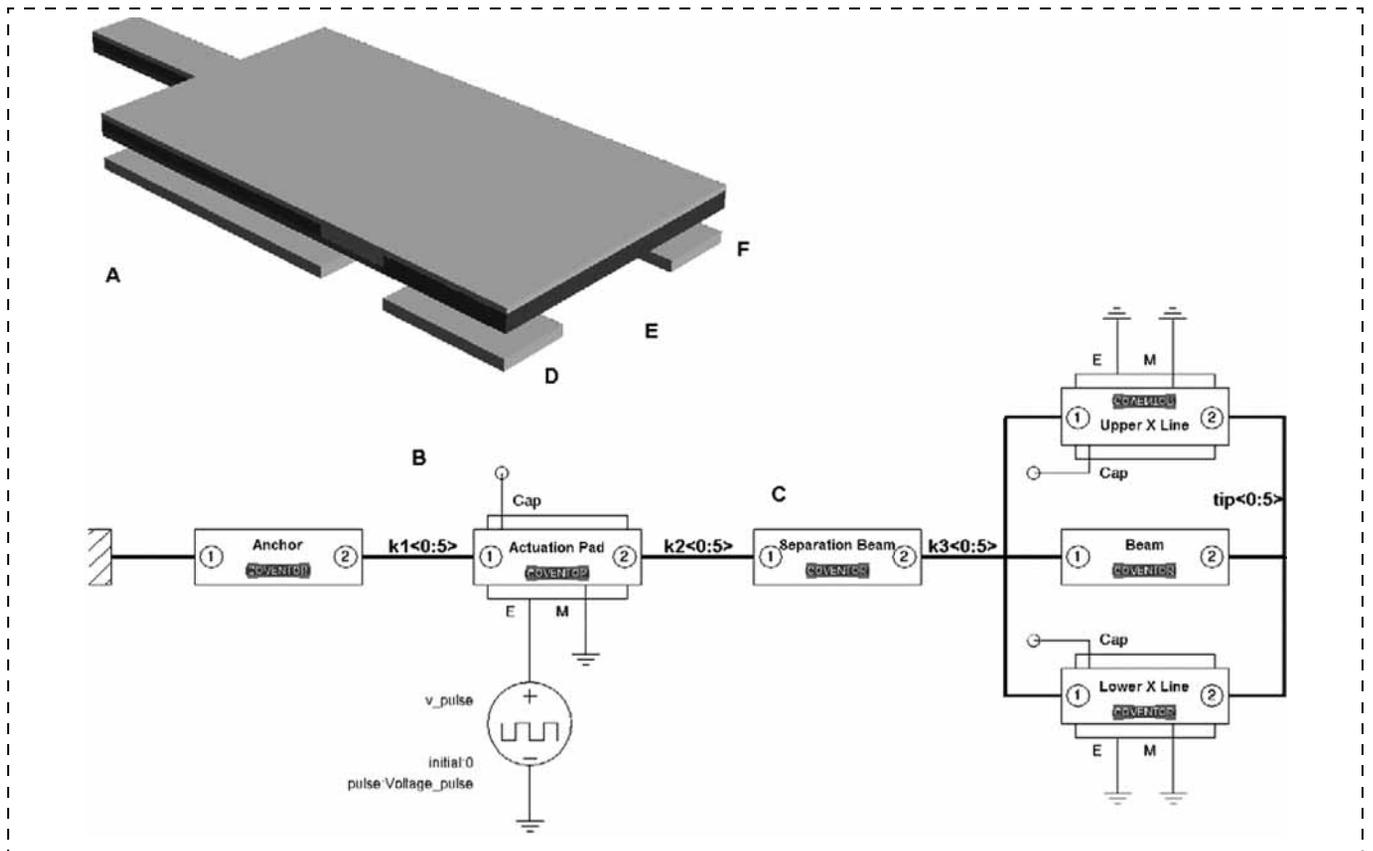


Рис. 4. Построение эквивалентной схемы СВЧ микроэлектромеханического ключа в САПР CoventorWare

металлической линией передач на расстоянии нескольких микрометров. Между линией передач и фиксированным концом консоли находится металлический электрод, выполняющий роль тянущего вниз механизма. Приложенное управляющее напряжение заставляет металлическую пластину опускаться вниз для замыкания линии передач.

Современный маршрут проектирования для СВЧ МЭМ ключа представлен ниже.

1. Задание технологии производства и разработка эквивалентной схемы СВЧ ключа, которое осуществлялось в программном пакете CoventorWare. За основу был выбран технологический процесс, который обеспечивает нанесение слоев Si_3N_4 высокого качества (толщиной примерно 0,2 мкм) и в то же время позволяет создавать достаточно толстые металлические слои, используемые как основной конструкционный материал (толщиной до 3...5 мкм) (рис. 3).

2. Расчет параметров СВЧ ключа по эквивалентной схеме и оптимизация конструкции. На рис. 4 представлен пример расчетной зависимости перемещения активной части от напряжения управления.

На рис. 5 (см. третью сторону обложки) показано перемещение микробалки при подаче напряжения управления, достаточного для удержания микробалки в контактном положении.

3. Уточненный расчет параметров методом конечных элементов.

4. Подготовка фотошаблонов выполняется после уточненного расчета технических характеристик (рис. 6).

5. Изготовление опытных образцов.

На рис. 7 представлен разработанный и изготовленный в Санкт-Петербургском государственном

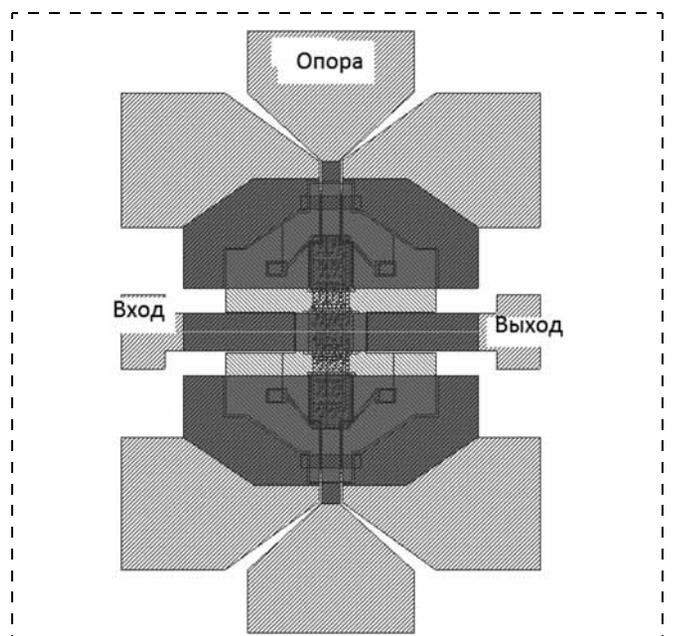


Рис. 6. Эскиз фотошаблонов СВЧ ключа

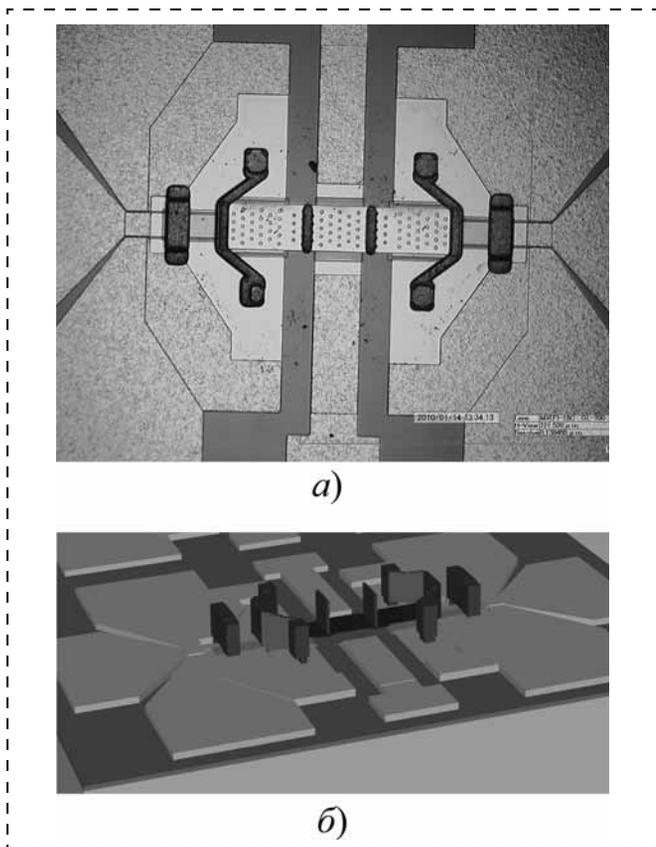


Рис. 7. СВЧ ключ, созданный в СПбГЭТУ:
a — экспериментальный образец СВЧ ключа; *б* — 3D-модель СВЧ ключа

ном электротехническом университете "ЛЭТИ" экспериментальный образец СВЧ ключа и его трехмерная модель.

Моделирование частотных характеристик микроволновых переключателей

На рис. 8 и 9 (см. третью сторону обложки) представлена внутренняя конструкция и топология одностороннего ключа МЭМ элемента (SPST). МЭМ элемент расположен на подложке из материала Rogers 4003, в которой проделаны металлизированные отверстия для заземления МЭМ элемента. Расчеты выполнены для МЭМ элемента на основе кремниевой подложки. СВЧ сигнал подается на "Вход 1" диэлектрической подложки и далее через гибкие металлические соединители поступает на входную площадку МЭМ элемента. По внутренней топологии МЭМ элемента сигнал доходит до ключа (кантилевер), и в зависимости от его состояния сигнал либо отражается, либо проходит на "Вход 2". На рис. 8 и 9 (см. третью сторону обложки) представлена картина токов для случая замкнутого и разомкнутого ключа. Красный цвет показывает максимальную плотность тока в области ключа. Потери в полосе частот при замкнутом ключе определяются качеством контакта, а изоляция для разомкнутого состояния — паразитной емкостью ключа.

На рис. 10 и 11 (см. четвертую сторону обложки) представлена модель двойного ключа (SPDT). Она аналогична рассмотренному одностороннему ключу, однако имеет один вход и два выхода и, соответственно, два МЭМ ключа. На рис. 10 представлена картина токов для случая, когда все ключи разомкнуты. На рис. 11 представлена картина распределения токов, когда ключ со входа 1 на вход 2 замкнут, а ключ со входа 1 на вход 3 разомкнут. Режим работы ключа предусматривает либо все разомкнутые состояния, либо замыкание только одного из двух ключей. Замыкание одновременно двух ключей не допускается, так как ведет к ухудшению согласования и большим дополнительным потерям. На рис. 12 представлены зависимости согласования структуры (параметры $|S_{11}|$, $|S_{22}|$) для случая разомкнутого и замкнутого состояния ключа соответственно. Параметр согласования в требуемой полосе частот лучше — 22 дБ. Потери в полосе частот при замкнутом ключе определяются качеством контакта, а изоляция для разомкнутого состояния — паразитной емкостью ключа.

Разработка и создание фазовращателей на МЭМ ключах

Ключевыми устройствами систем фазированных антенных решеток (ФАР) являются фазовращатели, число которых в зависимости от назначения системы составляет от десятков до десятков тысяч штук в каждой решетке. Параметры и стоимость фазовращателей играют доминирующую роль как в получении необходимых технических характеристик антенных систем, так и в их ценообразовании.

