TATO- & MERPOCECTEMPAC

Издается с 1999 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

Главный редактор Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора Лучинин В. В.

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И. Андриевский Р. А. Антонов Б. И. Арсентьева И. П. Астахов М. В. Быков В. А. Горнев Е. С. Градецкий В. Г. Гурович Б. А. Кальнов В. А. Карякин А. А Колобов Ю. Р. Кузин А. Ю. Мокров Е. А. Норенков И. П. Панич А. Е. Панфилов Ю. В. Петросянц К. О. Петрунин В. Ф. Путилов А. В. Пятышев Е. Н Сухопаров А. И. Телец В. А. Тимошенков С. П. Тодуа П. А. Шубарев В. А. Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Григорин-Рябова Е. В. Чугунова А. В. **Учредитель:**

учредитель. Издательство "Новые технологии

	СОДЕРЖАНИЕ	
opa	Уверенный взгляд в будущее — 50 лет ОАО "НИИФИ"	2
вет:	НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ Антипов А. А., Аракелян С. М., Кутровская С. В., Кучерик А. О., Ногтев Д. С., Прокошев В. Г. Формирование протяженных массивов наноструктур при осаж- дении металлических наночастиц из коллоидных растворов импульсно-перио- дическим лазерным излучением	4
	КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ Боронахин А. М., Иванов П. А., Суров И. Л. Исследование влияния инструмен- тальных погрешностей испытательного средства на результаты калибровки бло- ка микроакселерометров	9
3.	МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Романов А. В. Влияние внешних физических воз- действий на СВЧ характеристики композитных материалов, содержащих угле-	,
ллегия:	родные микро- и нановключения	12
	GaAs	17 20
	ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ Белозубова Н. Е. Метод минимизации влияния нестационарных температур и виброускорений на датчики давлений на основе тонкопленочных нано- и мик- роэлектромеханических систем	24 30 39 43
	МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА Журавлева Л. М., Плеханов В. Г. Изотоптроника и квантовая информация Contents	46 55
	Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайтах журнала (http://novtex.ru) и научной электронной библиотек (http://elibrary.ru). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на сайте журнала с 1999 г. по 2003 г. в разделе "ПОИСК СТАТЕЙ", а с 2004 г. — в разделе "АРХИВ".	ся си а:
В. 16: 180 10гии"	ΠΟΔΠИСКА: Адрес для переписки: • по каталогу Роспечати (индекс 79493); • по каталогу "Пресса России" (индекс 27849) • в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10) • mail: nmst@novtex.ru	

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2011

Уверенный взгляд в будущее — 50 лет ОАО "НИИФИ"

Научно-исследовательский институт физических измерений (НИИФИ, г. Пенза) отмечает свой полувековой юбилей. Институт развивался вместе с космической отраслью, которая прошла большой путь от первого спутника Земли до международных орбитальных станций, глобальных спутниковых систем.

Решение о создании предприятия было принято Советом Министров СССР в 1960 году, когда бурное развитие ракетной техники, создание первых космических аппаратов и освоение человеком космического пространства стимулировало развитие многих отраслей промышленности и формирование новых научных направлений. Для их реализации создавались отраслевые специализированные научно-исследовательские институты. Одним из них, специализирующимся в создании датчиков и преобразующей аппаратуры для систем телеизмерений и автоматики ракетно-космической техники. стал НИИФИ. Институт был образован как филиал головного ракетного института НИИ-88 (ныне — ЦНИИмаш), затем стал самостоятельным предприятием и после ряда административных преобразований приобрел статус федерального государственного унитарного предприятия в ведении Роскосмоса и был определен головным по своему направлению. В настоящее время ФГУП "НИИФИ" преобразовано в открытое акционерное общество и включено в состав интегрированной структуры ОАО "Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем".

Институт начинался с небольшого коллектива, у которого не было ни собственных площадей, ни производственной базы, ни четкого представления о том, как в таких условиях достичь поставленную перед ним цепь. За полвека он превратился в большое, экономически стабильное современное предприятие, занимающее одно из лидирующих мест не только в регионе, но и в отрасли.

Начиная с 60-х годов прошлого века в постоянно нарастающих масштабах практически вся вновь создаваемая ракетно-космическая техника (РКТ) оснащается датчико-преобразующей аппаратурой, разработанной в г. Пензе.

НИИФИ осуществляет разработку и поставку широкой номенклатуры датчиковой аппаратуры для применения в экстремальных условиях эксплуатации. Более 850 наименований разработок института, а это 3700 разновидностей датчиков и электроннопреобразующей аппаратуры, нашли применение в национальных космических программах по изучению Луны, Марса, Венеры, программах "Восток", "Космос", "Мир", "Союз", "Протон", "Энергия-Буран", "Зенит", "Союз-2", "Рокот", "Ангара", "Русь" и многих других. НИИФИ серийно выпускает металлопленочные и полупроводниковые датчики давлений для систем контроля и регулирования подачи рабочих компонентов топлива двигательных установок, интегральные кремниевые акселерометры для систем измерения и управления движением, датчики деформаций и сил для контроля механических напряжений несущих конструкций стартовых опор, сооружений и стендов при отработке и запуске изделий РКТ, датчики линейных и угловых перемещений для контроля перемещений узлов и динамики раскрытия солнечных батарей и широкую номенклатуру других приборов.

Коллектив института по праву гордится своим участием в уникальном космическом советском проекте "Энергия-Буран". В нем были задействованы 3,5 тысячи датчиков, созданных в НИИФИ. Они обеспечивали испытания, полет и посадку "Бурана" в автоматическом режиме, чего так и не смогли добиться США в национальном космическом проекте "Шаттл".

Продукция института давно вышла за пределы отечественного рынка и успешно конкурирует с зарубежными аналогами, а нередко превосходит их. ОАО "НИИФИ" разрабатывает и поставляет средства измерений в рамках международных космических программ и проектов. Среди них "Международная космическая станция", "Морской старт", российскоамериканский проект по поставке ракетных двигателей РД-180 для американских ракет-носителей семейства "Атлас", а также программы по созданию стартового комплекса космодрома Куру во Французской Гвиане, Корейской космической системы запуска и комплектации ракет-носителей KSLV. Институт участвует в поставке приборов для Индийской организации космических исследований.

За успехи, достигнутые в приборостроении для изделий ракетно-космической техники, НИИФИ награжден орденом Трудового Красного Знамени, дважды ведущим специалистам института были присуждены Государственные премии. Высокий интеллектуальный уровень разработок института подтверждается наличием более 1100 охранных документов на изобретения, в числе которых 376 патентов.

В настоящее время ОАО "НИИФИ" разрабатывает и поставляет аппаратуру для оснащения существующих и перспективных образцов вооружения, военной и авиационной техники, для систем аварийной защиты реакторных установок и контроля технологических процессов атомных станций России, Украины, Индии, Болгарии, Ирана, Китая, а также других отраслей промышленности.

ОАО "НИИФИ" активно участвует в конкурсах по тематике работ института. Предприятие разработало и в сложных конкурсных условиях защитило проект "Создание интеллектуальных систем мониторинга и контроля технически сложных объектов", целью которого является создание научно-технического и производственно-технологического базиса для разработки и производства конкурентоспособных высокотехнологичных интеллектуальных систем мониторинга и систем неразрушающего контроля состояния технически сложных объектов для обеспечения безопасности ракетно-космической техники и наземной инфраструктуры, а также социально-экономического развития экономики России. Заказчик проекта — Комиссия при Президенте Российской Федерации по модернизации и технологическому развитию экономики России.

Опираясь на богатый опыт и используя имеющиеся достижения, ОАО "НИИФИ" проводит исследования и разработку конструктивно-технологических решений для перспективной конкурентоспособной датчиковой и электронно-преобразующей аппаратуры нового поколения, в том числе интеллектуальной, а также датчиков с выходным стандартным цифровым интерфейсом и радиоканалом, характеризующихся высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками, многофункциональностью, повышенной надежностью и ресурсом, малыми массой, габаритными размерами и энергопотреблением.

Институт проводит активную инвестиционную политику, направленную на реконструкцию и техническое перевооружение производственно-технологической базы, основной упор в которой сделан на высокие технологии: микромеханическую и лазерную обработку стекла, керамики, кремния, электронно-лучевую сварку и испарение в вакууме, плазменные и плазмохимические технологии в микроэлектронике, безмасковую литографию лазерным лучом и другие. Производство ОАО "НИИФИ" оснащено высокопроизводительным оборудованием и обрабатывающими центрами для прецизионного автоматизированного изготовления сложных малогабаритных деталей, современным микроэлектронным оборудованием для производства тонкопленочных чувствительных элементов методом вакуумного напыления, формирования тензо- и термоэлементов на основе пленок наноструктурированного поликристаллического и монокристаллического кремния, оборудованием для термической обработки, сварки, сборки и др. Применение новейших наукоемких технологий в сочетании с современным оборудованием обеспечивает высокую производительность труда, позволяет значительно экономить энергоресурсы и трудозатраты, что, в конечном счете, уменьшает стоимость производимой продукции.

Испытательный центр ОАО "НИИФИ" оснащен высокоточными средствами воспроизведения физических величин, стандартным и уникальным испытательным оборудованием и осуществляет экспериментальные исследования, испытания и метрологический контроль, в том числе для целей сертификации и утверждения типа средств измерений. Ряд эталонного оборудования института включен в государственный "Реестр уникальной стендовой, испытательной базы оборонно-промышленного комплекса". Испытательная база предприятия постоянно совершенствуется в соответствии с ростом требований к надежности и эффективности датчикопреобразующей аппаратуры.

50 лет — это определенный рубеж. На смену старшему поколению приходят молодые специалисты, лучшие выпускники технических вузов. Для обеспечения предприятия квалифицированными инженерными кадрами, переподготовки и повышения квалификации, проведения практик и стажировок молодых ученых и специалистов, подготовки аспирантов и докторантов НИИФИ на своей базе вместе с вузами г. Пензы открыл три научно-образовательных центра и совместно с Пензенским государственным университетом — бакалавриат по направлению "Приборостроение" с профилем подготовки "Ракетно-космическое и авиационное приборостроение".

ОАО "НИИФИ" не только сохранило свою школу, кадры и возможности, но и постоянно наращивает потенциал, активно разрабатывая и внедряя новейшие конструкции и технологии. Благодаря такому подходу происходит устойчивое расширение спроса на продукцию института со стороны постоянных партнеров, а также появление новых потребителей в рамках диверсификационных проектов, таких как поставка продукции института для жилищно-коммунального хозяйства, предприятий нефтегазового комплекса, предприятий химического и транспортного машиностроения.

ОАО "НИИФИ" гордится своей историей и с уверенностью смотрит в будущее. С развитием новых направлений в науке и технике необходимость в надежных и точных измерениях возрастает, следовательно, впереди у НИИФИ много новой интересной работы.

> Генеральный директор ОАО "НИИФИ" **А. Г. Дмитриенко**

*ФL*анотехнологии и зондовая микроскопия

УДК 544.72, 54.148

- А. А. Антипов, ассистент кафедры,
- С. М. Аракелян, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф.,
- С. В. Кутровская, мл. науч. сотр.,
- А. О. Кучерик, канд. физ.-мат. наук, доц.,
- Д. С. Ногтев, аспирант,

В. Г. Прокошев, д-р физ.-мат. наук, проф., Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Владимирский государственный университет", e-mail: arak@vlsu.ru; kucherik@vlsu.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОТЯЖЕННЫХ МАССИВОВ НАНОСТРУКТУР ПРИ ОСАЖДЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ ИЗ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Поступила в редакцию 01.11.10

Предложен способ формирования наноструктурированных покрытий на основе технологии осаждения металлических наночастиц из коллоидных систем при воздействии импульсно-периодического лазерного излучения. Получены протяженные массивы наноструктур. С применением методов фрактальной геометрии определены структурные особенности сформировавшихся слоев. Предложена модель фрактальной диффузии для наблюдаемых структур.

Ключевые слова: коллоидные системы, лазерное излучение, фрактальная геометрия, наноструктуры

Введение

При формировании тонких металлических покрытий на поверхности различных материалов широкое распространение получили методы получения тонких пленок из жидкой фазы (электролитов) с помощью лазерного излучения: метод лазерного химического осаждения (LCLD), метод импульсного лазерного осаждения (LCLD), метод химического парофазного осаждения (LCVD) и др. [1, 3]. Использование данных подходов предполагает осаждение вещества на поверхности различных материалов без специальной обработки их поверхностей, что значительно упрощает технологический цикл. Дальнейшим развитием данных технологий является использование метода лазерного осаждения металлических наночастиц из коллоидных систем (LDPCS) [4], которые представляют собой устойчивый раствор с равномерно распределенными наночастицами металлов и/или их оксидов. В результате управляемого воздействия импульсно-периодического лазерного излучения (при различных мощностях излучения, частоте следования лазерных импульсов, диаметре лазерного пучка и т. д.) на коллоидный раствор и соответствующей геометрии эксперимента происходит осаждение наночастиц на поверхность подложки с контролируемой толщиной и шириной осажденного слоя — от нескольких сотен нанометров до нескольких микрометров.

В данной статье приведены результаты по управляемому формированию протяженных массивов наноструктур методом LDPCS в целях получения образцов наноструктурированных материалов с заданным распределением осажденных частиц.

Методика эксперимента

На рис. 1 схематично представлен метод лазерного осаждения частиц на поверхность холодной подложки, помещенную в коллоидный раствор.

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _



Рис. 1. Схема воздействия лазерного излучения на коллоидный раствор

В первой серии экспериментов использовали однокомпонентный коллоидный раствор на основе глицерина с добавлением наночастиц оксида меди (CuO) со средним размером 50 нм. Воздействие импульсно-периодического лазерного излучения ($\lambda = 1,06$ мкм, частота повторения импульсов 20 кГц, средняя мощность 2 Вт) осуществлялось на подложку из предметного стекла, погруженную в коллоидный раствор; лазерный пучок мог сканироваться вдоль подложки.