Многообразие требований к антенным системам не позволяет выделить какой-либо класс фазовращателей как полностью удовлетворяющий этим требованиям. Как правило, выбор того или иного класса устройств определяется компромиссом ряда основных параметров (быстродействие, рабочая СВЧ мощность, потребляемая мощность управления, массогабаритные параметры, стоимость).

Сравним основные параметры фазовращателей и антенн на основе традиционной (полупроводники, ферриты) элементной базы и на основе МЭМ элементов.

1. Потребляемая мощность управления МЭМ элементов на 2—3 порядка ниже, чем у полупроводниковых PIN и ферритовых элементов.

2. Диссипативные СВЧ потери МЭМ элементов в несколько раз ниже, чем потери в ферритовых и полупроводниковых аналогах.

3. Нелинейные искажения СВЧ сигнала у МЭМ элементов на несколько порядков ниже, чем у полупроводниковых варакторных диодов и соответствуют IP3 свыше 66 дБм.

4. Время переключения МЭМ элементов (~4 нс) больше, чем у полупроводниковых аналогов, и соизмеримо с временем переключения ферритовых устройств, однако существуют данные о зарубеж-

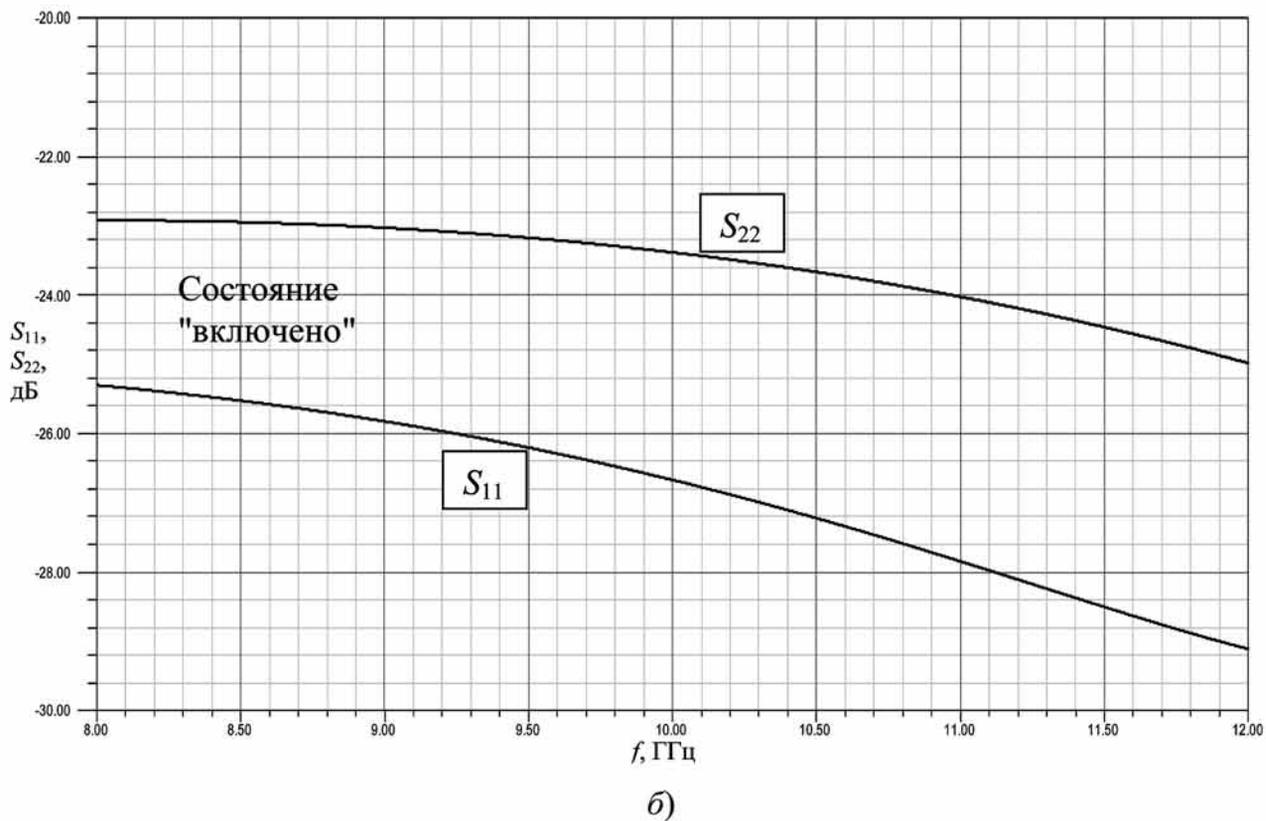
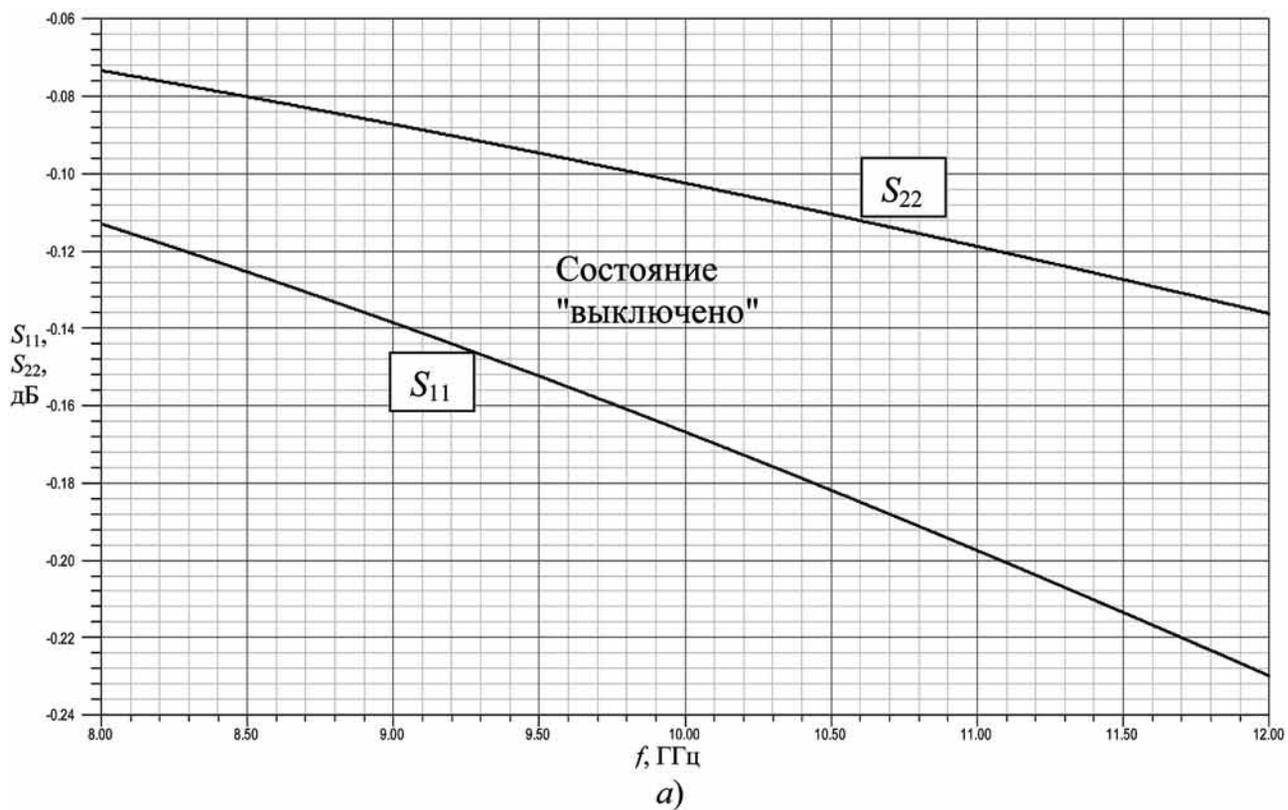


Рис. 12. Частотные зависимости согласования SPDT элемента (параметр S_{11} , S_{22}) для случаев разомкнутого (а) и замкнутого (б) состояния. Согласование в состоянии "включено" лучше -22 дБ

Таблица 2

Результаты тестирования SP4T МЭМ элементов в частотном диапазоне от 50 МГц до 3 ГГц

Вносимые потери ($ S_{21} , S_{31} , S_{41} , S_{51} $) в состоянии включено, дБ	<0,3
Развязка ($ S_{21} , S_{31} , S_{41} , S_{51} $) в состоянии выключено, дБ	>35
Согласование ($S_{11}, S_{22}, S_{33}, S_{44}, S_{55}$) в состоянии включено в соответствии с выбранным портом, дБ	<-30
Сопrotивление канала во включенном режиме на постоянном токе, Ом	<2,5
Напряжение включения, В	± 100
Напряжение выключения, В	0
Время включения, мкс	2...10
Время выключения, мкс	<1
Энергия переключения, нДж;	<1
Средняя потребляемая мощность при частоте управления 1 кГц, мкВт	<1

ных лабораторных разработках МЭМ элементов с временем переключения, характерным для полупроводниковых аналогов (1...10 нс).

5. Радиационная стойкость на несколько порядков выше по сравнению с полупроводниковыми аналогами.

В настоящей работе использовались МЭМ элементы типа SP4T с электростатическим управлением. Результаты их тестирования, проведенные авторами, в частотном диапазоне от 50 МГц до 3 ГГц приведены в табл. 2. Результаты измерений быстрого действия МЭМ элементов иллюстрируются осциллограммами, приведенными на рис. 13 (см. четвертую сторону обложки).

На основе МЭМ элементов были реализованы дискретные МЭМ фазовращатели (ФВ) на различные частотные диапазоны, предназначенные для применения в качестве управляющего элемента в составе автономного комплекса фазированных антенных решеток с малыми потерями сигнала и низким энергопотреблением. Два варианта конструкции (полосковое исполнение и с коаксиальными SMA разъемами) ФВ позволяют использовать их как модуль ФАР и как самостоятельное устройство СВЧ техники.

Разработанный и изготовленный в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" фазовращатель на микроэлектромеханических элементах на частоту 2,8 ГГц представлен на рис. 14.

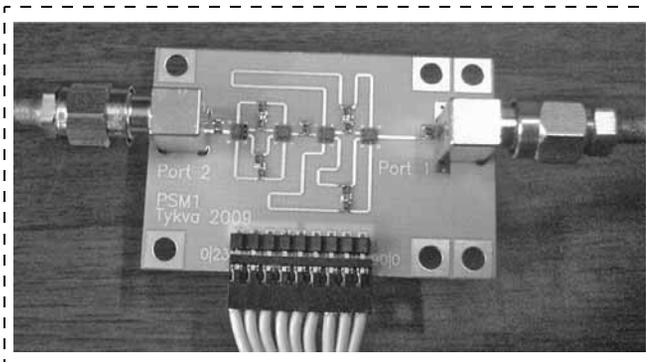


Рис.14. Внешний вид фазовращателя на частоту 2,8 ГГц

МЭМ ФВ представляет собой четырехслойную СВЧ плату, содержащую четыре SP4T МЭМ элемента (размеры с полосковыми выводами — $40 \times 30 \times 0,8$ мм; размеры платы с SMA-выводами — $45 \times 30 \times 0,8$ мм). Использование четырех слоев достаточно для реализации развязки СВЧ микрополосковых и подводящих линий подачи сигналов управления (постоянных или импульсных) от выводов управления ФВ к МЭМ элементам. Плата содержит два каскада ФВ. Каждый каскад образован двумя четырехпозиционными МЭМ переключателями, работающими синхронно и коммутирующими отрезки микрополосковых линий различной электрической длины.

Результаты моделирования характеристик фазовращателя (рис. 15) практически идеально совпадают с результатами их экспериментального тестирования (рис. 16). Обобщенные данные, характеризующие параметры фазовращателя, приведены в табл. 3.

Разработанный и изготовленный в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" фазовращатель на микроэлектромеханических элементах на частоту 5,8 ГГц представлен на рис. 17. Параметры фазовращателя приведены в табл. 4.

Таблица 3

Характеристики четырехрядного фазовращателя на основе SP4T МЭМ элементов

Центральная частота, ГГц	2,8
Рабочая полоса частот, МГц	200
Вносимые потери ($ S_{21} , S_{12} $) с полосковыми выводами, дБ	$1,2 \pm 0,2$
Вносимые потери ($ S_{21} , S_{12} $) с SMA выводами, дБ	$1,4 \pm 0,2$
Согласование (S_{11}, S_{22}), дБ	<-16
Дискрет по фазе, °	22,5
Число фазовых состояний	16
Абсолютная погрешность установки фазы, °	< ± 3
Время установки фазы, мкс	10
Непрерывная рабочая СВЧ мощность, мВт	100
Пиковая рабочая СВЧ мощность, мВт	1000
Средняя потребляемая мощность при частоте управления 1 кГц, мкВт	<15
Размеры платы с полосковыми выводами, мм*	$40 \times 30 \times 0,8$
Размеры платы с SMA выводами, мм*	$45 \times 30 \times 0,8$

* При необходимости размеры платы могут быть уменьшены в 2—3 раза.

Таблица 4

Характеристики трехрядного фазовращателя на основе SP4T МЭМ элементов

Центральная частота, ГГц	5,75
Рабочая полоса частот, МГц	300
Вносимые потери ($ S_{21} , S_{12} $) с полосковыми выводами, дБ	$1,2 \pm 0,25$
Согласование (S_{11}, S_{22}), дБ	<-15
Дискрет по фазе, °	45
Число фазовых состояний	8
Абсолютная погрешность установки фазы, °	< ± 3
Время установки фазы, мкс	10
Непрерывная рабочая СВЧ мощность, мВт	100
Пиковая рабочая СВЧ мощность, мВт	1000
Средняя потребляемая мощность при частоте управления 1 кГц, мкВт	<8
Размеры платы с полосковыми выводами, мм	$30 \times 24 \times 0,8$

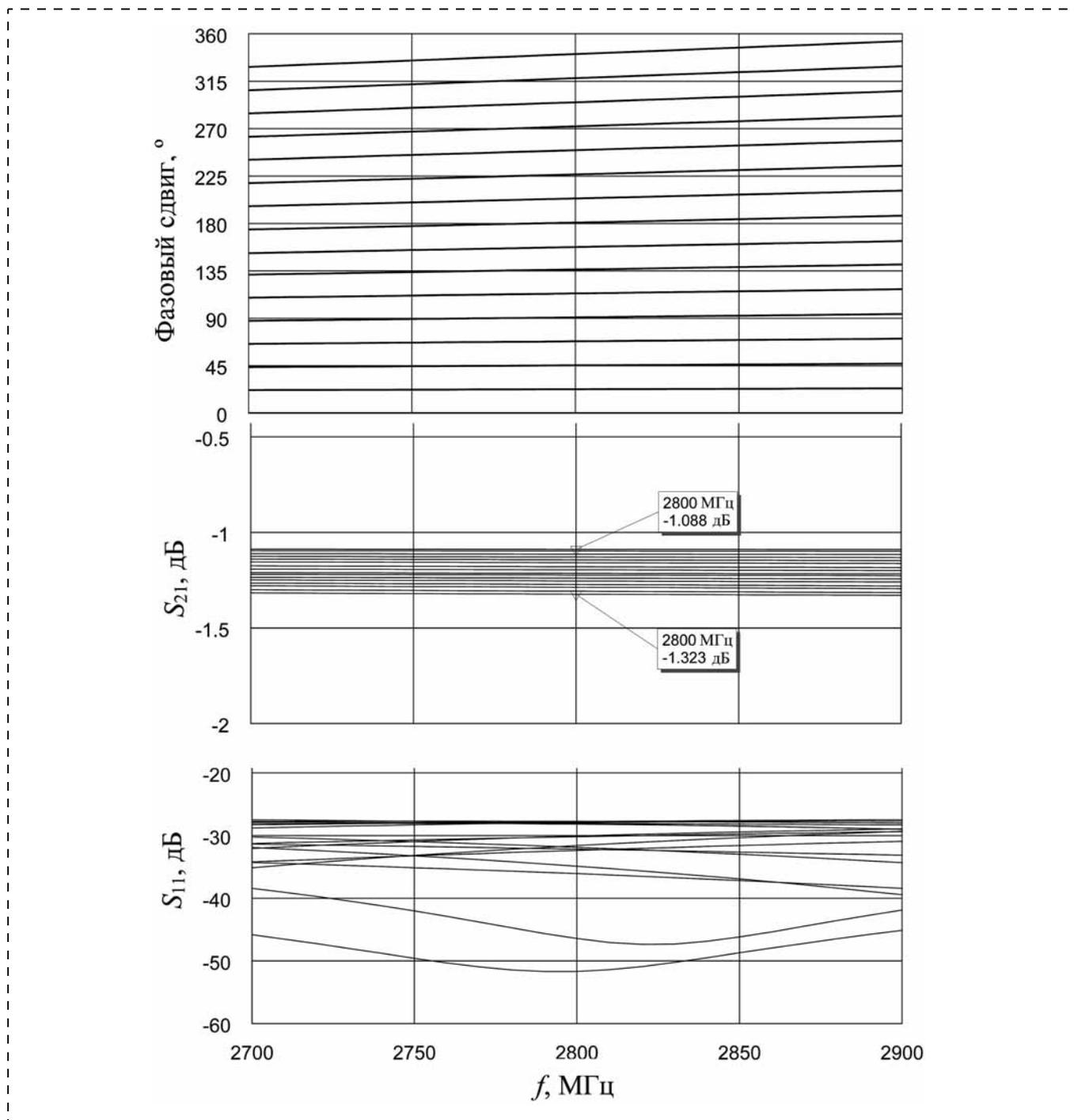


Рис. 15. Результаты моделирования характеристик фазовращателя

Разработанный и изготовленный в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" фазовращатель на микромеханических элементах на частоту 9 ГГц представлен на рис. 18.

МЭМ ФВ на частоту 9 ГГц представляет собой четырехслойную СВЧ плату, содержащую четыре SP4T МЭМ элемента (габаритные размеры с полосковыми выводами — $30 \times 24 \times 0,8$ мм). Плата изготовлена по технологии многослойных печатных плат из материала Rogers серии 4000. Использование че-

тырех слоев достаточно для реализации развязки СВЧ микрополосковых линий (слой 1) и подводящих линий подачи сигналов управления (постоянных или импульсных) от выводов управления ФВ к МЭМ элементам (слои 3 и 4). Слой 2 используется для подачи питания.

Плата содержит восемь переключаемых СВЧ микрополосковых линий различной электрической длины, коммутируемых четырьмя RMSW240 МЭМ элементами, работающими синхронно.