Во второй серии экспериментов создавали двухкомпонентный раствор на основе глицерина с добавлением наночастиц никеля (Ni) и неочищенных углеродных нанотрубок. Данная смесь перемешивалась на приборе Ротамикс до однородной консистенции. В полученный раствор помещали различные подложки (стеклянные, медные и кремниевые), на которых получалось осаждение наноструктур. Воздействие осуществлялось импульсно-периодическим лазерным излучением со средней мощностью 2,5 Вт.

Полученные образцы исследовали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) и методами атомно-силовой микроскопии.

Результаты

Формирование слоя осаждения из наночастиц оксида меди происходило строго по траектории сканирования лазерного пучка с четкой границей осаждения (рис. 2, см. третью сторону обложки). Размер спекшихся зерен варьируется от 150 до 300 нм.

Шероховатость поверхности в области центра трека (рис. 2, δ) составляет в поперечном сечении 25 нм при среднем значении высот 94 нм (максимальная высота — 207 нм). Такое значение шероховатости и вид полученных структур позволяет предположить, что механизм формирования наноструктур связан со спеканием плотноупакованных частиц между собой, вследствие чего на поверхности наблюдаются только сфероподобные структуры (радиусом примерно 25 нм).

Осажденный слой никеля и углеродных нанотрубок на диэлектрической подложке (предметное стекло со шлифом) отличается от осажденного слоя оксида меди на диэлектрической подложке. В этом случае (рис. 3) структура осажденного слоя меняется от центра к периферии: в области непосредственного воздействия лазерного излучения на раствор на поверхности подложки формируются каплеподобные структуры (рис. 3, δ), тогда как на границе (20 мкм от центра трека) наблюдаются отдельные конгломераты частиц размерами от 30 до 150 нм (рис. 3, δ).

При осаждении двухкомпонентного раствора на медную подложку (рис. 4, см. третью сторону обложки) формирование наноструктур происходило строго по траектории сканирования лазерного пучка без разрушения поверхности подложки. Однако после однократного прохода осаждение представляло собой отдельные несоприкасающиеся конгломераты спекшихся наночастиц. После двух проходов монолитность осажденного слоя значительно повышалась. При этом образовывались более гладкие микрообласти осаждения, имеющие границы с соседними областями; размытия области осаждения не происходит. Шероховатость слоя в поперечном сечении составляла 270 нм при высоте рельефа около 2 мкм.

Исследование механизма образования поверхностного осажденного слоя показало, что при локальном лазерном воздействии на коллоидные системы процесс осаждения происходит в две последовательные стадии.

На первой стадии происходит локальный нагрев коллоидного раствора, вследствие чего у глицерина изменяются вязкость и коэффициент поверхностного натяжения в области лазерного воздействия. Это приводит к интенсивной диффузии частиц никеля в область нагрева. При достижении некой критической массы конгломерат частиц преодолевает действие поверхностного натяжения глицерина, и частицы осаждаются непосредственно на поверхность подложки. На второй стадии локальный лазерный



Рис. 3. РЭМ-изображения осаждения коллоидной системы из никеля и углеродных нанотрубок на диэлектрическую подложку: *a* — трек осаждения; *б* — центр трека; *в* — периферия трека



Рис. 5. Срез осажденного слоя никеля (а), рентгеновский спектр зоны среза (б)

нагрев приводит к частичному спеканию наночастиц. Топология образующегося осажденного слоя зависит от типа подложки, которая помещена в коллоидный раствор.

На рис. 5 показан срез (толщиной 10 мкм) поверхности осажденного слоя, полученный на растровом электронном микроскопе с использованием метода FIB-профилирования, и его элементный состав (рентгеновский спектр). Видно, что осажденный на медную подложку слой состоит преимущественно из никеля, осевшего на поверхность без ее повреждения (рис. 5, *a*). Рентгеновский спектр осажденной области показал следующее процентное соотношение ее состава: по массе около 12 % никеля и 88 % меди, углеродный пик не фиксировался.

Исследование структуры осажденных слоев методами фрактальной геометрии

Ранее выполненные исследования структур, полученных при селективном лазерном спекании порошков металлов в жидкостях, демонстрирует их фрактальную природу [5-7]. Поэтому в нашем случае анализ приведенных на рис. 4, 5 осажденных слоев можно провести методами фрактальной геометрии. При этом агрегацию частиц в объеме коллоидного раствора и вблизи поверхности подложки целесообразно описывать с использованием механизмов фрактальной перколяции и обобщенного броуновского движения [7, 8]. Принципиальное значение имеет диффузия частиц вблизи поверхности подложки, которая определяет образование фрактальных структур в зависимости от исходной концентрации частиц. Сам коэффициент диффузии значительным образом изменяется, образуя вблизи фрактальных структур так называемую аномальную диффузию [5, 8].

В общем случае отношение этого фрактального коэффициента диффузии D_f и стандартного (в объеме) D можно описать следующим выражением [8]:

$$D_f = D\left(\frac{a}{L}\right)^{\theta},\tag{1}$$

где параметр a — характерный пространственный период осажденной структуры на поверхности подложки; L — некий характерный масштаб фрактальной структуры; θ — фактор аномальной диффузии, который связан с фрактальной размерностью d осажденной структуры соотношением

$$\theta = 2d - 2. \tag{2}$$

Таким образом, вычислив объемный коэффициент диффузии D наночастиц в глицерине и определив фрактальную размерность осажденного слоя, можно проанализировать, каким образом изменяется диффузия в процессе осаждения и как она влияет на структуру осажденного слоя (измерив параметр aосажденной наноструктуры и оценив значение L).

Коэффициент диффузии наночастиц никеля в среде глицерина можно определить по классической формуле Эйнштейна в модели сферических частиц, движущихся в жидкости:

$$D = ukT, (3)$$

где u — коэффициент подвижности диффундирующих частиц; k — постоянная Больцмана; T — температура жидкости. Для сферических частиц коэффициент подвижности можно выразить из закона Стокса как

$$u = \frac{1}{6} \pi v r, \tag{4}$$

где v — коэффициент кинематической вязкости жидкости; *r* — радиус частицы.

Представленные соотношения приводят к следующей оценке: при нагреве до 100 °С коэффициент диффузии в среде составляет $D \approx 10^{-16} \text{ см}^2/\text{с}$ для частиц с радиусом r = 100 нм. Это среднее значение коэффициента диффузии в объеме коллоидного раствора может значительно изменяться при приближении к поверхности подложки с учетом ее шероховатости. Учитывая, что изначально поверхность подложек из различных веществ может иметь сильно различающиеся параметры шероховатости, реально ожидать существенное изменение структуры осажденного слоя. А учитывая принципиальное свойство фрактального самоподобия, можно считать, что начальная "затравочная" структура поверхности подложки будет определять морфологию осажденного слоя. Необходимо также учитывать конкурирующий процесс термического распада фрактальных структур при лазерном нагреве. Для расчета фрактальной размерности использовались измеренные характерные профили поверхности (рис. 6.)

Измерение фрактальной размерности

Воспользовавшись определением фрактала как некоторого множества, отдельная часть которого несет в себе (в соответствии со свойством самоподобия) информацию обо всем множестве [9], можно использовать скейлинг-эффект [9—11] для непосредственного расчета длины ряда получившихся наноструктур.

Действительно, для многих самоподобных множеств верно соотношение [11]

$$L(\delta) = L_0 \delta^{1-d},\tag{5}$$

где $L(\delta)$ — длина ряда при аппроксимации профиля наноструктуры с шагом δ ; L_0 — средняя наблюдае-

мая по профилю полученной наноструктуры длина ряда; *d* — фрактальная размерность.

Поэтому, измерив полученный при осаждении профиль наноструктур L и проведя процедуру аппроксимации, можно определить значение d.

При этом использовался следующий алгоритм расчета. Из всего массива данных по профилю осажденного слоя (рис. 6) выбирались 10 % отсчетов, включающих в себя начальную, конечную и промежуточные точки (по длине профиля), которые, в свою очередь, содержат максимальное и минимальное значения (по высоте профиля), расположенные по возможности на равном удалении друг от друга. Для полученных фрагментов кривой рельефа рассчитывалась характерная длина. На следующем этапе в данную выборку добавлялись еще 10 % от общего числа подобных измерений. Для полученной таким образом уточненной кривой рельефа снова рассчитывалась характерная длина. Обсуждаемая последовательность вычислений продолжалась до тех пор, пока получаемые значения длин ряда по профилю осажденной наноструктуры не изменялись. Таким образом, с каждым расчетным шагом происходила поэтапная аппроксимация искомой кривой рельефа аналогично методу расчета принятого в задачах определения длины береговой линии [9, 10].

Предлагаемый метод был протестирован на известных фрактальных множествах: кривой Коха, пыли Кантора и др. [9—11]. Полученные значения фрактальной размерности отличались от аналитически рассчитанных для данных структур не более, чем на абсолютную величину 0,05.

Полученные значения фрактальной размерности для результатов наших экспериментов по осажде-



а — на поверхности меди; *б* — на поверхности кремния

нию наноструктур на подложку показали, что при осаждении на поверхность кремния фрактальная размерность осажденного слоя разных поверхностных зон лежит в интервале d = 1,60...1,75; при осаждении на поверхность меди — 1,35...1,47.

Воспользовавшись выражением (2), можно определить средний коэффициент аномальной фрактальной диффузии D_f Для никеля вблизи кремниевой подложки она определяется значением $\theta = 1,7,$ для медной подложки — $\theta = 0.82$. В соответствии с выражением (1) рассчитанная фрактальная диффузия D_f уменьшалась на два порядка вблизи поверхности медной подложки и на четыре порядка вблизи кремниевой. Это означает, что на процесс лазерного осаждения наноструктур на разные подложки, действительно, существенное влияние оказывают зародыши фрактальных структур на их поверхности. Эти зародыши принимают все более правильные геометрические формы с увеличением коэффициента диффузии в объеме коллоидного раствора. Такое формирование поверхностных наноструктур для осажденного слоя в процессе лазерного воздействия существенно зависит от материала подложки и позволяет заданным образом управлять топологией формирования поверхностных наноструктур при лазерном осаждении вещества из коллоидного раствора. То есть, формируя на поверхности подложки предварительный рельеф, можно управлять морфологией осажденного слоя.

Заключение

Предложен способ формирования наноструктурированных покрытий на основе технологий LDPCS при воздействии импульсно-периодического лазерного излучения на коллоидные растворы. В процессе лазерного воздействия получены разные топологии осаждения наночастиц на различные подложки с образованием микро- и наноструктурированных конгломератов вдоль траектории сканирования лазерного пучка по поверхности подложки. Свойства осажденного слоя зависят от материала, используемого при приготовлении коллоидного раствора, и типа подложки. Лазерное воздействие не приводит к разрушению поверхности подложки и обеспечивает достаточно хорошую алгезию в процессе осаждения. В зависимости от режима лазерного воздействия удается варьировать толщину осажденного слоя в пределах от 100 нм до 1 мкм.

Полученные протяженные массивы наноструктур имеют фрактальную структуру, и для них определены соответствующие фрактальные параметры. Это позволило обнаружить существенное уменьшение коэффициентов аномальной диффузии вблизи наноструктур, которое для медной подложки составляет два порядка, а для кремневой — четыре порядка по сравнению с их значением в объеме коллоидного раствора. Эти последние результаты представляют значительный физический интерес и имеют самостоятельное значение в аспекте управления кинетикой образующихся поверхностных наноструктур.

Работа выполнена частично за счет средств аналитической ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала Высшей школы", ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" и при поддержке грантов РФФИ 06-08-96332-р_центр_а, 09-02-99012-р_офи, 09-02-01410-а.

Список литературы

1. **Kordas K.** et al. Laser-assisted metal deposition from liquidphase precursors on polymers // Applied Surface Science. 2001. N 172. P. 178–179.

2. Рыженков Д. И. и др. Наноматериалы. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 365 с.

3. Moilanen H., Remes J., Leppävuori S. Low resistivity LCVD direct write Cu conductor lines for IC customization // Physica Scripta. 1997. Vol. 69. 237 p.

4. Антипов А. А., Кутровская С. В., Кучерик А. О. и др. Сборник трудов IV межотраслевой конференции с международным участием аспирантов и молодых ученых "Вооружение. Технология. Безопасность. Управление" в ГОУ ВПО КГТА им. В. А. Дегтярева. 2009. С. 7—13.

5. Смирнов Б. М. Физика фрактальных кластеров. М.: Наука, 1991.

6. Высоцкий В. В., Ролдугин В. И., Туторский И. А. Структура и перколяционные свойства проводящих пленочных композиций // Коллоидный журнал. 1998. Т. 60. № 6. С. 729.

7. Затевалов А. М., Ролдугин В. И., Туторский И. А. Диффузионно-контролируемая агрегация частиц вблизи фрактальных поверхностей // Коллоидный журнал. 2000. Т. 62. № 4. С. 483–487.

8. **Соколов Б. М.** Размерности и другие геометрические показатели в теории протекания // Успехи физ. наук. 1986. Т. 150. № 2. С. 221.

9. Торохов Н. А., Божков В. Г., Ивонин И. В. и др. Определение фрактальной размерности поверхности эпитаксиального n-GaAs в локальном пределе // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43. Вып. 1. С. 38—46.

10. Мандельброт Б. Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002.

11. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991.

12. **Потапов А. А.** Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. М.: Университетская книга. 2005. С. 847.

Конструирование и моделирование МНСТ

УДК 531.383-11:531.714.7

А. М. Боронахин, канд. техн. наук, доц., зам. зав. каф., П. А. Иванов, аспирант, e-mail: ivanov_etu@mail.ru, И. Л. Суров, магистр, СПбГЭТУ "ЛЭТИ"

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СРЕДСТВА НА РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВКИ БЛОКА МИКРОАКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Поступила в редакцию 19.10.10

Проводится исследование влияния неточности начальной выставки планшайбы испытательного стенда в плоскости горизонта, а также отклонения от ортогональности осей поворота и наклона стенда на результаты калибровки блока микроакселерометров. Исследование проводилось на малогабаритном двухосном стенде, разработанном Кафедрой лазерных измерительных и навигационных систем СПбГЭТУ "ЛЭТИ".