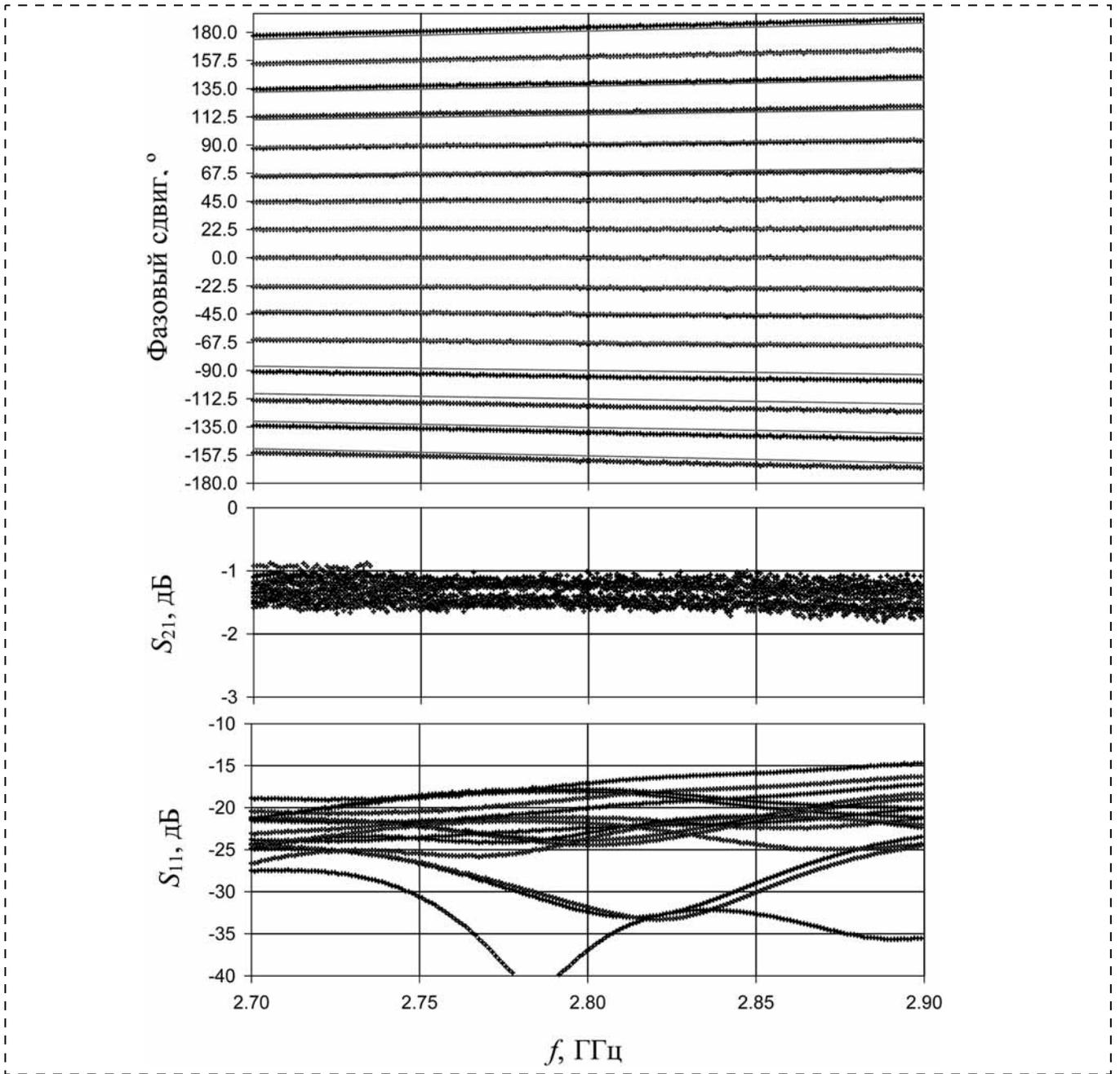


Рис. 16. Экспериментальные характеристики фазовращателя

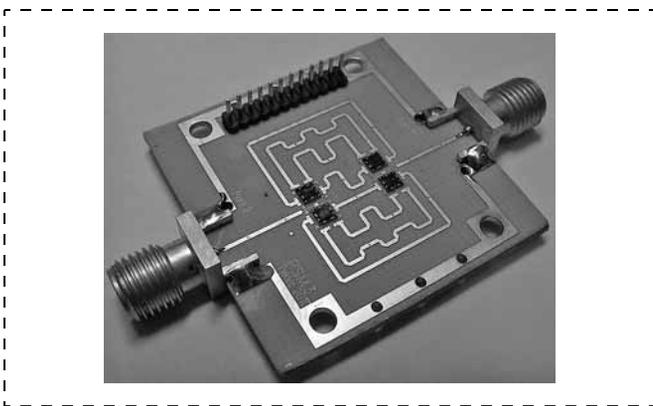


Рис. 17. Внешний вид фазовращателя на частоту 5,8 ГГц

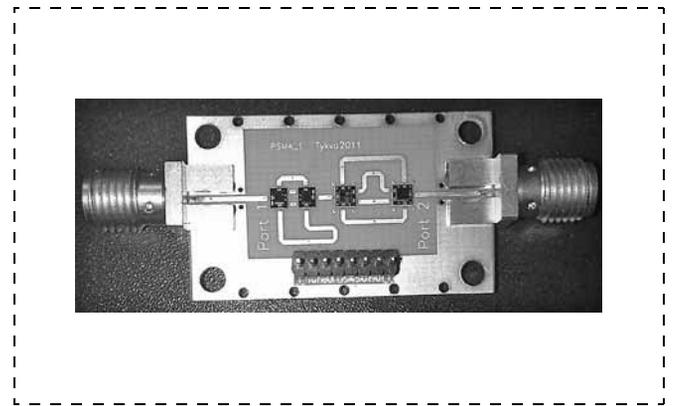


Рис. 18. Внешний вид фазовращателя на частоту 9 ГГц

Фазированные антенные решетки на основе фазовращателей на МЭМ ключах

В настоящее время на базе разработанных фазовращателей реализованы ФАР для частотных диапазонов 2,8, 5,6, 5,8 и 9,1 ГГц. В качестве иллюстрации конструктивной реализации на рис. 19 приведена ФАР для диапазона 9,1 ГГц. Основные характеристики антенны:

- рабочая частота 9,1 ГГц;
- угловой сектор электронного сканирования в азимутальной плоскости $\pm 45^\circ$
- коэффициент усиления не менее 20 дБи
- ширина диаграммы направленности (ДН):
 - в азимутальной плоскости 4°
 - в угломестной плоскости 30°
- точность установки положения ДН 2°
- уровень боковых лепестков (не более) 26 дБ
- поляризация Линейная
- допустимая мощность на входе 1,0 Вт

Экспериментальные исследования ФАР для подтверждения рассчитанных характеристик проводили на сканере ТМСА-18Б15 (рис. 20).

Выводы

Применение микроэлектромеханической элементной базы в СВЧ устройствах позволяет обеспечить ранее недостижимые технические параметры в отношении энергопотребления и устойчивости к внешним электромагнитным воздействиям. Перспективным материалом для реализации высокочастотных МЭМ ключей, работающих с мощными сигналами, является алмаз и алмазоподобные материалы. Проведенные исследования по использова-

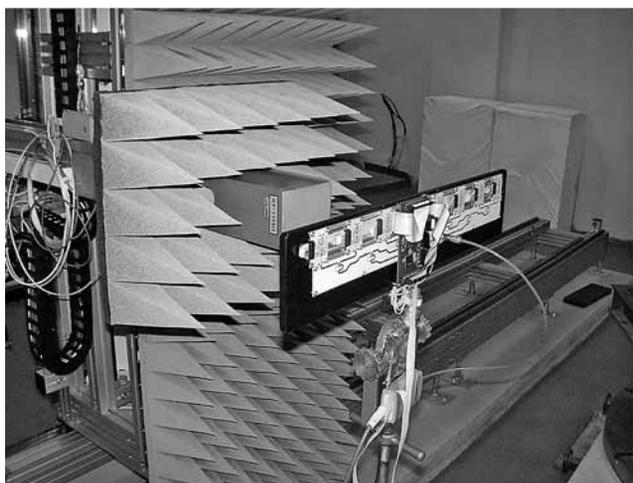
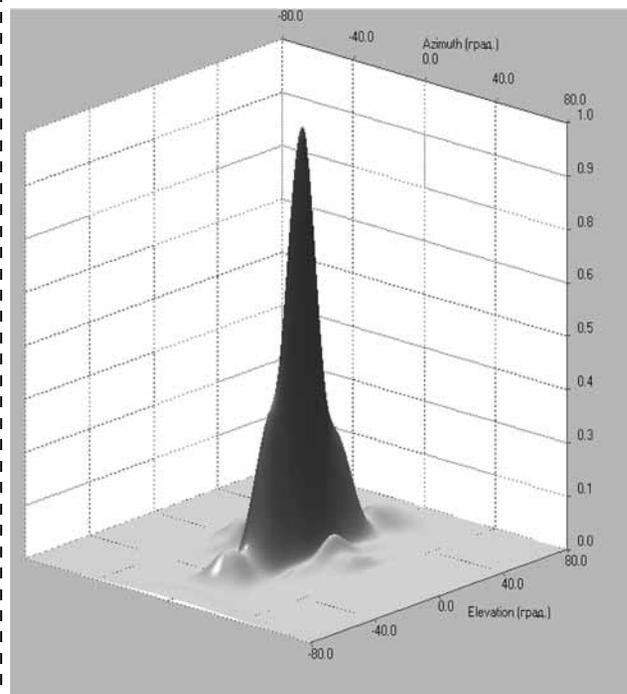
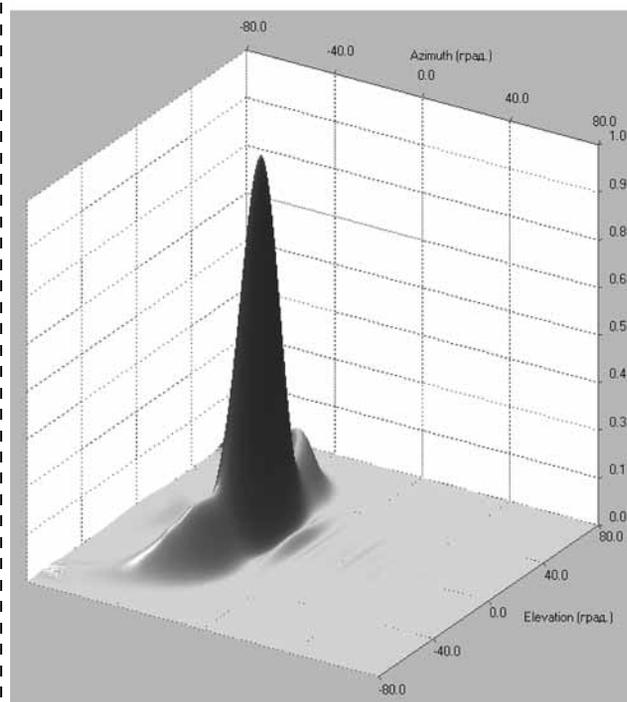


Рис. 19. Определение характеристик ФАР, созданной на фазовращателях с микроэлектромеханическими ключами



а)



б)

Рис. 20. Результаты экспериментального исследования ФАР на МЭМ ключах:

а — объемная диаграмма направленности ФАР для неотклоненного луча; б — объемная диаграмма направленности ФАР для отклоненного на -25° луча

нию таковых в МЭМ ключах показали возможность достичь технических параметров высокочастотных радиоэлектронных устройств, которые ранее не могли быть достигнуты на классической элементной базе. Полученная в ходе работы теоретическая база позволила разработать конструкцию высокочастотных мощных МЭМ ключей и создать технологию их производства. В то же время комплексный подход дал возможность для изготовления ключей в максимальном соответствии с требованиями к СВЧ фазовращателям и фазированным антенным решеткам на их основе для различных диапазонов волн.

Работа выполнена в рамках обеспечения ОКР "2012-2.3-16-523-0011-002", выполняемой ФГУП "НПП "Исток" по договору от 22.06.2012 № 16.523.11.3019 по ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2007—2013 годы", а также при поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации по теме "Физико-технологические основы формирования высокочувствительных нано- и микро-мембранных элементов", соглашение № 14.В37.21.0082,

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. Adamschik M., Ertl S., Schmid P., Kohn E. Electrostatic Diamond Micro Switch // Transducers 1999: Tenth International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers, 1999. Vol. 2. P. 1284—1287.
2. Ertl S., Adamschik M., Schmid P., Gluche P., Floter A., Kohn E. Surface Micromachined Microswitch // Diamond and Related Materials. 2000. Vol. 9. P. 970—974.
3. Adamschik M., Kusterer J., Schmid P., Schad K. B., Grobe P., Floter A., Kohn E. Diamond microwave micro relay // Diamond and Related Materials. 2002. Vol. 11. P. 672—676.
4. Kohn E., Adamschik M., Schmid P., Denisenko A., Aleksov A., Ebert W. Prospects of diamond devices // Journal of Physics D: Applied Physics. 2001. N 34. P. R77—R85.

УДК 621.317.39

П. В. Афанасьев, канд. техн. наук, нач. лаб.,
e-mail: cmid_leti@mail.ru,
Н. И. Бороденков, электроник 1 кат.,
О. С. Бохов, канд. техн. наук, нач. лаб.,
e-mail: nikitaborodenkov@rambler.ru,
В. В. Лучинин, д-р техн. наук, проф.,
Е. М. Устинов, инженер,
Р. В. Юдин, инженер, Санкт-Петербургский
государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ"

УЧЕБНИК РАБОТЫ ПИ ОИ ОЕИ ЕРП ААИ ЕА
И ЕЕРП ОНОРП ЕНОАА
Н РААЕТ ЕАИ АЕТ И

Поступила в редакцию 20.09.2012

Целью данной работы является иллюстрация возможности быстрого прототипирования сложного интегрированного изделия микротехники, включающего сенсорный и исполнительный, микропроцессорный модули, блок энергообеспечения и радиоканал. Базовыми критериями эффективности выполненной разработки являются, наряду с заданными функциональными характеристиками, такие параметры, как массогабаритные параметры и время реализации разработки.

Ключевые слова: интеграция, микросборка, СБИС, гибкая электроника

Современные тенденции развития микротехники могут быть определены в рамках следующих направлений:

- межвидовая интеграция в рамках создания гибридных систем, объединяющих электронные, механические, оптические компоненты;
- использование многослойных коммутационных систем с ориентацией на оптические каналы передачи информации;
- создание интегрированных систем на кристалле, объединяющих в твердом теле информационные, аналоговые подсистемы, в том числе реализуемые на различных физических принципах (электроника, оптоэлектроника, фотоника, магнитоэлектроника, микромеханика);
- повышение роли кремниевого субстрата как активной подложки-базиса для размещения бескорпусных электронных и оптических компонентов; развитие систем так называемого бесшаблонного синтеза изделий в рамках 2D- и 3D-интеграции с использованием для формирования коммутирующих, изолирующих и активных элементов струйных и лазерных методов "печати";
- формирование малогабаритных (настольных) технологических комплексов и роботизированных технологических линеек, интегрирующих совокупность процессов формирования базовых элементов с одновременной сборкой изде-

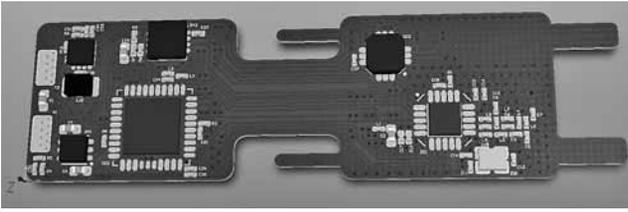


Рис. 1. Внешний вид печатной платы (3D-модель)

лий при использовании сверхпрецизионных систем позиционирования и ориентации.

В Центре микротехнологии и диагностики (ЦМИД) СПбГЭТУ был изготовлен макет сенсорного модуля с применением гибкой печатной платы (рис. 1) на основе полиимида. Минимальная площадь печатной платы была достигнута за счет применения многослойной структуры, при этом отдельные слои используются для трассировки общей шины (с разделением между цифровыми и аналоговыми цепями) и цепей питания.

Изготовление модуля проводилось в несколько этапов:

- монтаж корпусных радиоэлектронных компонентов;
- промывка в ультразвуковой ванне в очистительном составе;
- крепление и разварка бескорпусных радиоэлектронных элементов (чипов);
- предварительное тестирование устройства;
- заливка бескорпусных элементов защитным слоем компаунда;
- формовка и подключение источника питания и антенны;
- повторное тестирование устройства;
- заливка устройства конструкционным пенокомпаундом с низкой плотностью.

Некоторые из этапов сборки представлены на рис. 2—3.

Для достижения минимальных габаритных размеров и массы микромодулей с сохранением их функциональной насыщенности представляется целесообразным изготовление заказной большой интегральной микросхемы (БИС), которая интегрирует отдельные компоненты микромодуля (как пассивные, так и активные).

Разработка подобной БИС включала в себя следующие этапы:

- анализ функциональной схемы разрабатываемого устройства;
- выделение блоков схемы, которые могут быть реализованы в составе заказной микросхемы, анализ требований к ним:
 - точностные характеристики для аналоговых узлов;
 - временные характеристики для цифровых частей;
 - напряжения питания и токи потребления;

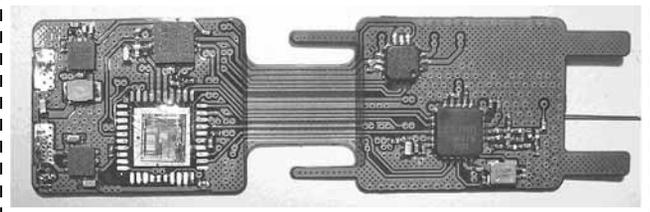


Рис. 2. Монтаж электронных компонентов

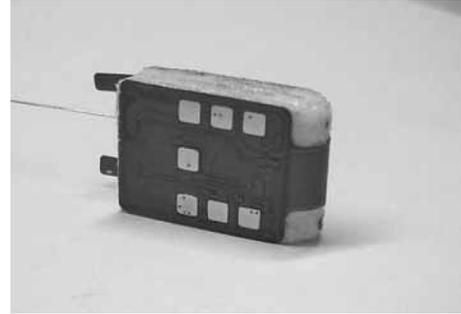


Рис. 3. Готовый модуль с интегрированным источником питания (после операции формовки и заливки)

— диапазоны напряжений и токов входных и выходных сигналов;

- анализ доступных технологий изготовления БИС:

— достижимые характеристики для аналоговых и цифровых частей;

— наличие доступных аналоговых и цифровых IP-блоков;

— первичная оценка стоимости разработки (трудозатраты, число масок техпроцесса, площадь кристалла, число выводов БИС);

- корректировка функциональной схемы разрабатываемого микромодуля и программного обеспечения с учетом реализации ее блоков в виде БИС;

- разработка БИС:

— разработка и моделирование аналоговых частей;

— разработка и моделирование цифровых частей;

— разработка топологии;

— верификация топологии, передача управляющей информации на завод-изготовитель.

В ЦМИД для микромодуля (рис. 4) была разработана аналого-цифровая БИС, структурная схема и топология которой приведены на рис. 5, 6.

В нее входят следующие составные части микромодуля (реализованные на начальном этапе на микросхемах средней степени интеграции):

- повышающий преобразователь постоянного тока (DC-DC);
- преобразователь напряжение—ток с аппаратным модулем генерации выходных импульсов тока и выходным аналоговым мультиплексором;
- программируемый усилитель;
- схема контроля работоспособности БИС.

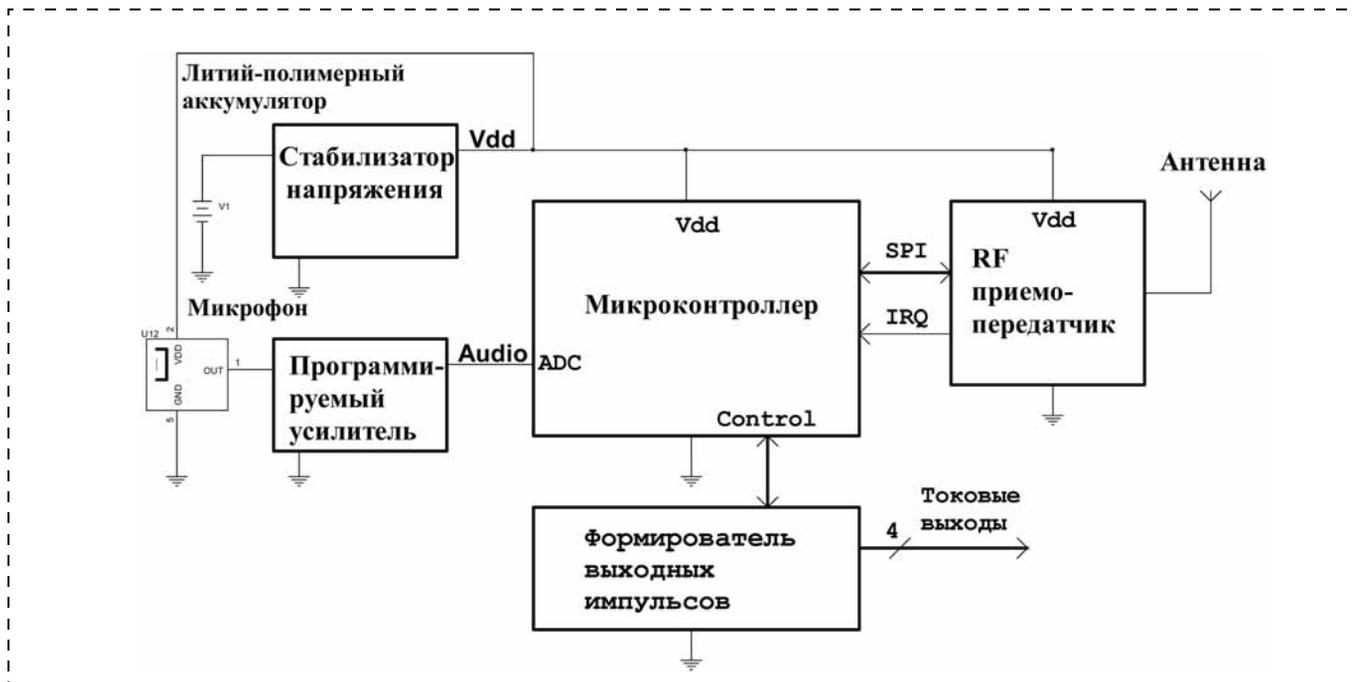


Рис. 4. Структурная схема микромодуля

БИС реализована по технологии CMOS с проектными нормами 0,35 мкм, имеет размеры кристалла $2,360 \times 2,575$ мм и массу 12 мг.

Применение разработанной БИС в составе микромодуля позволило уменьшить число его составных частей (полностью были исключены микросхемы

средней степени интеграции в корпусном исполнении) и снизить массогабаритные характеристики микромодуля.

Аппаратный исполнительный модуль генерации выходных импульсов тока в составе БИС позволяет уменьшить нагрузку на микроконтроллер