Ключевые слова: инерциальная навигация, математическая модель, микромеханический акселерометр, малогабаритный двухосный испытательный стенд

Введение

Согласно стандарту IEEE, калибровка блока микроакселерометров, входящих в микромодуль, может быть выполнена с использованием поворотного стенда. При этом реализуется серия позиционирований в поле силы тяжести Земли вокруг каждой из осей приборной системы координат: со стенда задаются различные угловые положения, и тем самым меняется проекция ускорения свободного падения на оси чувствительности акселерометров.

По результатам проведения ряда таких испытаний были выявлены вариации определяемых коэффициентов математической модели показаний блока микроакселерометров. Одной из возможных причин этих вариаций может быть неточность начальной выставки испытательного средства в географической системе координат, обусловленная погрешностью оборудования, с помощью которого осуществляется сведение приборной и географической систем координат (например, погрешность цилиндрического уровня составляет $\pm 30''$). Кроме того, на точность определения указанных коэффициентов модели может оказывать влияние такая характеристика средства, как отклонение от ортогональности осей поворота и наклона испытательного стенда. Поэтому необходимо учитывать как неточность выставки планшайбы в плоскости горизонта, так и конструктивные особенности средства испытаний.

Математическое описание неточности начальной выставки

Будем характеризовать неточность начальной выставки тремя углами: $\Delta \psi$, $\Delta \theta$, $\Delta \kappa$. Угол, характеризующий отклонение от ортогональности осей поворота и наклона стенда, обозначим $\Delta \gamma$.

Введем систему координат $Ox_1y_1z_1$, ось z_1 которой совпадает с вертикалью места (т. е. эта система координат может быть развернута относительно географической системы координат на произвольный угол курса), и приборную систему координат Oxyz. Угол, задаваемый стендом по оси наклона, обозначим α , а по оси поворота — β . Тогда переход от системы координат $Ox_1y_1z_1$ к системе координат Oxyz может быть представлен как последовательность разворотов на плоские углы: $\Delta \psi \rightarrow \Delta \theta \rightarrow \alpha \rightarrow \Delta \gamma \rightarrow \Delta \kappa \rightarrow \beta$. Графически эта последовательность разворотов представлена на рис. 1 (см. четвертую сторону обложки).

Из рис. 1. видно, что ось y_2 — ось наклона стенда, а ось z_4 — ось поворота стенда.

Проекции линейного ускорения (ускорения свободного падения) на оси приборной системы координат для случая на рис. 1 можно записать через матрицы перехода в следующем виде:

$$[W] = [A_{\beta}] \cdot [A_{\Delta\kappa}] \cdot [A_{\Delta\gamma}] \cdot [A_{\alpha}] \cdot [A_{\Delta\theta}] \cdot [A_{\Delta\psi}] \cdot [00g]^{\mathrm{T}}, (1)$$

где [*W*] — вектор-столбец линейных ускорений на оси приборной системы координат; $[A_{\beta}]$, $[A_{\Delta\kappa}]$, $[A_{\Delta\gamma}]$, $[A_{\alpha\gamma}]$, $[A_{\alpha\beta}]$, $[A_{\Delta\theta}]$, $[A_{\Delta\psi}]$ — матрицы перехода для разворотов на соответствующие углы.

С использованием выражения (1) была найдена погрешность, которую вносит неточность начальной выставки в параметры математической модели показаний блока микроакселерометров при стандартной калибровке. Например, погрешность оценки углов матрицы перехода от осей приборной системы координат к осям чувствительности датчиков равна одному из углов $\Delta \psi$, $\Delta \theta$, $\Delta \kappa$ [рад], а погрешность оценки нулевых сигналов произведению одного из этих углов на значение ускорения свободного падения $g [m/c^2]$.

Испытуемый микромодуль

Внешний вид микромодуля показан на рис. 2 (см. четвертую сторону обложки).

Микромодуль позволяет измерять проекции линейного ускорения вдоль трех осей приборной системы координат.

В качестве математической модели показаний блока акселерометров было использовано следующее выражение:

$$\begin{bmatrix} W_{x}^{\text{np}} \\ W_{y}^{\text{np}} \\ W_{z}^{\text{np}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{x} & 0 & 0 \\ 0 & K_{y} & 0 \\ 0 & 0 & K_{z} \end{bmatrix} \times \\ \times \left\{ \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_{y} & \beta_{z} \\ \alpha_{x} & 1 & -\gamma_{z} \\ -\beta_{x} & \gamma_{y} & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{x} \\ W_{y} \\ W_{z} \end{bmatrix} \right\} \times \\ \times \begin{bmatrix} W_{x} \\ W_{y} \\ W_{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{x0} \\ W_{y0} \\ W_{z0} \end{bmatrix},$$
(2)

где K_x , K_y , K_z — масштабные коэффициенты датчиков [ед. съема/м · c⁻²]; K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} — коэффициенты нелинейности выходной характеристики [1/м/c²]; W_{x0} , W_{y0} , W_{z0} — нулевые сигналы датчиков [ед. съема]; α_y , β_z , α_x , γ_z , β_x , γ_y — углы матрицы перехода от осей приборной системы координат к осям чувствительности датчиков [рад]; W_x^{np} , W_y^{np} , W_z^{np} — показания датчиков [ед. съема]; W_x , W_y , W_z — проекции линейного ускорения на оси приборной системы координат [м · c⁻²].

Предложенная методика калибровки

Была предложена методика оценки элементов математической модели (2) с учетом неточности начальной выставки. Для ее реализации необходимо снять показания блока микроакселерометров в положениях, приведенных в табл. 1 (в начальном положении одноименные оси стенда и испытуемого модуля совпадают).

Таблица 1

Варианты положений для съема данных по предложенной методике

N⁰	α	β	№	α	β	№	α	β	№	α	β
1		0	5		0	9		0	13		0
2		π/2	6	(2)	π/2	10		π/2	14	2 12	π/2
3	0	π	7	π/2	π	11	π	π	15	$3\pi/2$	π
4		3π/2 8		3π/2	12		3π/2	16		3π/2	

Аналитически были получены формулы для оценки параметров в выражении (2) с учетом углов неточности начальной выставки. Например, для *x*-акселерометра

$$K_{x} = -\frac{W_{x}^{\text{np}}(5) - W_{x}^{\text{np}}(7) - W_{x}^{\text{np}}(13) + W_{x}^{\text{np}}(15)}{4g};$$

$$\beta_{z} = \frac{W_{x}^{\text{np}}(1) + W_{x}^{\text{np}}(3) - W_{x}^{\text{np}}(9) - W_{x}^{\text{np}}(11)}{4K_{x}g};$$

$$W_{x0} = \frac{W_{x}^{\text{np}}(1) + W_{x}^{\text{np}}(3) + W_{x}^{\text{np}}(9) + W_{x}^{\text{np}}(11)}{4}.$$

Кроме того, по показаниям датчиков можно определить углы $\Delta \psi$, $\Delta \theta$, характеризующие неточность начальной выставки, и, теоретически, угол отклонения от ортогональности осей $\Delta \gamma$. Например, угол

$$\Delta \theta = -\frac{W_z^{\text{np}}(5) + W_z^{\text{np}}(7) - W_x^{\text{np}}(13) - W_z^{\text{np}}(15)}{W_z^{\text{np}}(1) + W_z^{\text{np}}(3) - W_x^{\text{np}}(9) - W_z^{\text{np}}(11)}$$

где номера в скобках обозначают номера положения из табл. 1.

Экспериментальное исследование

Был проведен следующий эксперимент:

 начальная выставка планшайбы с использованием цилиндрического уровня (с предварительной поверкой уровня);

2) съем данных в соответствии с предложенным алгоритмом (см. табл. 1);

3) съем данных согласно стандартной методике;

4) изменение вручную углов $\Delta \theta$ и $\Delta \kappa$ на $1/10^{\circ}$;

5) повторный съем данных в соответствии с предложенным алгоритмом;

6) повторный съем данных согласно общепринятой методике.

Полученные экспериментальные данные были обработаны. Были оценены коэффициенты математических моделей показаний (по общепринятой и предложенной методикам) до и после изменения углов $\Delta\theta$ и $\Delta\kappa$, а также оценены сами углы, характеризующие неточность начальной выставки и отклонение от ортогональности осей стенда (табл. 2).

Кроме того, были построены графики погрешности математических моделей (соответствие задаваемого и получаемого). Для этого найденные ранее коэффициенты математической модели (2) были применены к данным, полученным при серии позиционирований.

На рис. 3, 4 для примера показана погрешность математической модели при калибровке по стандартной и

Таблица 2

Результаты оценки углов неточности начальной выставки и отклонения от ортогональности осей стенда

Угол	До изменения углов	После изменения углов
Δθ Δψ Δγ	3" -97" 59"	375″ -136,1″ 48″

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 3, 2011 -



Рис. 3. Погрешность математической модели по стандартной методике



Рис. 4. Погрешность математической модели по предложенной методике

предложенной методикам соответственно (для *x*-акселерометра при позиционировании вокруг осей *x*, *y* и *z*).

Заключение

Рассмотрено исследование влияния неточности начальной выставки планшайбы испытательного стенда в плоскости горизонта, а также отклонения от ортогональности осей поворота и наклона стенда на результаты калибровки блока микроакселерометров. Предложено описывать эту неточность тремя углами $\Delta \psi$, $\Delta \theta$, $\Delta \kappa$ и углом $\Delta \gamma$, характеризующим отклонение от ортогональности двух осей средства испытаний. Показано, что при испытаниях блока микроакселерометров в соответствии со стандартной методикой углы, обозначенные выше, влияют на результаты калибровки. Предложена новая методика калибровки. Получены аналитические формулы для оценки параметров математической модели показаний блока микроакселерометров, а также углов, характеризующих неточность начальной выставки и отклонение от ортогональности осей стенда. Проведенные экспериментальные исследования показали, что предложенная методика позволяет повысить достоверность получаемых в ходе калибровки параметров:

 неучтенная неортогональность (погрешность углов матрицы перехода от осей приборной системы координат к осям чувствительности датчиков) при калибровке по предложенной методике практически отсутствует;

◦ погрешность нулевого сигнала, полученного по стандартной методике, составила $5 \cdot 10^{-4}$ g, по предложенной методике — $1 \cdot 10^{-4}$ g.

Список литературы

1. **Draft** Recommended Practice for Precision Centrifuge Testing of Linear Accelerometers. P836/D7. June 2006.

2. Боронахин А. М., Лукьянов Д. П., Филатов Ю. В. Оптические и микромеханические инерциальные приборы. СПб.: ООО "Техномедиа" / Элмор, 2007. 400 с.

3. Голован А. А., Парусников Н. А. Математические основы навигационных систем. Часть І. Математические модели инерциальной навигации. М.: Изд-во МГУ, 2007. 110 с.

4. Голован А. А., Парусников Н. А. Математические основы навигационных систем. Часть II. Приложения методов оптимального оценивания к задачам навигации. М.: Изд-во МГУ, 2008. 128 с.

5. Анучин О. Н., Емельянцев Г. И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / Под общ. ред. В. Г. Пешехонова. Изд. 2-е, перераб. и доп. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2003. 390 с.

6. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 1. Введение в теорию оценивания / О. А. Степанов. — СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2009. 496 с.

7. **Распопов В. Я.** Микромеханические приборы: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.

Материаловедческие и технологические основы МНСТ

УДК 621.372.2:621.317.335.3

Д. А. Усанов, акад. РАЕН, д-р физ.-мат. наук, проректор по НИР, зав. каф.,
А. В. Скрипаль, д-р физ.-мат. наук, проф.,
А. В. Романов, аспирант,
Саратовский государственный университет имени
Н. Г. Чернышевского,
e-mail: UsanovDA@info.sgu.ru

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ФИЗИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СВЧ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ УГЛЕРОДНЫЕ МИКРО- И НАНОВКЛЮЧЕНИЯ

Поступила в редакцию 29.10.10

Исследованы электрофизические свойства композитных материалов на основе эпоксидного клея с включениями в виде углеродных нанотрубок и частиц мелкодисперсного графита в диапазоне частот от 0,1 до 6 ГГц.

Проведено исследование воздействия физических факторов (ультразвук, давление) на комплексную диэлектрическую проницаемость композитного материала с углеродными микро- и нановключениями в ходе его изготовления.

Показано, что существует оптимальное время обработки композитного материала ультразвуком, при котором для заданной концентрации включений достигается максимальная его электропроводность.

Получено, что с ростом внешнего давления при отверждении композитного материала мнимая часть диэлектрической проницаемости композита возрастает по линейному закону.

Ключевые слова: микрополосковые фотонные кристаллы, диэлектрическая проницаемость, композиты, углеродные нанотрубки, давление, ультразвук

Введение

Углеродные микро- и нановключения широко используют в качестве наполнителя при изготовлении широкого класса композиционных материалов для придания им необходимых механических, термических и электрических свойств. В СВЧ технике углеродные микро- и нановключения, такие как мелкодисперсный графит, фуллерены, графены, углеродные нанотрубки используют для создания широкополосных поглощающих покрытий [1—5]. Если в качестве наполнителя использовать модифицированные путем воздействия различными физическими факторами углеродные микро- и нановключения, то можно существенно улучшить электрофизические характеристики композитных материалов. В качестве физического воздействия используется ультразвук, давление, ультрафиолетовое излучение, электрическое, магнитное поле и т. д. [6—8]. В основном эти исследования относятся к механическим свойствам композитных материалов.

Целью настоящей работы являлось определение влияния воздействия ультразвука и давления на диэлектрическую проницаемость композитного материала на основе эпоксидного клея с включениями в виде углеродных нанотрубок и частиц мелкодисперсного графита в диапазоне частот от 0,1 до 6 ГГц.

Измерение комплексной диэлектрической проницаемости композитных материалов, содержащих углеродные микро- и нановключения

Исследуемые композиционные образцы, имеющие вид пластин с размерами $23 \times 10 \times 1$ мм были изготовлены из композитного материала, созданного на основе эпоксидного двухкомпонентного клея (ЭД 20 + полиэтиленполиамин) с различной объемной концентрацией углеродных нанотрубок. Углеродные нанотрубки были получены газофазным химическим осаждением пропанобутановой смеси на металлическом катализаторе и имели следующие размеры: диаметр ~20—30 нм, длина ~1 мкм [9]. Для сравнения в качестве наполнителя также использовался мелкодисперсный графит. С применением методики гранулометрического анализа [10] была получена информация о среднем размере частиц графита, который составлял 7,6 ± 1,2 мкм.

Для определения электрофизических параметров композитного материала использовалась микрополосковая структура [11] в виде одномерного фотонного кристалла, состояшая из последовательно соединенных отрезков микрополосковой линии перелачи с периолически изменяюшейся диэлектрической проницаемостью подложки. Четные отрезки были реализованы на подложке из поликора (Al_2O_3), а нечетные — в виде отрезков полосковой линии с воздушным заполнением, в которых между полоской и металлическим основанием образовывался воздушный зазор. С помощью анализатора цепей N5230A Agilent PNA-L Network Analyzer были получены частотные зависимости коэффициента прохождения электромагнитного излучения СВЧ диапазона через микрополосковую структуру, один из отрезков с воздушным заполнением которой содержал

исследуемые образцы с модифицированным углеродным наполнителем.

Для определения комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\text{комп}} = \varepsilon'_{\text{комп}} - i\varepsilon''_{\text{комп}}$ композитного материала, который заполнял один из воздушных отрезков микрополосковой линии передачи, необходимо решить обратную задачу [12]. По спектрам пропускания электромагнитного излучения, взаимодействующего с микрополосковой структурой с исследуемым образцом, которые обладают резко выраженной частотной зависимостью, при известном теоретическом описании этой зависимости такая задача решалась с использованием метода наименьших квадратов. При реализации этого метода находится такое значение параметра $\varepsilon_{\text{комп}}$, при котором функция невязок $S(\varepsilon_{\text{комп}})$, равная сумме квадратов разностей экспериментальных $D_{\text{эксп}}$ и расчетных

значений $D(\varepsilon_{\text{комп}}, f_{\mathsf{Эксп}_n})$

$$S(\varepsilon_{\text{комп}}) = \sum_{n} \left(D_{\text{эксп}_{n}} - D\left(\varepsilon_{\text{комп}}, f_{\text{эксп}_{n}}\right) \right)^{2}, \quad (1)$$

становится минимальной. Искомое значение $\varepsilon_{комп}$ определяется численным методом с помощью ЭВМ в результате решения уравнения

$$\frac{\partial S\left(\varepsilon_{\text{комп}}\right)}{\partial \varepsilon_{\text{комп}}} = 0.$$
 (2)

При модификации углеродного наполнителя использовалось воздействие ультразвука и давления.

Влияние ультразвукового воздействия на электрофизические свойства композитного материала с углеродным наполнителем в процессе его изготовления

Углеродный наполнитель смешивался в эпоксидной смоле без добавления отвердителя, полученная масса делилась на пять равных частей. Полученные части подвергались ультразвуковой обработке (частота УЗ колебаний 22 кГц, мощность УЗ колебаний 100 Вт) в ультразвуковой ванне УЗВ-4/150-МП с различной длительностью: от 0 до 90 мин. Затем добавлялся отвердитель (полиэтилполиамин) в соотношении 1:10 и полученный композитный материал заливался в формочки. Отверждение происходило при комнатной температуре. Концентрация углеродного наполнителя изменялась в пределах от 1 до 10 %.

Значение диэлектрической проницаемости композитного образца в зависимости от длительности ультразвуковой обработки *t* определялось численным методом из решения уравнения (2). Полученные данные в виде зависимости комплексной диэлектрической проницаемости композитного материала на частоте ~3,45 ГГц от длительности ультразвукового воздействия для наполнителя из углеродных нанотрубок и графита (концентрация наполнителя — 10 %) представлены на рис. 1.

При воздействии ультразвуковых колебаний на эпоксидный клей с различным типом углеродного наполнителя наблюдается изменение комплексной диэлектрической проницаемости композитного материала. Характер такого изменения зависит от материала наполнителя. Для композитного материала, содержащего мелкодисперсный графит, наблюдается уменьшение как действительной, так и мнимой частей диэлектрической проницаемости с увеличением длительности воздействия ультразвука. Такое поведение диэлектрической проницаемости (ДП) может быть связано с разрушением структуры графита (графитовых слоев) с частичным превращением его в аморфный углерод. Максимальное изменение диэлектрической проницаемости композитного материала с графитовыми включениями при длительности воздействия 90 мин достигает 45 % (для мнимой части ДП).



Рис. 1. Зависимости действительной (a) и мнимой части (δ) комплексной диэлектрической проницаемости композитного материала от длительности ультразвукового воздействия для наполнителя из углеродных нанотрубок (сплошная линия) и графита (штриховая линия)



Рис. 2. Образцы из композитного материала с 5 %-ной концентрацией наполнителя из углеродных нанотрубок при различном времени воздействия УЗ колебаний:

1 — 0 мин; *2* — 15 мин; *3* — 30 мин; *4* — 60 мин; *5* — 90 мин

Для композитного материала с включениями из углеродных нанотрубок характерно немонотонное изменение диэлектрической проницаемости (рис. 1). Наблюдается максимум мнимой части диэлектрической проницаемости композитного материала при t = 30 мин. Первоначальное увеличение (t = 0...30 мин) мнимой части диэлектрической проницаемости композитного материала может быть связано с разрушением микроскопических агломератов, при котором жгутовая структура распадается на отдельные волокна из углеродных нанотрубок. При этом наблюдается изменение цвета композитного материала (рис. 2).

Уменьшение мнимой части ДП при дальнейшей УЗ обработке приводит к возникновению дефектов на стенках углеродных нанотрубок [13] и частичному разрушению структуры отдельной углеродной трубки с обламыванием ее концов, что приводит к уменьшению ее длины. В некоторых случаях даже возможно образование аморфного углерода из каркаса углеродной нанотрубки [14]. Максимальное изменение диэлектрической проницаемости композитного материала с включениями из углеродных нанотрубок при длительности воздействия 90 мин достигает 25 % (для мнимой части ДП). Косвенным подтверждением деградации структуры углеродных нанотрубок могут служить результаты, полученные в работах [15, 16]. Так, авторы [15] наблюдали ухудшение механических свойств композитного материала на основе поликарбоната с углеродными нановолокнами при длительной ультразвуковой обработке (>1,5 ч). В работе [16] экспериментально получена зависимость модуля Юнга композитного материала на основе полиуретана с добавлением углеродных нановолокон от длительности и интенсивности ультразвуковой обработки. Было установлено, что модуль Юнга немонотонно зависит от длительности ультразвуковой обработки композитного материала, и существует явно выраженный максимум, положение которого зависит от концентрации наполнителя.





В ходе эксперимента исследовалось влияние концентрации углеродных нанотрубок на сверхвысокочастотные характеристики (на частоте ~3,45 ГГц) композитного материала при ультразвуковом воздействии. Были получены экспериментальные данные в виде зависимости действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости композитного материала от длительности ультразвукового воздействия при разных концентрациях углеродных нанотрубок в качестве наполнителя (1...10 %), которые представлены на рис. 3.

Следует отметить, что при достаточно больших концентрациях (~10 %) наблюдается более резкое уменьшение мнимой части ДП композита при длительном воздействии УЗ колебаний. Это связано с увеличением вероятности механического разрушения структуры углеродных нанотрубок при взаимодействии их друг с другом при ультразвуковой обработке. Дальнейшее увеличение концентрации малоэффективно из-за высокой вязкости композитного материала [17].

Влияние давления на электрофизические свойства композитного материала с углеродным наполнителем в процессе его изготовления

Можно считать, что основной вклад в изменение комплексной диэлектрической проницаемости исследуемого композитного материала при воздействии давления определяется углеродными нанотрубками.

Причина этого связана с высокой чувствительностью электропроводности углеродных нанотрубок к изменению механического напряжения, вызванного давлением [18]. Стоит отметить еще некоторые факторы при воздействии давления, которые будут влиять на электропроводность композитного материала в целом. Электрическое сопротивление углеродной нанотрубки может увеличиться на два порядка при ее растяжении всего лишь на 3 %. Число точечных омических контактов между ближайшими углеродными трубками увеличивается с увеличением давления, а чем больше точечных омических контактов, тем более низкое электрическое удельное сопротивление будет у композитного материала. Эффект влияния полевой эмиссии углеродных нанотрубок на электрическое удельное сопротивление композитного материала изменяется в зависимости от давления. С ростом давления углеродные нанотрубки вынуждены приближаться друг к другу, что делает полевую эмиссию между углеродными нанотрубками более интенсивной [19].

Было проведено исследование влияния давления на комплексную диэлектрическую проницаемость композитного материала на основе эпоксидного клея с различной концентрацией углеродных нанотрубок в СВЧ диапазоне.

Углеродный наполнитель предварительно смешивался в эпоксидной смоле без добавления отвердителя, а затем добавлялся отвердитель (полиэтилполиамин) в соотношении 1:10. Полученный композитный материал заливался в пресс-форму, при этом толщина полученного образца составляла 1 мм. Отверждение под давлением происходило при комнатной температуре.

Давление на композитный материал с различной концентрацией углеродных нанотрубок осуществлялось с помощью пресса. Выбор давления при воздействии на композитный материал ограничен механическим разрушением композитного образца. В ходе эксперимента использовалось давление, значение которого варьировалось в диапазоне ~0...150 кПа.

Были получены частотные зависимости коэффициента прохождения электромагнитного излучения СВЧ диапазона через микрополосковую структуру, один из отрезков которой был частично заполнен композитным материалом, полученным под воздей-



I = 0 %; 2 = 3 %; 3 = 5 %; 4 = 10 % от приложенного давпения

ствием давления. Значение диэлектрической проницаемости композитного образца в зависимости от приложенного давления определялось численным методом из решения уравнения (2).

Для сравнительного анализа экспериментальных результатов использовали контрольный образец (давление на который не осуществлялось) с различной концентрацией углеродных нанотрубок (0...10%). Зависимости диэлектрической проницаемости (на частоте ~3,45 ГГц) от приложенного давления представлены на рис. 4.

Из представленных на рис. 4 результатов видно, что для мнимой части диэлектрической проницаемости композитного материала при концентрации нанотрубок, большей 3 %, наблюдается линейный рост ее значения с увеличением приложенного давления. Причем это увеличение связано лишь с добавлением углеродных нанотрубок, так как мнимая часть ДП чистого эпоксидного клея, напротив, уменьшается с ростом давления из-за уменьшения числа воздушных включений, которые образуются в процессе его отверждения.

С ростом давления действительная часть $\varepsilon'_{KOM\Pi}$ незначительно снижается, что связано с частичным объединением проводящих кластеров из углеродных нанотрубок и в результате уменьшением площади поверхности на границе наполнитель—эпоксидная матрица, на которой может накапливаться электрический заряд, что приводит к уменьшению поляризации композитного материала в целом.

Наблюдается линейная зависимость электропроводности композитного материала от давления при малых концентрациях, что хорошо согласуется с результатами, полученными другими исследователями [20].

* * *

Таким образом, показано, что с ростом давления линейно увеличивается мнимая часть диэлектрической проницаемости композитного материала, определяющая диэлектрические потери в СВЧ диапазоне. Это связано с ростом электропроводности композитного материала в целом.

Электрофизические свойства композитного материала с добавлением наполнителя из углеродных нанотрубок медленнее деградируют при обработке ультразвуком, чем при использовании в качестве наполнителя графитовых микрочастиц.

Показано, что существует оптимальное время УЗ обработки, при котором достигается максимальная электропроводность композитного материала, которая зависит от концентрации наполнителя.

Список литературы

1. Saib A., Bednarz L., Daussin R., Bailly C., Lou X., Thomassin J.-M., Pagnoulle C., Detrembleur C., Jerome R., and Huynen I. Carbon Nanotube Composites for Broadband Microwave Absorbing Materials // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2006. Vol. 54. N 6. P. 2745–2754.

2. Kim J.-B., Lee S.-K., Kim C.-G. Comparison study on the effect of carbon nano materials for single-layer microwave absorbers in X-band // Composites Science and Technology. 2008. Vol. 68. P. 2909–2916.

3. Lianga J., Wang Y., Huang Y., Ma Y., Liu Z., Cai J., Zhang C., Gao H., Chen Y. Electromagnetic interference shielding of graphene/epoxy composites // Carbon. 2009. Vol. 47. P. 922–925.

4. Jou W.-Sh., Cheng H.-Z., Hsu Ch.-F. The electromagnetic shielding effectiveness of carbon nanotubes polymer composites // Journal of Alloys and Compounds. 2007. Vol. 434–435. P. 641–645.

5. Micheli D., Apollo C., Pastore R., Marchetti M. X-Band microwave characterization of carbon-based nanocomposite material, absorption capability comparison and RAS design simulation // Composites Science and Technology. 2010. Vol. 70. P. 400–409.

6. Song Y. S., Youn J. R. Influence of dispersion states of carbon nanotubes on physical properties of epoxy nanocomposites // Carbon. 2005. Vol. 43. P. 1378–1385.

7. Ferrara M., Neitzert H.-C., Sarno M., Gorrasi G., Sannino D., Vittoria V., Ciambelli P. Influence of the electrical field applied during thermal cycling on the conductivity of LLDPE/CNT composites // Physica E. 2007. Vol. 37. P. 66–71.

8. Camponeschi E., Vance R., Al-Haik M., Garmestani H., Tannenbaum R. Properties of carbon nanotube-polymer composites aligned in a magnetic field // Carbon. 2007. Vol. 45. P. 2037–2046.

9. Ткачев А. Г., Мищенко С. В., Коновалов В. И. Каталитический синтез углеродных нанотрубок из газофазных продуктов пиролиза углеводородов / Российские нанотехнологии. 2007. Т. 2. № 7-8. С. 100-108.

10. Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Скрипаль Ан. В., Абрамов А. В. Видеотехнологии автоматизированного контроля: учеб. пособие для студентов физ. фак. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та. 2001. 96 с.

11. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В. и др. Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения параметров жидкостей // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 8. С. 143–148.

12. Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С. Измерения толщины нанометровых слоев металла и электропроводности полупроводника в структурах металл—полупроводник по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 5. С. 112—117.

13. Lu K. L., Lago R. M., Chen Y. K., Green M. L. H., Harris P. J. F., Tsang S. C. Mechanical damage of carbon nanotubes by ultrasound // Carbon. 1996. Vol. 34. P. 814–816.