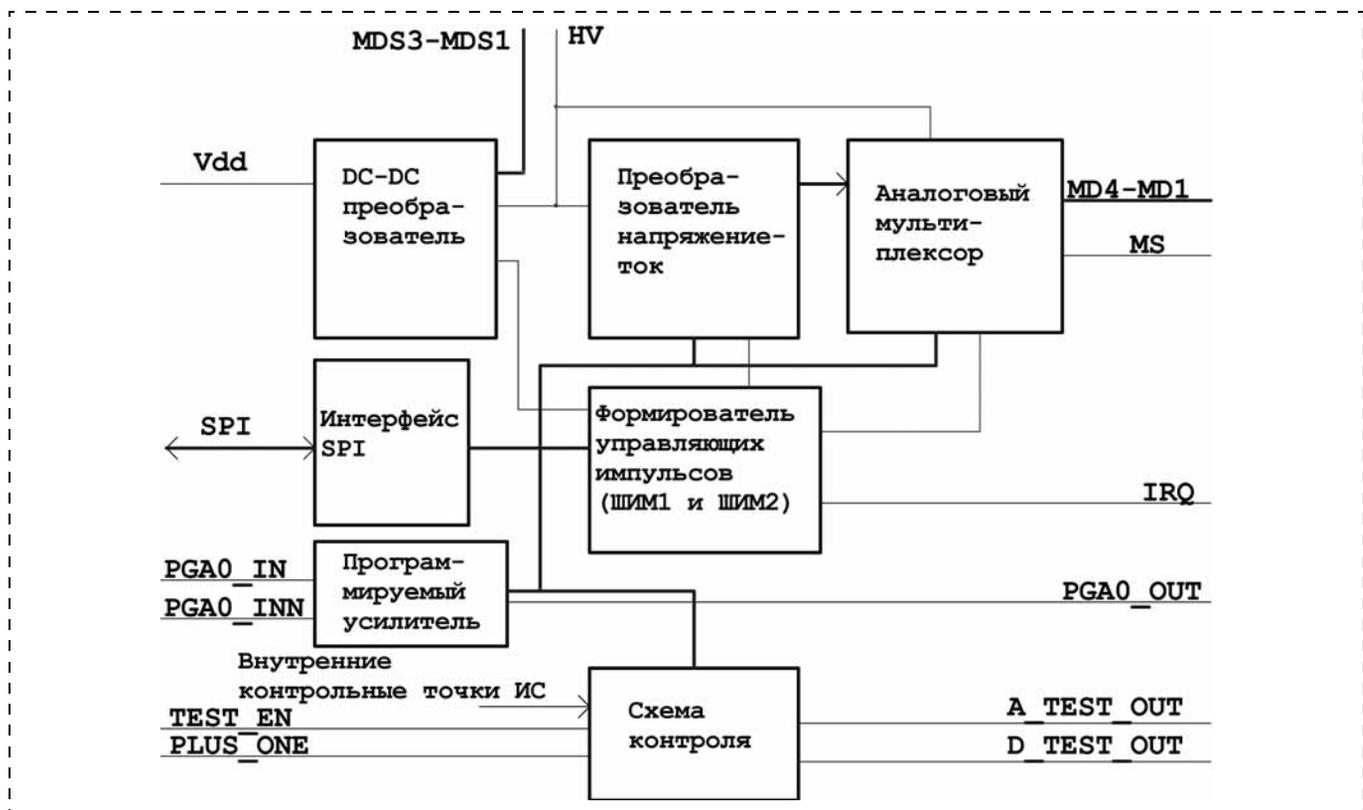


Рис. 5. Структурная схема БИС

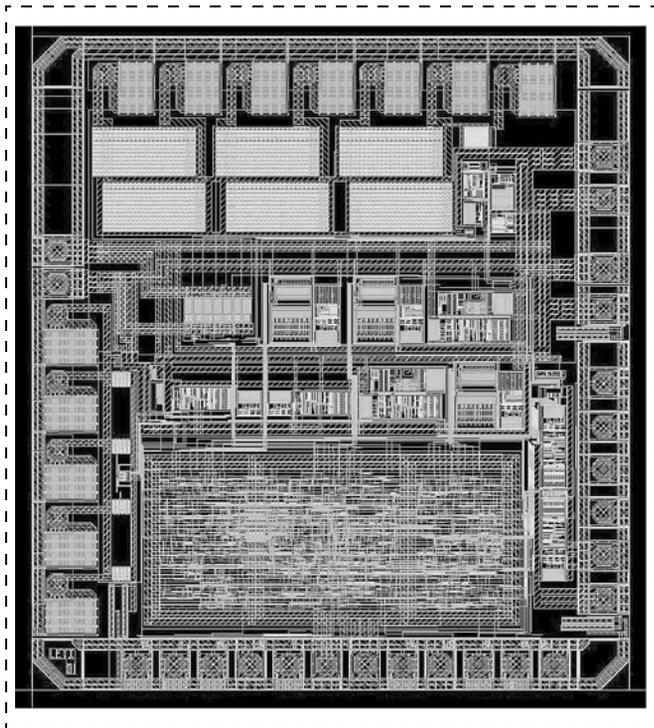


Рис. 6. Топология БИС

микромодуля (в исходном варианте генерация импульсов тока выполнялась программно) и перенаправить его вычислительные мощности на реализацию других функций микромодуля (например, сжатия и шифрования данных).

Анализ динамики развития процессов экспресс-прототипирования интегрируемых изделий микротехники показывает, что основными базовыми операциями, используемыми в современных технологических комплексах и роботизированных технологических линиях быстрого прототипирования и

мелкосерийного изготовления изделий микротехники, являются: локальные струйное и лазерное осаждение, лазерное и ионное травление, импринт литография, ламинирование, 2D- и 3D-сборка.

При экспресс-реализации многофункциональных интегрированных изделий микротехники экспресс-методами необходимо учитывать ряд особенностей:

- обеспечение функционального назначения за счет возможности интеграции электронных, оптических и механических компонентов;
- гибкость в организации технологических маршрутов, определяемая широтой номенклатуры технологических модулей и их высокой степенью автоматизации, обеспечивающая динамичность перестройки и быстроту адаптации;
- экспресс-прототипирование технологически сложных многофункциональных изделий в рамках имеющейся базы технологических операций и развитой системы технологической поддержки с использованием систем автоматизированного проектирования изделий и технологических процессов;
- минимизация затрат на стадию прототипирования и выпуска мелких серий разнообразной продукции за счет высокой степени автоматизации оборудования и минимизации роли человеческого фактора;
- возможность реализации технологического процесса в чистых помещениях со средним классом чистоты, что снижает затраты на создание инженерно-инфраструктурного обеспечения и обслуживание.

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.

Luchinin V. V. *Micro- and Nanotechnics. Technologies of Excellence* 2

Analysis of technologies of excellence as an intellectual basis for the new technological setup is discussed. The main evolutionary trends of materials science basis as a platform of the technologies of excellence development are described within the aspect of "Micro- and nanotechnics".

Keywords: micro- and nanotechnics, technologies of excellence, technological setup, convergent systems, bi-ionic technologies

Goloudina S. I., Luchinin V. V., Pasyuta V. M., Krishtab M. B., Panov M. F., Rozanov V. V., Sklizkova V. P., Kudryavtsev V. V., Baklanov M. R. *Structural Features and Prospective Applications of Langmuir—Blodgett Films of a Rigid-Chain Polyimide* 9

Langmuir—Blodgett multilayer films of rigid-rod polyimide based on polyamic acid (PAA BPDA-oTD) alky-lamonium salt has been studied by reflection ellipsometry, atomic force microscopy, small-angle X-ray scattering and X-ray reflectivity. It was shown that nanosized polyimide films can be effectively used for precise reducing the internal stress of the bilayer membrane "silicon nitride-polyimide". Modification of SiO₂ electret by the polyimide films (2—5 nm) leads to high charges stability. High pore sealing capability of polyimide films has been also demonstrated.

Keywords: polyimide, Langmuir—Blodgett, membrane, pore sealing

Zimina T. M., Muratova E. N., Spivack Ju. M., Drozd V. E., Romanov A. A. *Formation Technologies and Applications of Nanolayers and Nanoporous Compositions of Al₂O₃ for Micro- and Nanoequipment* 15

The key technological approaches of formation of aluminum oxide nanolayers and compositions with different characteristics have been considered. They include atomic layer deposition, anodization and electrochemical etching. Presented a brief review on essential application fields of aluminum oxide in a form of nanolayer compositions, metal modified nanopore compositions and macropore systems.

Keywords: nanolayers of aluminum oxide, porous anodic aluminum oxide, atomic-molecular chemical assembly, electrochemical anodization, biosensor, lab on a chip

Efremenko A. M., Korlyakov A. V., Astashenkova O. N., Krivosheeva A. N. *Low-Temperature Synthesis of Aluminium Nitride Textured Films on Heterogeneous Waters for MEMS Devices*. 25

The results of the study of processes of aluminum nitride films obtaining by if magnetron sputtering are submitted in this article. It is shown the influence of the main process parameters on the properties of the resulting films, including the influence of the electric field produced by an uncompensated charge on the surface of the growing film AlN. A mechanism of residual stress emergence in AlN films by ion-plasma deposition is proposed.

Keywords: thin film, aluminum nitride, texture, magnetron sputtering, mechanical stress, piezoelectric films

Zimina T. M., Soloviev A. V., Luchinin V. V., Nicolaev B. P. *Express Methods for Investigation of Size, Mobility and Aggregation Stability of Magnetic Nanoparticles in Capillary Microchip* 30

The results on magnetite (Fe₃O₄) magnetic nanoparticles (MNP) study by using optical express-methods of characterization in a capillary chip with composite lane magnetic guide. Size and magnetophoretic mobility of MNP were measured using quasielastic light scattering in homo-dyne and heterodyne modes, correspondingly, and aggregation stability — by using the method of dynamic microturbidimetry. Comparative study of characteristics of magnetite MNPs, synthesized by direct and microemulsion methods demonstrated that the latter method gives aggregation-stable nanoparticles of 10 nm size and with magnetophoretic mobility value of about $4 \cdot 10^{-13} \text{ m}^3 \times (\text{T} \times \text{A} \times \text{s})^{-1}$. It has been shown that developed express-methods enable a rapid (about 0,5—3 min) measurements of MNP properties to be carried out by using micro volumes of samples (1—2 μl) without dilution (in suspensions of up to 10 % volume concentration).

Keywords: magnetic nanoparticles, capillary chip, quasielastic light scattering in capillary, microturbidimetry, magnetophoresis in capillary

- Kuznetsova M. A., Luchinin V. V.** *Focused Ion Beam Machining of SiC Field Emitters* 35
The results of analysis of possibilities and limitation on focused ion beam application for microsystem objects and various investigation methods are represented in the paper. The peculiarities of focused ion beam technique' and its application for formation of SiC field emitters were analyzed.
Keywords: silicon carbide, focused ion beam, field emission, diode, ion beam etching, ion beam deposition
- Korlyakov A. V.** *Analogue Method for Complex Analysis and Micro Systems Elements Modelling* 41
We consider a method of describing microsystems in a generic parameter. The tables analogies potential and kinetic parameters of the systems of different physical nature. The features of circuit description of microsystems in lumped parameters by analogy ideal elements for a variety of physical systems. Gives examples of arrangements of analog converters for different elements of microsystems.
Keywords: analogue method, microsystem, converter, equivalent circuit, gyrators, membrane element
- Vetrov A. A., Korlyakov A. V., Sergushichev A. N., Sergushichev K. A.** *Calculation and Measurements of Dynamic Parameters Nanoscale Vibrations of Micromembrane Elements* 48
Amathematical model and computation results of micromembrane elements, manufactured by MEMS technology. Arepresented an experimental setup, based on a fiber-optic interferometer Fabry—Perot for precision non-contact sensitivity measurements of micromembrane elements is developed. The methodology for measurements of AFC of sensitivity is proposed and experimental results are presented.
Keywords: micromembraneelement, mathematical model, sensitivity, resonance frequency, optoelectronic measurement system, fiber-optic interferometer
- Bokhov O. S., Spivak A. M., Orekhov Yu. A.** *Miniature Navigation and Orientation Integrated Modules Based on Microelectromechanical Systems* 55
There is described application of microelectromechanical systems for miniature inertial navigation and orientation modules to achieve improvement in mass and dimension characteristics as well as decreasing of power consumption. In same time the integration approach gives possibility to design devices with technical characteristics that is comparable with systems based on laser gyroscopes. Also those devices can provide some additional characteristics like that: time of cold start; acceleration robustness e.t.c.
Keywords: navigation, MEMS, accelerometer, gyroscope
- Bochov O. S., Dukhnovsky M. P., Kozyrev A. B., Korlyakov A. V., Korolev A. N., Lagosh A. V., Luchinin V. V., Toptalov S. I.** *Low-Power Consumption Small-Sized Radiofrequency Modules Based on RF MEMS Switch* 60
In this paper, the peculiarities of the MEMS switch constructions with the different principles of the operation have been considered. The MEMS switches have been designed. Also, the peculiarities of the microwave MEMS switches with the use of diamond-like materials have been considered. Furthermore, the switch models have been developed and the comprehensive analysis of their characteristics has been carried out. As a result, the phase shift modules based on the MEMS switches for phased arrays have been manufactured. In addition, the phased arrays for different frequency ranges have been worked out.
Keywords: MEMS switch, phase shifters, phased arrays, diamond-like materials
- Afanasyev P. V., Borodnikov N. I., Bokhov O. S., Luchinin V. V., Ustinov E. M., Udin R. V.** *Express Prototyping of Microdevices with RF Channel* 71
The goal of this paper to show the possibility of rapid prototyping of complex integrated microsystem device with sensor and actuator, microcontroller, energy sell, RF channel. The main principle of estimation of present work efficacy on one hand is the mass of device and the time for prototyping and on another hand is the complexity of device functions.
Keywords: integration, microassembling, ASIC, flexible electronic

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

- Вернер В. Д., Мальцев П. П., Сауров А. Н. МЭМС и третья индустриальная революция № 11
- Лучинин В. В. Микро- и нанотехника. Технологии превосходства № 12
- Раткин Л. С. Отечественные и зарубежные нанотехнологические научные школы, взаимодействующие с Российской академией наук № 7
- Шубарев В. А., Меткин Н. П., Весничева М. В. Научно-техническая программа Союзного государства "Микросистемотехника" — основа создания нового поколения микросистемотехники и унифицированных интегрированных систем двойного назначения на ее основе № 8