14. Mukhopadhyay K., Dwivedi C. D., Mathur G. N. Conversion of carbon nanotubes to carbon nanofibers by sonication // Carbon. 2002. Vol 40. P. 1373–1376.

15. He P., Gao Y., Lian J., Wang L., Qian D., Zhao J., Wang W., Schulz M. J., Zhou X. P., Shi D. Surface modification and ultrasonication effect on the mechanical properties of carbon nanofiber/polycarbonate composites // Composites. Part A. 2006. Vol. 37. P. 1270–1275.

16. **Kabir Md. E., Saha M. C., Jeelani S.** Effect of ultrasound sonication in carbon nanofibers/polyurethane foam composite // Materials Science and Engineering. Part A. 2007. Vol. 459. P. 111–116.

17. Schlea M. R., Brown T. R., Bush J. R., Criss J. M. (Jr.), Mintz E. A., Shofner M. L. Dispersion control and characterization in multiwalled carbon nanotube and phenylethynyl-terminated imide composites // Composites Science and Technology. 2010. Vol. 70. P. 822–828.

18. **Tombler T. W.** Coupled electro-mechanical behavior of carbon nanotubes // Nature. 2000. Vol. 405. P. 769–772.

19. Li G.-Y., Wang P. M., Zhao X. Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites // Cement & Concrete Composites. 2007. Vol. 29. P. 377–382.

20. Park M., Kim H., Youngblood J. P. Strain-dependent electrical resistance of multiwalled carbon nanotube/polymer composite films // Nanotechnology. 2008. Vol. 19(5). P. 055705.

Н. А. Ильин, аспирант, Т. В. Никонорова, студент, Н. Э. Шерстюк, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., Е. Д. Мишина, д-р физ.-мат. наук, доц., Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет) e-mail:alexander-nick@bk.ru

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО GaAs

Поступила 12.11.10

Представлены результаты численного моделирования и экспериментального исследования оптических свойств двумерных полупроводниковых фотонных кристаллов в зависимости от параметров структур. Исследовано распределение электромагнитного поля в структуре фотонный кристалл—волновод в зависимости от параметров структуры и длины волны излучения.

Ключевые слова: фотонные кристаллы, полупроводники, арсенид галлия, оптические волноводы

Теоретическому исследованию и моделированию параметров распределения электромагнитных полей в двумерных структурах фотонных кристаллов (Φ K) на основе полупроводниковых материалов посвящено большое число работ [1—5]. Среди них особое внимание уделяется рассмотрению систем, содержащих Φ K-волноводные элементы и структуры, так как именно такие системы обладают наиболее широкими возможностями для практических приложений.

Большинство теоретических исследований рассматривает волноводные структуры двух типов. К первому типу относятся ФК-структуры, представляющие собой ансамбль параллельных пластин функционального материала (например, диэлектрика), разделенных прослойкой воздуха (модель "rodin-air") [1, 2]. Преимущество этих структур заключается в том, что волновод, представляющий собой "пропущенный" ряд элементов ФК-структуры, является одномодовым. Однако такие структуры достаточно трудны для практической реализации. Второй тип волноводных ФК-структур представляет собой ансамбль отверстий (чаше всего цилинлрической формы) с квадратной или гексагональной упорядоченностью, изготовленных в полупроводниковой или диэлектрической пластине. В данной геометрии волновод теоретически может иметь любую форму [3-5]; при этом могут быть реализованы меньшие по сравнению с другими типами структур потери излучения [3].

Численные расчеты и моделирование, проведенные для таких структур, показывают, что при определенных соотношениях размерных параметров структуры (период ФК, размер отверстий и т. п.) и длины волны излучения может быть определен сравнительно узкий диапазон длин волн, для которого основные параметры пропускания/отражения зависят от типа упорядоченности ФК некритическим образом (см., например, [6]). Тем не менее, для большинства исследованных ФК условия распределения электромагнитного поля в структуре в значительной степени зависят от параметров структуры и выбора геометрии ФК.

В данной работе проводится сравнительное исследование спектральных свойств двумерных фотонных кристаллов на основе GaAs, различающихся типом упорядоченности. Проведено моделирование пространственного распределения электромагнитных полей в волноводных структурах на основе полупроводниковых ФК, а также оценка влияния типа упорядоченности на основные параметры пропускания структур.

Моделирование выполняли с помощью программной среды CST Microwave Studio 2010, использующей метод FIT (метод конечного интегрирования). Подробное описание методики можно найти, например, в работах [7, 8].

Для проведения исследований была выбрана модель, представляющая собой упорядоченный ансамбль вертикальных заполненных воздухом цилиндрических отверстий в однородном слое полупроводника GaAs. Для расчета были выбраны структуры с гексагональной и квадратной упорядоченностью с соотношением периода а и длины волны излучения λ в диапазоне $0,28 \le \alpha/\lambda \le 0,3$ и диаметром отверстий $0.5a \le d \le 0.95a$. В качестве функционального материала использовали монокристаллический арсенид галлия. Для расчета были использованы данные о дисперсии диэлектрической проницаемости GaAs из работы [9]. Из справочных данных следует, что чистый монокристаллический арсенид галлия непрозрачен для всей видимой области спектра, а максимум пропускания приходится на интервал длин волн 1,7...10 мкм.

Одним из важных параметров модели является глубина отверстий h. На начальном этапе исследований для данного параметра использовалось значение h = 2 мкм, что соответствует средней глубине отверстий в реальных структурах, изготовленных методом травления фокусированным ионным пучком. При расчете параметров распределения поля в плоскости образца в зависимости от глубины отверстий было показано, что в рамках используемой модели при любом значении $h \le 2$ мкм распределение поля в плоскости XY одинаково. Следовательно, для численного эксперимента можно использовать меньшие значения глубины отверстий, что значительно (в разы) сокращает время расчета.

Волновод в двумерном ФК такого типа может быть сформирован путем "пропускания" одного периода структуры при травлении. В соответствии с [10] электромагнитное излучение с длиной волны, соответствующей запрещенной фотонной зоне, в такой структуре должно распространяться только вдоль волновода. На рис. 1 (см. третью сторону обложки) представлены результаты исследования параметров распределения электромагнитного поля с длиной волны 1550 нм в прямом волноводе, выполненном в ФК-структурах с квадратной (рис. 1, *a*) и гексагональной (рис. 1, *б*) упорядоченностью, с периодом a = 450 нм и диаметром отверстий d = 290 нм.

Интенсивность прошедшей электромагнитной волны рассчитывали исходя из следующих соображений. Результатом численного моделирования с помощью программы CST Microwave Studio является зависимость действительной $\text{Re}(E_i)$ и мнимой $\text{Im}(E_i)$ частей *i*-й компоненты (i = x, y, z) напряженности электрического поля от координаты. Напряженность электрического поля определяется как $E = A e^{i\omega t}$, где A —амплитуда электрического поля, которая рассчитывается по формуле



Рис. 2. Расчетные спектры отражения и пропускания двумерного фотонного кристалла на основе GaAs с периодом 450 нм и диаметром отверстий 290 нм с гексагональной (а) и квадратной (б) упорядоченностью. Выделенная область соответствует диапазону, в котором проводились экспериментальные исследования. Сплошной линией обозначены спектры пропускания, штрихпунктирной — спектры прохождения где, в свою очередь, $E_i = \sqrt{\text{Re}(E_i)^2 + \text{Im}(E_i)^2}$. Интенсивность прошедшей электромагнитной волны пропорциональна квадрату амплитуды электрического поля $I \sim A^2$.

Как показано на рисунке, ФК-структуры с квадратной упорядоченностью обеспечивают хорошее пропускание для выбранной длины волны, тогда как ФК-структура с гексагональной упорядоченностью практически не пропускает данное излучение, даже в области волновода.

Аналогичные исследования, проведенные для зигзагообразных волноводов, показали, что они обеспечивают еще меньшее пропускание, чем прямые волноводы; при этом параметры пропускания практически не зависят от длины волновода. Следует отметить, что данные волноводы являются чаще всего многомодовыми, что снижает эффективность распространения света в волноводе благодаря тому, что моды высоких порядков легко возбуждаются на локальных неоднородностях структуры. Влиянием того же фактора объясняются большие потери излучения при прохождении через структуру.

Результаты моделирования спектров пропускания и отражения фотонных кристаллов с разным типом упорядоченности показаны на рис. 2. В окне пропускания GaAs (0,9...15 мкм) фотонный кристалл с квадратным типом упорядочения (рис. 2, δ) имеет в исследуемом диапазоне длин волн две запрещенные фотонные зоны (3ФЗ): 1049...1177 нм и 1417...1514 нм. Ширина ЗФЗ оценивалась по положению края полосы поглощения в спектре ФК. Для ФК с гексагональным типом упорядоченности (рис. 2, a) также наблюдаются две запрещенные фотонные зоны: в области 1134...1309 нм и 1600...2000 нм. Как следует из сравнения спектров, тип упорядоченности ФК оказывает критическое влияние на вид и положение ЗФЗ.

Чтобы выявить закономерности изменения положения запрещенной зоны, были проведены расчеты спектров пропускания и отражения ФК с фиксированным периодом при изменении диаметра отверстий фотонного кристалла. При увеличении диаметра отверстий положение ЗФЗ для обоих типов упорядоченности смещается в область более коротких волн. Кроме того, увеличивается и ширина ЗФЗ.

Исследование спектров пропускания ФК-структур, содержащих прямой волновод, показало, что для данной структуры наличие волновода не приводит к существенному изменению параметров пропускания во всем исследованном диапазоне, кроме области 15, соответствующей границе ЗФЗ (рис. 3). Включение волновода в ФК-структуру приводит к снижению потерь в данной области более чем в 1,5 раза. Для ФК-структур с гексагональным типом упорядоченности численное моделирование спектральных параметров не показало заметного влияния на пропускание наличия в структуре волновода, что согласуется с данными, приведенными на рис. 1.

Для экспериментальной проверки расчетной модели методом травления фокусированным ионным пучком были изготовлены ФК-структуры с квадратной упорядоченностью, периодом структуры 450 нм



Рис. 3. Спектры пропускания Φ К-структур с квадратным типом упорядоченности (a = 450 нм, d = 290 нм), содержащие Φ К-волновод (сплошная линия), и структур без Φ К-волновода (штриховая линия)

и диаметром отверстия 290 нм (вставка на рис. 4). Размер структуры составлял 25×25 мкм. ФКструктуры были изготовлены на основе пластины монокристаллического арсенида галлия шириной 70 мкм. Эффективная толщина структуры (глубина отверстий) составляла 2 мкм. Дополнительно в области ФК-структуры были вытравлены технологические отверстия, позволяющие подвести волноводы, обеспечивающие ввод излучения в структуру и считывание прошедшего излучения вплотную к ФК-структуре.

В качестве источника излучения использовался лазер с перестройкой частоты 1500...1600 нм. Ввод излучения в ФК-волновод осуществлялся с помощью модифицированного оптического волокна с диаметром выходного отверстия порядка 1 мкм [11]. Использование такого волокна позволило обеспечить максимально точное позиционирование входного волокна относительно ФК-волновода, тем самым уменьшив потери интенсивности излучения при вводе в структуру. Для оценки эффективности передачи сигнала в системе, где в качестве входного и выходного использовались модифицированные волноводы, была измерена зависимость интенсивности излучения, принятого приемником, от расстояния между волноводами. Измерения проводились в воздухе в диапазоне длин волн 1500...1600 нм. Было показано, что при увеличении расстояния между модифицированными волноводами от 0 до 30 мкм потери излучения возрастают более чем в 1.3 раза. Таким образом, использование модифицированного волокна в качестве приемного (выходного) нецелесообразно. Для приема излучения было использовано стандартное оптическое волокно Corning SMF-28 10/125 диаметром 125 мкм, обеспечивающее минимальные потери излучения при приеме.

Образец, входное и выходное волокна крепились на мультикоординатных независимых платформах, обеспечивающих линейные перемещения с шагом менее 1 мкм. Совмещение волокон и образца осуществлялось с помощью оптического микроскопа с увеличением в 200 раз.

Размер сердцевины волновода, которая принимает оптический сигнал, равен 10 мкм. В такой конфигурации были измерены потери излучения с длиной волны в диапазоне 1500...1600 нм при прохождении через структуру в трех областях: в области ФК-волновода (А), фотонного кристалла (В) и в "чистом" материале GaAs вдали от ФК-структуры (С) (рис. 4). Показано, что потери излучения в об-



Рис. 4. Исследование пропускания волноводной ФК-структуры с квадратным типом упорядочения. На вставке — изображение структуры, полученное методом электронной микроскопии. Размер структуры 25 × 25 мкм, период 450 нм, диаметр отверстий 290 нм

ласти ФК-волновода значительно ниже, чем в области фотонного кристалла и, тем более, монокристалла GaAs.

Таким образом, методом FIT были проанализированы спектральные свойства ФК-структур, содержащих волновод, с гексагональной и квадратной упорядоченностью. Как было показано, свойства структур при заданных параметрах ФК существенно зависят от типа упорядочения. Одной из основных причин значительных потерь излучения телекоммуникационного диапазона в таких структурах может служить многомодовость ФК-волновода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Список литературы

1. Fan S. H., Johnson S. G., Joannopoulos J. D. and other. Waveguide branches in photonic crystals // J. Opt. Sci. Am. 2001. B 18. P. 162-167.

2. Ziyou Zhou, Xiaoyue Huang, Raghav Vanga, and Rong Li. Tunable photonic crystals based on ferroelectric and ferromagnetic materials by focused ion beam // Chinese Optics Letters. 2007. Vol. 5. N 12. 693 p.

3. Mingaleev S. F., Schillinger M. and Hermann D., Busch K. Tunable photonic crystal circuits: concepts and designs based on

single-pore infiltration // Optics Letters, 2004. Vol. 29. N 24. P. 2858-2860.

4. Wilson R., Karle T. J., Moerman I. and Krauss T. F. Efficient photonics crystal Y-junctions // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2003. Vol. 5. P. S76- S80.

5. Yoshimasa Sugimoto, Hitoshi Nakamura, Yu Tanaka, and other. High-presision optical interference in Mach-Zender-type photonic crystal waveguide // Optics Express. 2005. Vol. 13. N 1. P. 96.