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

- Агеев О. А., Ильин О. И., Коломийцев А. С., Коноплев Б. Г., Рубашкина М. В., Смирнов В. А., Федотов А. А. Определение геометрических параметров массива вертикально ориентированных углеродных нанотрубок методом атомно-силовой микроскопии № 3
- Александров П. А., Баранова Е. К., Баранова И. В., Бударагин В. В., Литвинов В. Л., Свечников А. Б. Отличия воздействия излучения на наноэлектронные материалы, приборы, схемы и на их микроэлектронные аналоги № 4
- Воробьева А. И., Шулицкий Б. Г. Формирование массивов углеродных трубок на металлических электродах с использованием пористого оксида алюминия № 11
- Глухова О. Е., Жничков Р. Ю., Слепченко М. М. Программный комплекс для наноэлектроники № 1
- Глухова О. Е., Колесникова А. С. Стабильность тонких углеродных бамбукоподобных нанотрубок № 2
- Дайнеко С. В., Артемьев М. В., Набиев И. Р., Тедорадзе М. Г., Чистяков А. А. Солнечные ячейки на основе гибридных гетероструктур из органических полупроводников и квантовых точек № 9
- Ерофеев А. С., Зофов Д. А., Яминский И. В., Киселев Г. А. Нановзвешивание и наномера № 2
- Ерошкин П. А., Романько В. А., Шешин Е. П. Мало-мощные рентгеновские трубки с автоэмиссионным катодом на основе наноструктурированных углеродных материалов № 9
- Жирикова З. М., Козлов Г. В., Алоев В. З. Зависимость степени усиления полимерных наноконфигуратов от геометрии углеродных нанотрубок (нановолокон) № 5
- Карташев В. А. Визуализация рельефа поверхности в зондовой микроскопии № 10
- Колешко В. М., Полинкова Е. В., Хмурочич Н. В., Чащинский А. С. Нанотехнология металлического водорода: Моделирование ЭЛИТ-синтеза. Часть 1 № 5
- Коростелев В. Ф., Хромова Л. П., Большаков А. Е. Формирование наноструктуры, армированной квазикристаллическими фазами, в целях улучшения физико-механических свойств сплава В96Ц № 9
- Мальшев К. В. Зондовый диэлектрофорез наночастиц в жидкости № 2
- Мальцев П. П., Бочаров Л. Ю. Характеристика состояния и хода реализации американской про-

граммы исследований и разработок в области нанотехнологий № 3

- Раткин Л. С. Нанотехнологические школы России: этапы становления и международная кооперация № 4
- Раткин Л. С. Проблемы и перспективы развития нанотехнологий в России № 1
- Яшин К. Д., Терпинская Т. И., Осипович В. С., Лемеш Р. Г., Жавнерко Г. К., Зильберман Р. Д., Петрович В. С. Технология создания медицинской нанобиоинформационной диагностической системы на полупроводниковых нанокристаллах № 4

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ

- Амеличев В. В., Буданов В. М., Гусев Д. В., Михайлов Ю. А., Соколов М. Э., Суханов В. С., Тихонов Р. Д. Конструкция и технология создания матриц преобразователей давления для эндоскопических тактильных датчиков № 11
- Бахвалова Т. Н., Белкин М. Е. Моделирование фотонно-кристаллического спектрального демультимплексора № 1
- Белогуров Е. А., Шукевич Я. И., Баркалин В. В., Хатько В. В., Гаратын И. А. Конечно-элементное моделирование термомеханических свойств нанопористых материалов № 1
- Бузановский В. А. Анализ конструкционных и метрологических характеристик газовых наносенсоров с чувствительными элементами на основе углеродных нанотрубок № 7
- Ветров А. А., Корляков А. В., Сергушичев А. Н., Сергушичев К. А. Расчет и измерения динамических параметров наноразмерных колебаний микромембранных элементов № 12
- Галисулганов А. Т., Дзюбаненко С. В., Игнатьев В. С., Силаков Д. М., Калинин В. А. Акустоэлектронные датчики силы в системах безопасности гидроагрегатов ГЭС № 8
- Глухова О. Е., Коссович Е. Л. Явные модели распространения краевых волн в многослойных графеновых пластинах № 5
- Голоденко Б. А., Голоденко А. Б. Фрактальное моделирование механизма порождения аморфности тетраэдрической атомной структуры № 11
- Гребенников Е. П., Адамов Г. Е., Порошин Н. О., Курбангалеев В. Р., Орлов Ю. С., Мальшев П. Б., Шмелин П. С. Конструктивно-технологические решения создания оптических многослойных 3D-структур для перспективных информационных систем № 2
- Григчин В. А., Лобач О. В. Калибровка термодатчика сенсора плотности теплового потока № 9
- Деспотули А. Л., Андреева А. В. Компьютерное моделирование на субнанометровом масштабе ионотранспортных характеристик блокирующих гетеропереходов электронный проводник/твердый электролит № 11
- Деспотули А. Л., Андреева А. В. Модель, метод и формализм нового подхода к описанию процессов ионного транспорта на блокирующих гетеропереходах твердый электролит/электронный проводник № 9
- Ефимов В. В., Калинин В. А., Лихошерст В. В., Матвеев В. В., Распопов В. Я. Информационно-аналитическое обеспечение начальных этапов проектирования микромеханических гироскопов и акселерометров № 1
- Корляков А. В. Метод аналогий при комплексном анализе и моделировании элементов микросистем № 12
- Мальшев К. В. Терагерцовый квантовый каскадный лазер на квазипериодических сверхрешетках № 11

- Михайлов А. Н., Берлик С. А., Михайлов Е. А. Методология автоматизированного контроля параметров датчиков изделий микросистемотехники. . . . № 8
- Печерская Е. А., Метальников А. М., Вареник Ю. А., Бобошко А. В. Метод измерения тока переключения и диэлектрических параметров сегнетоэлектриков. . . . № 1
- Саханский С. П. Модель управления формой при выращивании монокристаллов германия. . . . № 6
- Таратын И. А., Сердюк И. В., Смирнов М. С., Гринчук А. П. Датчики пожарных извещателей на основе низкоэнергетотребляющих газовых сенсоров для раннего предупреждения возгораний . . № 8
- Тимошенко С. П., Калугин В. В., Кочурина Е. С., Анчутин С. А., Калинин В. А., Строганов К. А. Микроакселерометры на различные диапазоны измерения линейных ускорений для систем инерциальной навигации № 8
- МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ**
- Абросимова Н. Д., Смолин В. К. Повышение информативности эллипсометрических измерений параметров гетероструктур "кремний-на-диэлектрике" № 9
- Аваков С. М., Агейченко А. С., Зуев В. П., Корнелюк А. И., Матюшков В. Е., Самохвалов В. К., Тоцицкий Я. И., Трапашко Г. А., Барышников Д. П., Русецкий В. А. Специализированное оптико-механическое и контрольно-измерительное оборудование для промышленного производства изделий микросистемотехники № 8
- Аверин И. А., Александрова О. А., Мошников В. А., Печерская Р. М., Пронин И. А. Типы фазового распада растворов полимеров. . . . № 7
- Аверин И. А., Губич И. А., Печерская Р. М. Формирование и исследование пористых оксидных пленок на алюминии № 6
- Аверин И. А., Мошников В. А., Пронин И. А. Особенности созревания и спинодального распада самоорганизующихся фрактальных систем. . . . № 5
- Агасиев А. А., Магеррамов Э. М., Ахундов Ч. Г., Мамедов М. З., Сармасов С. Н. Электропроводность в дисперсных металлических пленках № 10
- Акопян В. А., Захаров Ю. Н., Матвеев С. Ю., Панич А. А., Рожков Е. В. Анализ стабильности электрофизических характеристик пьезокерамик различных составов, используемых для пьезоэлектрических генераторов повышенной мощности . . № 1
- Антипов А. А., Аракелян С. М., Кутровская С. В., Кучерик А. О., Макаров А. А., Осипов А. В., Зимин С. П. Лазерное получение коллоидных систем из наночастиц халькогенидов свинца и их осаждение на подложку с использованием капельной технологии № 11
- Барбарчук Д. В., Клим О. В., Мазовка Т. Е., Ковальчук Г. Ф., Ковенский А. Е., Царюк А. В., Циркун Д. П., Школьник С. Б., Барышников Д. П., Шубарев В. А. Оборудование для сборки изделий микросистемотехники. . . . № 8
- Бугаев А. С., Галиев Г. Б., Мальцев П. П., Пушкарев С. С., Федоров Ю. В. Полупроводниковые гетероструктуры InAlAs/InGaAs с метаморфным буфером $\text{In}_x(\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y})_{1-x}\text{As}$: конструкция, технология, применение № 10
- Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А., Мальцев П. П. Детектирование в терагерцовом диапазоне. . . . № 2
- Гавриленко В. П., Зайцев С. А., Кузин А. Ю., Новиков Ю. А., Раков А. В., Тодуа П. А. Эллипсометрическая характеристика структур Si—SiO₂. . . . № 2
- Гареев К. Г., Грачева И. Е., Казанцева Н. Е., Лучинин В. В., Мошников В. А., Петров А. А. Исследование продуктов золь-гель-процессов в многокомпонентных оксидных системах, протекающих с образованием магнитных нанокмозитов № 10
- Гетьман С. В., Алексеев С. А., Пинаев В. В., Дзюбаненко С. В. Технология корпусирования кристалла ПАВ-метки для систем радиочастотной идентификации для авто- и железнодорожного транспорта № 11
- Глухова О. Е., Шунаев В. В. Исследование прочности на разрыв моно- и бислойного графена. . . . № 7
- Голоудина С. И., Лучинин В. В., Пасюта В. М., Криштаб М. Б., Панов М. Ф., Розанов В. В., Склизкова В. П., Кудрявцев В. В., Бакланов М. Р. Особенности строения и перспективы использования пленок Ленгмюра—Блоджетт жесткоцепного полиимида. . . . № 12
- Данила А. В., Горнев Е. С., Шамирян Д. Г., Гуцин О. П., Красников Г. Я. Технология формирования металлического затвора для КМОП-маршрута с минимальным размером 45 нм № 5
- Еремкин В. В., Галий И. В., Нагаенко А. В., Панич А. А., Смотраков В. Г., Филиппов С. Е., Шилкина Л. А. Низкотемпературное спекание пьезокерамики ЦТС, предназначенной для монокристаллических многослойных актюаторов № 6
- Ефременко А. М., Корляков А. В., Астапенкова О. Н., Кривошеева А. Н. Низкотемпературный синтез текстурированных пленок нитрида алюминия на инородных подложках для устройств микросистемной техники. . . . № 12
- Заярский Д. А., Портнов С. А., Горин Д. А. Формирование покрытий на основе микрочастиц трис(8-гидроксихинолина) алюминия с наноразмерной полиэлектролитной оболочкой методом электрофоретического осаждения № 5
- Зимица Т. М., Муратова Е. Н., Спивак Ю. М., Дрозд В. Е., Романов А. А. Технологии формирования и применение нанослоев и нанопористых композиций Al₂O₃ для микро- и нанотехники. . . № 12
- Зимица Т. М., Соловьев А. В., Лучинин В. В., Николаев Б. П. Экспресс-методы исследования размера, подвижности и агрегационной устойчивости магнитных наночастиц в микрокапиллярном чипе. . № 12
- Ичкитидзе Л. П., Рындина Т. С., Селищев С. В., Пономарева О. В., Табулина Л. В., Шулицкий Б. Г., Галперин В. А., Шаман Ю. П., Благов Е. В. Объемный композитный наноматериал на основе белка и углеродных нанотрубок. . . . № 3
- Ковалевский А. А., Цыбульский В. В., Власукова Л. А., Строгова А. С., Лученок А. Р., Шевченко А. А. Наноразмерный дисилицид титана: синтез, структура, свойства № 5, 6
- Кузнецова М. А., Лучинин В. В. Формирование карбидокремниевых автоэмиссионных острий методом острогофокусированного ионного пучка № 12
- Лу П., Иванец В. А., Семеновская Т. В., Плуготаренко Н. К. Исследование влияния структуры пленок серебросодержащего ПАН на их газочувствительность с применением теории самоорганизации, теории информации и атомно-силовой микроскопии № 5
- Морозов А. И., Сигов А. С. Перемагничивание электрическим полем в двухслойной структуре ферромагнетик — магнитоэлектрик № 10
- Морозов О. В., Постников А. В., Амиров И. И., Кальнов В. А. Изготовление микророботов механических устройств на основе технологии формирования изолированных блоков в пластине кремния. . . . № 7