6. Nordseth O., Bernstein R. W., Grepstad J. and Tybell Th. Simulation of photonic waveguides in ferroelectric thin films // 3rd National FUNMAT meeting, 5–6 January, 2006.

7. Kane Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // Antennas and Propagation, IEEE Transactions on 14: P. 302-307.

8. Clemens M. and Weiland T. Discrete electromagnetism with the finite integration technique // Progress in Electromagnetic Research. 2001. Vol. 32. P. 65-87.

9. Palik D. Handbook of optical constants of solids. Florida: Edward Academic press, Inc., Orlando, 1985.

10. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solidstate physics and electronics // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58. P. 2059-2062.

11. Ильин Н. А., Макаревич Т. В. Разработка и исследование свойств фотоннокристаллических структур на основе монокристаллического GaAs // Материалы IX Международной научно-технической конференции "Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения" (INTERMATIC-2010), 23-27 ноября 2010 г. Москва, 2010.

УДК 537.533.2

Н. В. Лупарев¹, аспирант,

Е. П. Шешин¹, д-р физ.-мат. наук, проф.,

Н. Н. Чадаев¹, канд. физ.-мат. наук, проф., **С. К. Гордеев**², д-р техн. наук, нач. лаб.,

- С. Б. Корчагина², ст. науч. сотр.,

¹ Московский Физико-технический институт (ГУ),

² ОАО "Центральный научно-исследовательский институт материалов",

e-mail: luparev@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОЭМИССИОННЫХ СВОЙСТВ ΚΟΜΠΟ3ИΤΟΒ ΑΛΜΑ3—ΥΓΛΕΡΟΔ

Поступила в редакцию 12.11.10

Представлены экспериментальные результаты исследований автоэмиссионных свойств наноструктурных углеродных алмазосодержащих материалов. Предметом исследований являлись композиционные образцы, размер частиц алмаза и содержание пироуглерода в которых варьировались в широких пределах. Проведен анализ вольт-амперных характеристик и зависимостей автоэмиссионного тока от давления остаточных газов.

Ключевые слова: автоэлектронная эмиссия, автоэмиссионные катоды, композиты алмаз-углерод, углеродные материалы

Введение

Применение автоэмиссионных катодов в области катодолюминесцентных источников света в настоящее время начало развиваться достаточно интенсивно. Катодолюминесцентные источники имеют следующие преимущества по сравнению с другими источниками света: высокая яркость и высокая скорость включения и выключения. Применение автоэлектронной эмиссии дополняет к этому еще широкий диапазон рабочих температур, высокую эффективность и меньшие размеры источников электронов.

Последние годы наибольшей популярностью пользуются углеродные нанотрубки [1-3] и волокна [4]. Это связано с тем, что данные материалы имеют ряд преимуществ по отношению к остальным углеродным материалам. Однако успешное применение таких материалов осложняется наличием трудностей при создании конечных приборов — это проблема фиксации катода, высокая стоимость производства, требования к вакуумным условиям и устойчивости эмиссионных характеристик катодов к бомбардировке остаточными газами, вакуумные пробои и т. д. В данное время все еще продолжается поиск новых углеродных материалов для использования в качестве автоэмиттеров.

Целью данной работы являлось исследование новых материалов — композитов углерод — алмаз — и выбор на основе полученных данных одного образца для дальнейших исследований и создания автоэмиттера на его основе. Как показали предварительные исследования [5], композиты углерод—алмаз могут при очень хорошей технологичности обладать требуемыми эмиссионными свойствами.

Исследуемые образцы

Композиты содержали диэлектрические частицы алмаза, окруженные и связанные графитоподобной проводящей пироуглеродной матрицей [6, 7] (рис. 1). Образцы изготовлялись посредством химического осаждения пиролитического углерода из газовой фазы при высокой температуре в среде метана в поры диэлектрического компакта, который получали, в свою очередь, прессовкой частиц алмаза. Нанопоры, представленные в композитах, также играют роль "диэлектрических частиц".

Проводились исследования следующих композиционных материалов (табл. 1):

- наноалмаз—углерод: НАК-20, НАК-30, НАК-40 с содержанием углеродной матрицы 20, 30 и 40 % от содержания наноалмаза соответственно (размер частиц наноалмаза ~5 нм);
- субмикроалмаз—углерод: МАК(1/0)-10 и МАК(1/0)-20 с содержанием углеродной матрицы 10 и 20 % от содержания субмикроалмаза, соответственно (размер частиц субмикроалмаза ~200 нм);
- алмаз—углерод на основе нано- и субмикроалмаза: MC50(1/0)-20 с содержанием углеродной матрицы 20 % от содержания алмаза.

Исследования структуры образцов

В работе были проведены ACM исследования образца HAK-20. По данным этих исследований образец имеет ярко выраженную зернистую структуру. Латеральный размер зерна — порядка 100 нм. Существуют области как с плотно прилегающими друг к другу зернами, так и с отдельными зернами, помещенными в однородный материал.

С помощью метода латеральных сил и метода модуляции силы установлено, что зерна состоят из материала с другими механическими свойствами, чем окружающий их материал. Так, хорошо прослеживается, что коэффициент трения материала зерна больше, чем у окружающего материала.



Рис. 1. Схематическое изображение структуры композитов алмаз-пироуглерод [6, 7]

Параметры исследуемых образцов (обозначения образцов даны производителем — Центральным научно-исследовательским институтом материалов

Таблица 1

Наименование	Размер частиц	Содержание пиро-
образца	алмаза, нм	углерода, % от алмаза
HAK-20	~5	20
HAK-30	~5	30
HAK-40	~200	40
MAK-10	~200	10
MAK-20	~5 - 50 %	20
MC-20	~200 - 50 %	20

Вместе с тем, очевидно, что жесткость зерен отличается от жесткости окружающего материала. Например, жесткость отдельного зерна больше жесткости материала, в который оно погружено. Для зерен, вплотную прилегающих друг к другу, также хорошо виден контраст жесткостей. Однако здесь уже существенный вклад в картину распределения жесткости вносит взаимный контакт зерен друг с другом и степень погруженности отдельных зерен в материал основы.

Также была обнаружена область, в которой зерна размером 100 нм состоят из более мелких зерен с вертикальным размером порядка 1 нм и латеральным размером менее 10 нм (рис. 2—5). Однако конструктивные особенности АСМ (конкретно, радиус закругления зонда) и понятие о сплошности материалов не позволили нам охарактеризовать механические (трение и жесткость) и электрические свойства зерен.

Далее исследовалась поверхность скола образца МАК-20 в растровом электронном микроскопе. Изображения поверхности сколов образца МАК-20 и образца НАК-20 для сравнения с одинаковым увеличением приведены на рис. 6.



Рис. 2. Рельеф области 200 × 200 нм



Рис. 4. Рельеф области 200 × 200 нм

50

Из рис. 6 видно, что при данном увеличении образец МАК-20 имеет ярко выраженную зернистую структуру с четко различимыми зернами в отличие от образца НАК-20, зерна которого при данном увеличении не различимы.

100

HM

150

200

Автоэмиссионные исследования

Автоэмиссионные измерения проводились с осколка образца в диодном режиме. Для каждого образца снимались вольт-амперные характеристики и осциллограммы автоэмиссионного тока при разных давлениях. На основе полученных осциллограмм были построены графики зависимости шума эмиссии от давления остаточных газов.

На рис. 7 приведены вольт-амперные характеристики для всех образцов. Из приведенных характеристик видно, что образцы субмикроалмаз—углерод и алмаз—углерод имеют более высоковольтные харак-









Рис. 6. Поверхность сколов образцов в растровом электронном микроскопе: a = MAK 20: b = HAK 20

a — MAK-20; *б* — HAK-20

100 HM

ß









теристики. Ввиду низкой крутизны вольт-амперной характеристики этих материалов не удастся получить автоэмиссионный ток более высокий, чем с образцов наноалмаз—углерод.

График зависимости шума эмиссии от давления остаточных газов для всех образцов представлен на рис. 8. Для большей наглядности данные по нестабильности тока для каждого образца были аппроксимированы линейным уравнением (рис. 9). Из рис. 9 видно, что для образцов микроалмаз—углерод шум эмиссии слабо зависит от давления и при давлении 10^{-7} Торр почти в 2 раза превышает шум эмиссии для образцов наноалмаз—углерод и субмикроалмаз—углерод.

Катоды на основе материалов наноалмаз—углерод и алмаз—углерод при давлениях ~8 · 10⁻⁶...10⁻⁷ Торр наиболее стабильны. Именно такое давление существует в отпаянных электровакуумных приборах, прошедших стандартный цикл вакуумирования. Таким образом, катоды на основе этих материалов



Рис. 9. Зависимость шума эмиссии от давления остаточных газов (линии аппроксимации)

должны быть стабильны, а следовательно, и наиболее долговечны в отпаянных электровакуумных приборах.

Заключение

В табл. 2 приведены значения для нестабильности автоэмиссионного тока ($\Delta I_c/I_c$) при давлении 10^{-7} Торр и пороговое напряжение ($U_{\text{пор}}$), которое определялось как значение напряжения при токе катода 1 нА.

В ходе проделанной работы получены следующие результаты.

1. Образцы композитов наноалмаз—углерод имеют более низкое значение порогового напряжения эмиссии, чем композиты субмикроалмаз—углерод.

2. Композиты наноалмаз—углерод обеспечивают высокую стабильность автоэмиссионного тока по сравнению с образцами субмикроалмаз—углерод и алмаз—углерод.

3. В ряду композитов наноалмаз—углерод наблюдается ухудшение эмиссионных характеристик материалов с увеличением содержания углеродной матрицы в них.

На основе полученных данных из шести исследуемых образцов был выбран НАК-20, так как автоэмиссионный катод на основе этого образца имеет

Таблица 2

Полученные данные для всех образцов

Наименование образца	$\Delta I_{\rm c}/I_{\rm c},~\%$	$U_{\text{пор}}, B$
HAK-20 HAK-30 HAK-40 MAK-10 MAK-20	1,8 2,1 1,9 3,1 3,0	790 870 1230 2590 2690
MC-20	1,6	2870

самую низковольтную характеристику и относительно низкое значение $\Delta I_c/I_c$ при давлении 10^{-7} Торр. Данный образец отработал порядка 150 часов и в течение этого времени показал довольно стабильную эмиссию.

Проведенные исследования показали, что композиты углерод—алмаз при очень хорошей технологичности имеют требуемые автоэмиссионные свойства, и при дальнейшем их изучении могут найти свое применение в качестве автоэмиттеров.

Список литературы

1. **Huang J. X., Chen Jun, Deng S. Z.** et al. Optimization of carbon nanotube cathode for a fluorescent lamp // Proc. of the IVNC. 2005. P. 284.



3. Arfaoni I. et al. Toward lighting devices and flat panel displays based on carbon nanotube field emitter // Proc. of the IVESC. 2002. P. 139.

IVESC. 2002. P. 139.
4. Knapp W., Schleussner D., Baturin A. S. et al. CRT lighting element with carbon field emitters // Vacuum. 2003. V. 69.
P. 339–344.

5. **Ralchenko V., Karabutov A., Vlasov I.** et al. Diamond/carbon nanocomposites: applications for diamond film deposition and field electron emission // Diamond and Related Materials. 1999. V. 8. P 1496–1501.

6. Vlasov A., Ralchenko V., Gordeev S. et al. Thermal properties of diamond/carbon composites // Diamond and Related Materials. 2002. V. 9. P. 1104–1109.

7. Karabutov A. V., Ralchenko V. G., Vlasov I. I. et al. Dielectric-carbon composites for field electron emitters // Proc. of the IVMC. 2001. P. 339–344.



УДК 531.787.084.2:629.735

Н. Е. Белозубова, аспирант, ОАО "Научно-исследовательский институт физических измерений", г. Пенза, e-mail: niiti@sura.ru

МЕТОД МИНИМИЗАЦИИ ВЛИЯНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУР И ВИБРОУСКОРЕНИЙ НА ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ НАНО-И МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Поступила 13.12.10

Предложен метод минимизации влияния нестационарных температур и виброускорений на датчики давления на основе тонкопленочных нано- и микроэлектромеханических систем. Рассмотрены пути симметрирования тепловых потоков и геометрических, физикохимических характеристик элементов конструкции при воздействии симметричного и асимметричного относительно оси упругого элемента HuMЭMC нестационарного температурного поля. Предложены конкретные реализации их элементов конструкций.

Ключевые слова: тонкопленочные нано- и микроэлектромеханические системы (HuMЭMC), идентичные тензоэлементы, нестационарная температура

Тонкопленочные тензорезисторные датчики давлений (ТТДД), разработанные и изготавливаемые ОАО "НИИФИ" в настоящее время, обладают наивысшей (среди известных аналогов) стойкостью к воздействию жестких дестабилизирующих факторов, достаточной точностью, малыми массой и габаритными размерами. Высокое качество этих датчиков во многом определило и определяет успешную отработку и штатную эксплуатацию большинства отечественных изделий ракетно-космической техники. Модернизируемая и вновь создаваемая в соответствии с федеральными программами ракетная и авиационная техника потребовали дальнейшего совершенствования этих датчиков. Анализ результатов эксплуатации датчиков давления в изделиях ракетной техники выявил критичные для датчиков внешние факторы: воздействия широкого диапазона нестационарных температур измеряемой и окружающей среды, а также повышенных виброускорений в широком диапазоне частот.

В соответствии с современными представлениями ТТДД являются изделиями нано- и микросистемной техники и представляют собой гетерогенные структуры, использующие в качестве чувствительных элементов нано- и микроэлектромеханические системы (НиМЭМС) [1]. В результате проведенных исследований установлена существенность влияния термоэлектрических явлений на погрешность ТТДД при воздействии на них нестационарных температур и виброускорений [2]. В работе [2] определены также частные условия минимизации нескомпенсированной термоЭДС тонкопленочной структуры НиМЭМС: отсутствие отклонений формы, размеров, физикохимических характеристик элементов тензосхемы, их расположения относительно элементов конструкции. Также установлено, что при воздействии нестационарных температур (в том числе — вызванных виброускорениями) на ТТДД выходной сигнал датчика зависит как от поведения НиМЭМС, так и от поведения измерительных и питающих цепей, соединяющих тонкопленочную НиМЭМС-структуру с выходом датчика. Эти цепи с точки зрения термоэлектрических явлений включают неоднородные термоэлектрические структуры: выводные проводники, термовыводы, провода, контакты разъема и т. д. Причем вследствие существенно меньших (более чем на 3 порядка) реальных термоЭДС в питающих цепях по сравнению с напряжением питания влиянием питающих цепей в этом случае можно пренебречь.