Мустафаев А. Г., Савинова А. М., Мирзаева П. М. Управление технологическим процессом формирования структур интегральных элементов № 3

Назарова Т. Н., Сергиенко Д. В., Петров В. В., Кравченко Е. И. Исследование физико-химических, электрофизических свойств и газочувствительных характеристик нанокompозитных пленок состава SiO_2ZrO_x № 2

Раткин Л. С. Современные технологии производства МЭМС № 3

Самойлович М. И., Талис А. Л. Кристаллические мультиферроики и симметричные особенности их магнитных подсистем № 1

Смолин В. К., Качемцев А. Н., Киселев В. К. Физические принципы технологии элементов перспективной энергонезависимой памяти. № 7

Тимошенко С. П., Гаев Д. С., Бойко А. Н., Горшкова Н. М. Применение пористого кремния при создании газопоглощающих структур в составе МЭМС № 2

Ткачева А. А. Плазменное травление GaN и его твердых растворов: достижения и перспективы. № 6

Фетисов Л. Ю. Резонансный магнитоэлектрический эффект в композитной структуре кварц — ферромагнетик № 6

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Акопьян В. А., Захаров Ю. Н., Панич А. Е., Паринков И. А., Рожков Е. В., Шевцов С. Н. Эффективность пьезоэлектрических генераторов кантилеверного типа. Теоретические оценки и экспериментальные результаты № 3

Афанасьев П. В., Бороденков Н. И., Бохов О. С., Лучинин В. В., Устинов Е. М., Юдин Р. В. Экспресс-прототипирование микроустройства с радиоканалом № 12

Афонин С. М. Характеристики многослойных пьезоактюаторов нано- и микроперемещений с параллельным и кодовым управлением № 4

Бабуров В. А., Павлов А. Ю. Исследование и разработка прецизионных конденсаторов, работающих в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн № 10

Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е., Васильев В. А. Повышение виброустойчивости тонкопленочных нано- и микроэлектромеханических систем и датчиков давления на их основе № 1

Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е., Васильев В. А. Повышение стабильности тонкопленочных нано- и микроэлектромеханических систем датчиков давления для систем измерения, контроля и диагностики технически сложных объектов № 4

Благов Е. В., Аравин В. В., Амеличев В. В., Гаврилов Р. О. Интегрированная наноэлектромеханическая система параметров движения № 2

Бохов О. С., Духновский М. П., Козырев А. Б., Корляков А. В., Королев А. Н., Лагош А. В., Лучинин В. В., Топталов С. И. Низкопотребляющие малогабаритные радиотехнические модули на основе микроэлектромеханических ключей № 12

Бохов О. С., Спивак А. М., Орехов Ю. А. Миниатюрные навигационно-ориентационные интегрированные модули на основе микроэлектромеханических систем № 12

Бурлаков И. Д., Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Григиченко Л. Я. Детекторы ультрафиолетового диапазона на основе $p-i-n$ структур из соединения AlGaIn № 6

Бурлаков И. Д., Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Журавлев К. С. Детекторы ультрафиолетового диа-

пазона на основе контакта металл — полупроводник из соединения AlGaIn № 7

Войцеховский А. В., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А., Несмелов С. Н., Дзядух С. М. Фотоприемники и фотоприемные устройства для спектрального диапазона 0,19...1,1 мкм на фотодиодах из кремния и твердых растворов InGaIn № 6

Войцеховский А. В., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А., Несмелов С. Н., Дзядух С. М. Лавинные диоды, диоды с барьером Шоттки и приборы с зарядовой связью на основе кремния для фотоприемников и фотоприемных устройств видимого и ближнего инфракрасного диапазонов № 7

Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А., Мальцев П. П. Типы детекторов терагерцового излучения № 3

Вопилкин Е. А., Климов А. Ю., Рогов В. В., Шулепова И. Ю., Прякин Д. А., Гусев С. А., Скороходов Е. В., Шашкин В. И. Микроэлектромеханический туннельный датчик для виброакселерометра № 5

Глухова О. Е., Колесникова А. С. Эмиссионные свойства бамбукоподобных тубулярных нанозмитеров № 10

Годовицын И. В., Амеличев В. В., Панков В. В., Сауров А. Н. Миниатюрный тензорезистивный преобразователь давления с высокой чувствительностью № 6

Драгунов В. П., Доржиев В. Ю. Микроэлектромеханический генератор на основе дубликатора Беннета № 11

Итальянцев А. Г., Шульга Ю. В., Фетисов Ю. К., Чашин Д. В. Датчик постоянного магнитного поля на основе пьезоэлектрического преобразователя и многовиткового контура с током. № 6

Ичкитидзе Л. П., Миронюк А. Н. Топологический наноструктурированный пленочный сверхпроводниковый трансформатор магнитного потока. № 1

Королева В. А., Болтунов Д. В., Жуков А. А. Оценка характеристик микроразмерных слоистых исполнительных элементов устройств микросистемной техники № 4

Кухаренко Б. Г., Пономарев Д. И. Дистанционный манипулятор на основе MEMS-акселерометра в качестве чувствительного элемента. № 2

Лысенко И. Е., Рындин Е. А., Дудин Н. К. Устройства обработки сигналов емкостных преобразователей микроэлектромеханических компонентов. № 7

Матюшкин И. В. Оценка времени деградации заряда на нанокристаллах Si в элементах флэш-памяти. № 3

Распопов В. Я., Иванов Ю. В., Парамонов П. П., Сабо Ю. И., Матвеев В. В., Шведов А. П. Резервная бесплатформенная система ориентации на отечественной измерительной базе. № 11

Самойлович М. И., Ринкевич А. Б., Бовтун В., Белянин А. Ф., Кемпа М., Нужный Д., Цветков М. Ю., Клещева С. М. Оптические, магнитные и диэлектрические свойства опаловых матриц с заполнением межсферических нанополостей редкоземельными манганитами. № 10

Смахтин А. П., Чуян Р. К. Экспериментальное исследование рабочих характеристик полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей энергии при монохроматическом облучении. № 5

Смолин В. К. Мемристоры — перспективная элементная база микро- и наноэлектроники № 10

Соловьев А. Н., Алексеев В. Е. Безгироскопная инерциальная система на основе акселерометров № 4

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

- Алфимов С. М.** Микроробототехника специального назначения: состояние и тенденции развития. № 3
- Атапин В. Э., Байков С. С., Кузьмина И. В.** Метод и устройство для регистрации акустических волн. № 7
- Бубнов Ю. З., Вишевник Л. Н., Сердюк И. В., Смирнов М. С.** Полупроводниковые газовые сенсоры с мембранной структурой для пожарных извещателей. № 8
- Гончар И. И., Киселев Л. Н., Михайлов А. Н., Певгов В. Г., Семенов А. В., Шубарев В. А.** Терморезисторные датчики измерения изменений уровня криогенных сред. № 8
- Калинин В. А., Чащин В. В.** Пассивные датчики температуры на поверхностных акустических волнах для систем контроля состояния контактных групп высоковольтного оборудования. № 10
- Михайлов А. Н., Косинский В. Н.** Датчики деформации и системы мониторинга конструкционной безопасности зданий и сооружений. № 8
- Пинаев В. В., Суханов В. С., Панков В. В., Михайлов Ю. А., Данилова Н. Л., Былинкин С. Ф., Гаврилов А. А., Шипунов А. Н.** Интегральные МЭМС-датчики с повышенной стабильностью выходных параметров. № 8
- Симаков В. В., Ворошилов А. С., Галушка В. В., Гребенников А. И., Синев И. В., Смирнов А. В., Сякина С. Д., Кисин В. В.** Распознавание запахов дыма на основе анализа динамики отклика мультисенсорной микросистемы. № 9
- Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Кащавцев Е. О., Калинин М. Ю.** Определение амплитуды нановибраций с помощью полупроводникового лазерного

автодина с учетом внешней оптической обратной связи. № 9

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

- Глухова О. Е., Кириллова И. В., Маслякова Г. Н., Коссович Е. Л., Заярский Д. А., Фадеев А. А.** Применение атомной силовой микроскопии в исследованиях взаимодействия липопротеидов с интимой артерий. № 9
- Шишковский И. В.** Дизайн системы доставки лекарств из пористого нитинола методом СЛС. № 9

СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

- Мальцев П. П., Лисицкий А. П., Павлов А. Ю., Шаврук Н. В., Побойкина Н. В., Хачатрян В. Д.** Возможности формирования МЭМС варакторов с электростатическим управлением в GaAs-технологии. № 9
- Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л., Лисицкий А. П., Федоров Ю. В., Бунегина С. Л., Крапухин Д. В.** Обзор реализаций планарных антенн X-диапазона с двумя слоями металлизации. № 4
- Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л., Лисицкий А. П., Федоров Ю. В., Крапухин Д. В., Бунегина С. Л.** Многослойные планарные антенны. Часть 1. Типы, реализации, преимущества. № 10
- Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л., Лисицкий А. П., Федоров Ю. В., Крапухин Д. В., Бунегина С. Л.** Многослойные планарные антенны. Часть 2. Обеспечение многочастотного режима круговой или эллиптической поляризации излучения. № 11
- Сеничкин А. П., Бугаев А. С., Ячменев А. Э.** Особенности вольт-амперных характеристик системы нанонитей из атомов олова, встроенных в кристалл арсенида галлия. № 11

For foreign subscribers:

Journal of "NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE" (Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, ISSN 1813-8586)

The journal bought since november 1999.

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

ISSN 1813-8586.

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

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

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 З. В. Наумаова

Сдано в набор 17.10.2012. Подписано в печать 20.11.2012. Формат 60×88 1/8. Заказ МС1212.

Цена договорная

Оригинал-макет ООО «Авансед солюшнз».

Отпечатано в ООО «Авансед солюшнз». 105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятничская, д. 5/7, стр. 2, офис 2.