Обобщая разработанное в статье [2] выражение для математической модели неинформативного преобразования термоЭДС в выходной сигнал ТТДД при воздействии нестационарных температур и виброускорений, получим

$$U_{\text{BbIX}}(T) = \sum_{j=1}^{4} \left\{ \sum_{i=1}^{I} \left[\sum_{m=1}^{M} E_{jim}(T) + \int_{T_{jik}}^{T_{jik}} \sigma_{\alpha i j}(T) \right] \right\} \times \left\{ \sum_{j=1}^{4} R_{j}(T) \right]^{-1} \left[R_{4}(T) + R_{1}(T) \right] + \left\{ \sum_{j=1}^{I} \left[\sum_{m=1}^{M} E_{1im}(T) + \int_{T_{1ik}}^{T_{1ik}} \sigma_{\alpha 1 i}(T) dT \right] + \left\{ \sum_{i=1}^{I} \left[\sum_{m=1}^{M} E_{4im}(T) + \int_{T_{4ik}}^{T_{4ik}} \sigma_{\alpha 4 i}(T) dT \right] + \left\{ \sum_{n=1}^{N} \left[E_{An}(T) + \int_{T_{Ank}}^{T_{Ank}} \sigma_{\alpha An}(T) dT \right] - \left\{ \sum_{n=1}^{N} \left[E_{Bn}(T) + \int_{T_{Bnk}}^{T_{Bnk}} \sigma_{\alpha Bn}(T) dT \right] \right\},$$
(1)

где $T = f(T_{HM}, T_{HO}, W); T_{HM}$ – нестационарная температура измеряемой среды; $T_{\rm HO}$ — нестационарная температура окружающей среды; W — амплитуда виброускорений; 4 — число тензорезисторов в мостовой измерительной схеме НиМЭМС; І — число тензоэлементов в тензорезисторе; М — число термоэлектрических структур в тензоэлементе; $E_{iim}(T) - m$ -я термоЭДС *і*-го тензоэлемента *j*-го тензорезистора; Т_{*j*ін} — температура в начале *i*-го тензоэлемента *j*-го тензорезистора; T_{*i*iк} — температура в конце *i*-го тензоэлемента *j*-го тензорезистора; $\sigma_{\alpha j i}(T)$ — коэффициент Томсона для материала і-го тензоэлемента ј-го тензорезистора; $R_j(T) = \sum_{i=1}^{I} R_{ji}$ — сопротивление *j*-го тензорезистора; $E_{An}(T)$, $E_{Bn}(T)$ — термоЭДС *n*-й термоэлектрической неоднородности соответственно первой и второй измерительных цепей, соединяющих тонкопленочную НиМЭМС-структуру с выходом датчика; *Т*_{Алн}, *Т*_{Алк}, *Т*_{Влн}, *Т*_{Влк} – температура в начале и конце *n*-й термоэлектрической неоднородности соответственно первой и второй измерительных цепей, соединяющих тонкопленочную НиМЭМС-структуру с выходом датчика; $\sigma_{\alpha An}(T)$, σ_{α Вn}(T) – коэффициенты Томсона материала *n*-й

термоэлектрической неоднородности соответственно первой и второй измерительных цепей, соединяющих тонкопленочную НиМЭМС-структуру с выходом датчика.

Выражение (1) при $U_{\rm BMX}(T) = 0$ является общим условием минимизации нескомпенсированной термоЭДС ТТДД при воздействии нестационарных температур и виброускорений. Для проведения качественного анализа влияния нестационарных температур и виброускорений рассмотрим полученную модель при достаточно малых различиях температур элементов. В этом случае, условно пренебрегая нелинейным характером распределения температур в пределах конкретных элементов, можно представить выражение для упрощенной математической модели неинформативного преобразования термо-ЭДС в выходной сигнал ТТДД в виде

$$\begin{split} U_{\rm BbIX}(T) &= \sum_{j=1}^{4} \left\{ \sum_{i=1}^{I} \left[\sum_{i=1}^{M} S_{jim}(T_{jim} - T_{j-1}, i-1, m-1) + \right. \right. \\ &+ \sigma_{\alpha j i}(T_{ji\kappa} - T_{jiH}) \right] \right\} \left\{ \sum_{j=1}^{4} R_{j0}[1 + \alpha_{j}\Delta T_{j}] \right\}^{-1} \times \\ &\times \left\{ [R_{40}[1 + \alpha_{4}\Delta T_{4}] + R_{10}[1 + \alpha_{1}\Delta T_{1}] \right\} + \\ &+ \sum_{i=1}^{I} \left[\sum_{m=1}^{M} S_{1im}(T_{1im} - T_{1,i-1,m-1}) + \right. \\ &+ \sigma_{\alpha 1i}(T_{1i\kappa} - T_{1iH}) \right] + \\ &+ \sum_{i=1}^{I} \left[\sum_{m=1}^{M} S_{4im}(T_{4im} - T_{4,i-1,m-1}) + \right. \\ &+ \sigma_{\alpha 4i}(T_{4i\kappa} - T_{4iH}) \right] + \sum_{n=1}^{N} [S_{An}(T_{An} - T_{An-1}) + \\ &+ \sigma_{\alpha An}(T_{An\kappa} - T_{AnH})] - \\ &- \sum_{n=1}^{N} [S_{Bn}(T_{Bn} - T_{Bn-1}) + \sigma_{\alpha Bn}(T_{Bn\kappa} - T_{BnH})], (2) \end{split}$$

где S_{jim} — коэффициент термоЭДС контактирующих материалов *m*-й термоэлектрической структуры *i*-го тензоэлемента *j*-го тензорезистора; T_{jim} — температура контактирующих материалов *m*-й термоэлектрической структуры *i*-го тензоэлемента *j*-го тензорезистора; R_{j0} — сопротивление *j*-го тензорезистора при начальной среднеинтегральной температуре *j*-го тензорезистора; α_j — температурный коэффициент сопротивления *j*-го тензорезистора; ΔT_j — изменение среднеинтегральной температуры *j*-го тензорезистора; S_{An} , S_{Bn} — коэффициенты термоЭДС контактирующих материалов *n*-й термоэлектрической неоднородности соответственно первой и второй измерительных цепей, соединяющих тонкопленочную НиМЭМС-структуру с выходом датчика; T_{An} , T_{Bn} — температура *n*-й термоэлектрической неоднородности соответственно первой и второй измерительных цепей, соединяющих тонкопленочную HиMЭMCструктуру с выходом датчика.

Анализ полученной модели (2) позволяет сделать вывод, что выходной сигнал датчика при воздействии нестационарных температур и виброускорений зависит от коэффициентов термоЭДС и коэффициентов Томсона материалов, от разности и от изменения температур термоэлектрических неоднородностей HиMЭМС-структуры и измерительных цепей, соединяющих тонкопленочную HиMЭМСструктуру с выходом датчика.

Из выражения (2) также видно, что в идеальном ТТДД, т. е. в котором элементы размещены симметрично воздействию нестационарного температурного поля и имеют идентичные геометрические и физико-химические характеристики при воздействии, выходной сигнал ТТДД будет равен нулю при отключенном источнике питания. Так как при изготовлении ТТДД всегда допускаются некоторые отклонения геометрических характеристик (формы, размеров элементов, их взаимного расположения) и отклонения физико-химических характеристик элементов, приводящие к появлению дополнительных термоэлектрических неоднородностей, то выходной сигнал с датчика при воздействии на него нестационарной температуры (при отсутствии напряжения питания) не будет равен нулю. При воздействии нестационарной температуры окружающей среды, направленной не вдоль продольной оси датчика, в нем возникает трехмерное, неравномерное, несимметричное температурное поле. В этом случае даже при отсутствии отклонений геометрических и физикохимических характеристик элементов ТТДД выходной сигнал (при отсутствии напряжения питания) не будет равен нулю.

Непосредственно из закона Фурье следует, что при конкретном тепловом потоке градиент температуры обратно пропорционален коэффициенту теплопроводности

grad
$$T = -q\lambda^{-1}$$
,

где q — плотность теплового потока; λ — коэффициент теплопроводности материала.

Тогда после преобразований получаем выражения для разностей соответствующих температур:

$$\begin{split} (T_{jim} - T_{j-1,i-1,m-1}) &= -\lambda_{jim-(j-1,i-1,m-1)}^{-1} \times \\ &\times (\Psi_{jim} - \Psi_{j-1,i-1,m-1})q_{jim-(j-1,i-1,m-1)}; \\ (T_{jiK} - T_{jiH}) &= -\lambda_{jiK-jiH}^{-1} (\Psi_{jiK} - \Psi_{jiH})q_{jiK-jiH}; \\ &\Delta T_{j} &= -\lambda_{j}^{-1} \Psi_{j}q_{j}; \ \Delta T_{4} &= -\lambda_{4}^{-1} \Psi_{4}q_{4}; \\ &\Delta T_{1} &= -\lambda_{1}^{-1} \Psi_{1}q_{1}, \ (T_{1im} - T_{1,i-1,m-1}) &= \\ &= -\lambda_{1im-(1,i-1,m-1)}^{-1} (\Psi_{1im} - \Psi_{1,i-1,m-1}) \times \\ &\times q_{1im-(1,i-1,m-1)}; \end{split}$$

$$(T_{1i\kappa} - T_{1iH}) = -\lambda_{1i\kappa-1iH}^{-1} (\Psi_{1i\kappa} - \Psi_{1iH}) q_{1i\kappa-1iH}; (T_{4im} - T_{4,i-1,m-1}) = -\lambda_{4im-(4,i-1,m-1)}^{-1} \times \times (\Psi_{4im} - \Psi_{4,i-1,m-1}) q_{4im-(4,i-1,m-1)}; (T_{4i\kappa} - T_{4iH}) = -\lambda_{4i\kappa-4iH}^{-1} (\Psi_{4i\kappa} - \Psi_{4iH}) q_{4i\kappa-4iH}; (T_{An} - T_{An-1}) = = -\lambda_{An-An-1}^{-1} (\Psi_{An} - \Psi_{An-1}) q_{An-An-1};$$
(3)

$$T_{An\kappa} - T_{AnH} = -\lambda_{An\kappa-AnH}^{-1} \times \times (\Psi_{An\kappa} - \Psi_{AnH}) q_{An\kappa-AnH}; (T_{Bn} - T_{Bn-1}) = -\lambda_{Bn-Bn-1}^{-1} \times \times (\Psi_{An\kappa} - \Psi_{AnH}) q_{Bn-Bn-1}; T_{Bn\kappa} - T_{BnH} = -\lambda_{Bn\kappa-BnH}^{-1} \times \times (\Psi_{Bn\kappa} - \Psi_{BnH}) q_{Bn\kappa-BnH}; \Psi = (X^{2} + Y^{2} + Z^{2})^{0,5}.$$

Анализ упрощенной модели неинформативного преобразования (2) с учетом полученных выражений для разностей температур (3) показывает, что для минимизации влияния температур и виброускорений на ТТДД необходимо иметь минимальный коэффициент термоЭДС контактирующих материалов, максимальный коэффициент теплопроводности всех элементов конструкции, минимальные расстояния между соответствующими элементами и минимальные плотности тепловых потоков между этими элементами (частные условия минимизации).

На основании полученных частных условий минимизации влияния температур и виброускорений на НиМЭМС и ТТДД можно сформулировать метод минимизации влияния нестационарных температур и виброускорений на ТТДД, заключающийся в симметрировании тепловых потоков, геометрических и физико-химических характеристик элементов конструкции, уменьшении коэффициентов термоЭДС контактирующих материалов, расстояний, плотности тепловых потоков между элементами конструкции и обеспечении максимального коэффициента теплопроводности этих элементов.

Рассмотрим возможность симметрирования тепловых потоков, геометрических и физико-химических характеристик элементов конструкции при воздействии как симметричного, так и асимметричного относительно оси упругого элемента HиMЭMC нестационарного температурного поля. Конечно, в реальных условиях эксплуатации воздействие симметричного относительно оси упругого элемента HиMЭMC нестационарного температурного поля в чистом виде встречается достаточно редко. Поэтому необходимо искусственное симметрирование температурного поля с помощью специальных симметрирующих устройств, размешенных, например, в случае воздействия нестационарной температуры измеряемой среды перед упругим элементом HиMЭMC.

В результате ранее проведенных исследований установлено, что выполнение НиМЭМС в виде про-

- НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 3, 2011 –



Рис. 1. НиМЭМС с уменьшенной вероятностью несимметричности технологического разброса геометрических размеров и физических характеристик тензоэлементов

странственно распределенных идентичных тензоэлементов, соединенных низкоомными перемычками, позволяет разместить тензорезисторы в зонах одинаковых температур и минимальных термодеформаций, что является существенной предпосылкой уменьшения влияния нестационарных температур на характеристики датчиков. В связи с этим особое внимание целесообразно уделить минимизации влияния нестационарных температур в НиМЭМС с идентичными тензоэлементами. При этом необходимой основой методологии минимизации являются результаты анализа созданных моделей неинформативного преобразования термоЭДС в выходной сигнал и разработанный метод минимизации влияния нестационарных температур и виброускорений на ТТЛЛ.

Одно из возможных направлений — минимизация влияния нестационарных температур за счет уменьшения вероятности несимметрии тензоэлементов и низкоомных перемычек, соединяющих окружные и радиальные тензорезисторы, случайного технологического разброса геометрических размеров и физических характеристик окружных и радиальных тензорезисторов, суммарной интегральной термоЭДС относительно осесимметричного нестационарного температурного поля.

НиМЭМС (рис. 1) содержит корпус 1, круглую мембрану 2 с периферийным основанием 3, по которому мембрана закреплена в корпусе, соединенные тонкопленочными перемычками 4 из низкоомного материала и включенные соответственно в противоположные плечи измерительного моста окружные 5 и радиальные 6 тензорезисторы, выполненные в виде одинакового числа соединенных перемычками 4, имеющих одинаковую форму тензоэлементов 7, расположенных по окружности на периферии мембраны, находящейся около ее границы 8. Каждый тензоэлемент 7 выполнен в виде соединенных идентичными тонкопленочными перемычками 9 одинакового числа идентичных микротензоэлементов 10, равномерно размещенных внутри границ тензоэлементов [3]. Тонкопленочные перемычки 4, которыми соединены тензоэлементы окружных и радиальных тензорезисторов, частично замкнуты дополнительными перемычками 11.

Мембрана 2 с периферийным основанием 3 выполнена из сплава 36НКВХБТЮ. На планарную сторону мембраны последовательно методами тонкопленочной технологии нанесена изоляционная пленка 12 из монооксида кремния с подслоем хрома, тензоэлементы 7, выполненные из сплава Х20Н75Ю, и перемычки 4, выполненные из золота Зл 999,9 с подслоем ванадия, образующие тензосхему 13. Тензосхема с помощью выводных проводников 14 соединена с термовыводами 15.

При воздействии нестационарной температуры измеряемой среды, например, при воздействии на датчик, находящийся в нормальных услови-

ях, давления жидкого кислорода на поверхности мембраны возникает нестационарное температурное поле.

В предлагаемой НиМЭМС различная реакция окружных 5 и радиальных 6 тензорезисторов на воздействие температуры уменьшается за счет уменьшения вероятности превалирования сопротивлений окружных или радиальных тензорезисторов вследствие того, что каждый (радиальный и окружной) тензоэлемент выполнен в виде соединенных идентичными тонкопленочными перемычками одинакового числа идентичных микротензоэлементов, равномерно размещенных внутри границ тензоэлементов. Такое выполнение тензоэлементов позволяет уменьшить вероятность негативного распределения технологических разбросов формы, размеров и физических характеристик за счет большого числа микротензоэлементов.

Тонкопленочные перемычки 4, которыми соединены тензоэлементы окружных и радиальных тензорезисторов, частично замкнуты дополнительными перемычками 11 для обеспечения возможности дальнейшей и окончательной минимизации имеющейся при реальном производстве случайным образом распределенной по поверхности чувствительного элемента разницы ТКС радиальных и окружных тензорезисторов, появляющейся в результате технологического разброса геометрических размеров и физических характеристик тензорезисторов.

Оптимизацию соотношений проведем, учитывая, что изменение начального выходного сигнала мостовой измерительной схемы от температуры определяется выражением [3]

$$\Delta U(T) = U^{-1}k(k+1)^{-2}\sum_{j=1}^{J} \Delta R_j(T) R_j^{-1},$$

где U— напряжение питания измерительного моста; k— коэффициент симметрии измерительного моста; $\Delta U(T)$ — изменение начального выходного сигнала измерительного моста от изменения температуры при отсутствии замыкания тонкопленочных перемычек; ΔT — изменение температуры; $\Delta R_j(T)$ — изменение сопротивления *j*-го тензорезистора от температуры; R_j — сопротивление *j*-го тензорезистора.

Для компенсации изменения начального выходного сигнала от температуры необходимо такое изменение сопротивлений перемычек от температуры после их замыкания, которое обеспечило бы такое же по величине и противоположное по знаку изменение начального выходного сигнала, как от изменения температуры. Изменение сопротивления *j*-го тензорезистора от температуры можно выразить формулой

$$\Delta R_j(T) = \sum_{j=1}^{J} \sum_{i=1}^{T} [R_{XKij} \alpha_{XKij} \Delta T - R_{XKij} R_{Pij} (R_{XKij} + R_{Pij})^{-1} \alpha_{XPij} \Delta T],$$

где R_{XKij} — сопротивление части тонкопленочной перемычки *i*-го тензоэлемента *j*-го тензорезистора, замкнутой дополнительной перемычкой; α_{XKij} — температурный коэффициент сопротивления части тонкопленочной перемычки *i*-го тензоэлемента *j*-го тензорезистора до замыкания дополнительной перемычкой; R_{Pij} — сопротивление дополнительной перемычки *i*-го тензоэлемента *j*-го тензорезистора; α_{XPij} — результирующий температурный коэффициент сопротивления части тонкопленочной перемычки *i*-го тензоэлемента *j*-го тензорезистора; α_{XPij} — результирующий температурный коэффициент сопротивления части тонкопленочной перемычки *i*-го тензоэлемента *j*-го тензорезистора; сотретивления части тонкопленочной перемычки *i*-го тензоэлемента *j*-го тензорезистора и соответствующей дополнительной перемычки.

После преобразований получим, что характеристики тонкопленочных и дополнительных перемычек должны быть связаны соотношением [3]

$$\sum_{j=1}^{J} \sum_{i=1}^{I} [R_{XKij} \alpha_{XKij} - R_{XKij} R_{Pij} (R_{XKij} + R_{Pij})^{-1} \alpha_{XPij}] R_j^{-1} =$$

= $-(k+1)^2 \Delta U(T) U^{-1} \Delta T^{-1} k^{-1}.$ (4)

Таким образом, компенсация изменения начального выходного сигнала от температуры в соответствии с выражением (4) достигается путем замыкания тонкопленочных перемычек, включенных в определенное плечо измерительного моста (в окружной 5 или радиальный 6 тензорезисторы, см. рис. 1). В том случае, когда в результате технологического разброса ТКС окружных тензорезисторов 5 больше ТКС радиальных тензорезисторов 6, замыкаются тонкопленочные перемычки, соединяющие окружные тензоэлементы. В другом случае замыкаются тонкопленочные перемычки, соединяющие радиальные тензоэлементы. Кроме того, замыкание тонкопленочных перемычек, соединяющих окружные или радиальные тензоэлементы, обеспечивает работу перемычки в условиях, наиболее близких к условиям работы тензорезисторов, что повышает точность компенсации при воздействии нестационарных температур.

Неравномерное температурное поле, возникающее на планарной поверхности мембраны в результате воздействия нестационарной температуры измеряемой среды, приводит к появлению в измерительном мосте суммарной нескомпенсированной термоЭДС, которая является результатом взаимодействия множества включенных встречно термо-ЭДС, возникающих на границах раздела тензоэлементов и перемычек вследствие несовершенства структуры и неидентичности физических характеристик тензоэлементов и перемычек. Таким образом, суммарная нескомпенсированная термоЭДС возникает при воздействии нестационарной температуры только при наличии внутренней несимметрии измерительного моста, вызванной технологическим разбросом геометрических размеров и физических характеристик: состава и структуры тензоэлементов и перемычек. Следует отметить: так как технологический разброс носит случайный характер, то и суммарная нескомпенсированная термоЭДС носит также случайный характер как по величине, так и по знаку.

Так как каждый тензоэлемент 7 выполнен в виде соединенных идентичными тонкопленочными перемычками 9 идентичных микротензоэлементов 10, равномерно размещенных внутри границ тензоэлементов, то существенно возрастает число встречно включенных термоЭДС. НиМЭМС в соответствии с предлагаемым решением имеет от 900 до 1440 термоЭДС. Значительно большее число встречно включенных термоЭДС позволяет существенно уменьшить суммарную нескомпенсированную термоЭДС из-за участия в процессе суммирования много большего числа термоЭДС [3].

Кроме того, преимуществом такого решения является возможность увеличения рассеиваемой мощности за счет увеличения площади, занимаемой тензорезисторами, приводящая к возможности увеличения напряжения питания датчика, и, соответственно, к возрастанию выходного сигнала датчика. Преимуществом является также обеспечение с помощью последовательного и параллельного соединения микротензоэлементов возможности изменения сопротивлений тензорезисторов в широких пределах без изменения их удельного поверхностного сопротивления.

В результате испытаний экспериментальных образцов датчиков ДДВ 015, разработанных в соответствии с предлагаемым решением, установлено, что погрешность датчиков при воздействии нестационарной температуры измеряемой среды от 25 ± 10 °C до -196 °C уменьшилась на 30 %. Кроме того, предлагаемое решение обеспечивает увеличение рассеиваемой мощности в 4 раза, что позволило в 2 раза увеличить напряжение питания, а следовательно, и выходной сигнал при неизменных размерах НиМЭМС.

Рассмотрим теперь возможность искусственного симметрирования асимметричных нестационарных температур и симметричных элементов конструкции НиМЭМС, например, изображенной на рис. 1. Определение необходимых соотношений размеров элементов конструкции проведем, основываясь на следующих соображениях. При воздействии асимметричных нестационарных температур, вызванных, например, нестационарной температурой окружающей среды и повышенными виброускорениями на корпус НиМЭМС, можно выделить следующие тепловые потоки:

- Ф_м тепловой поток от корпуса к мембране упругого элемента по кратчайшему пути;
- Ф_о тепловой поток от корпуса к мембране упругого элемента по периферийному основанию.

Для повышения равномерности распределения температур на мембране НиМЭМС в зонах размещения тензорезисторов необходимо, чтобы тепловой поток от корпуса к мембране по кратчайшему пути был меньше теплового потока от корпуса к мембране по периферийному основанию $\Phi_{\rm M} < \Phi_0$. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы термическое сопротивление между внутренней поверхностью корпуса и наружной поверхностью периферийного основания в области размещения тензорезисторов было больше термического сопротивления периферийного основания от места присоединения к корпусу до тензосхемы. Термическое сопротивление между корпусом и мембраной по кратчайшему пути [5]

$$R_{\rm M} = (2\pi\lambda_{\rm c}L_{\rm o})^{-1}\ln\left(r_{\rm K}r_{\rm o}^{-1}L_{\rm o}^{-1}\right),\tag{5}$$

где $L_{\rm o}$ — высота части периферийного основания, не контактирующей с корпусом; $r_{\rm K}$ — радиус внутренней поверхности корпуса; $r_{\rm o}$ — радиус наружной поверхности периферийного опорного основания в области размещения тензорезисторов; $\lambda_{\rm c}$ — коэффициент теплопроводности среды между корпусом и периферийным основанием.

Термическое сопротивление между корпусом и мембраной по периферийному основанию

$$R_{\rm o} = L_{\rm o} (\lambda_{\rm o} A)^{-1}, \qquad (6)$$

где A — площадь поперечного сечения периферийного основания; λ_0 — коэффициент теплопроводности материала периферийного основания;

$$A = \pi \left(r_{\rm o}^2 - r_{\rm OB}^2 \right), \tag{7}$$

где $r_{\rm OB}$ — радиус внутренней поверхности периферийного основания.

Подставляя в выражение (6) выражение (7), после приравнивания выражений (5) и (6) и необходимых преобразований получаем

$$L_{\rm o} < \left[\left(r_{\rm o}^2 - r_{\rm OB}^2 \right) 0.5 \ln(r_{\rm K} r_{\rm o}^{-1}) \lambda_{\rm o} \lambda_{\rm c}^{-1} \right]^{0.5}.$$
(8)

Полученное соотношение характеризует условие превалирования теплового потока от корпуса к мембране по периферийному основанию над тепловым потоком от корпуса к мембране по кратчайшему пути, и, следовательно, условие уменьшения теплового потока на мембране, вызванного нестационарной температурой окружающей среды и повышенными виброускорениями. Для дополнительного выравнивания распределения температуры на мембране необходимо, чтобы длина кратчайшего пути теплового потока от корпуса к мембране по периферийному основанию к наиболее удаленной от воздействия нестационарной температуры точке мембраны была равна длине пути теплового потока от корпуса к мембране по периферийному основанию к наиболее близкой от воздействия нестационарной температуры точке.

Длина кратчайшего пути теплового потока от корпуса к мембране по периферийному основанию к наиболее близкой от воздействия нестационарной температуры точке мембраны равна высоте части периферийного основания, не контактирующей с корпусом. Длина кратчайшего пути теплового потока от корпуса к мембране по периферийному основанию к наиболее удаленной от воздействия нестационарной температуры точке мембраны равна части длины кривой, образованной пересечением цилиндрической поверхности опорного основания и плоскости, проходящей через наиболее удаленную от возлействия нестационарной температуры точку мембраны и наиболее близкую к воздействию нестационарной температуры точку периферийного основания. Так как мембрана круглая, то такой кривой является эллипс. Для эллипса с достаточной для данного случая точностью можно определить длину [6]

$$L_{\mathfrak{I}} = \pi(a+b),$$

где *а* — половина большой оси эллипса; *b* — половина малой оси эллипса.

В нашем случае

$$a = 0.5 \left[\left(2r_{\text{OB}} \right)^2 + L_0^2 \right]^{0.5}, \quad b = r_{\text{OB}}$$

Тогда

$$L_{3} = \pi \left[0.5 \left(4r_{\rm OB}^{2} + L_{\rm O}^{2} \right)^{0.5} + r_{\rm OB} \right]$$

Так как тепловой поток по периферийному основанию к наиболее удаленной точке воздействия направлен по половине длины эллипса и двум направлениям, можно записать выражение длины пути этого теплового потока

$$L_{\ni \oplus} = 0,25L_{\ni}.$$

Приравнивая $L_{\rm o} = L_{\rm b}$, после подстановки получим

$$L_{\rm o} = 0.25\pi \left[0.5 \left(4r_{\rm oB}^2 + L_{\rm o}^2 \right)^{0.5} + r_{\rm oB} \right]$$

После решения квадратного уравнения определим минимальную высоту части периферийного основания, не контактирующей с корпусом:

$$L_{\rm o} = 32\pi (64 - \pi^2)^{-1} r_{\rm oB}^{\rm ob}$$

Следовательно, для дополнительного выравнивания распределения температуры на мембране необходимо, чтобы высота части периферийного основания, не контактирующей с корпусом, удовлетворяла соотношению

$$L_{\rm o} \ge 32\pi (64 - \pi^2)^{-1} r_{\rm oB}.$$
 (9)

После преобразований выражения (8) и объединения с выражением (9) получаем

$$32\pi (64 - \pi^2)^{-1} r_{\rm oB} \leq L_{\rm o} \leq \\ \leq \left[0.5 \ln \left(r_{\rm K} r_{\rm o}^{-1} \right) \left(r_{\rm o}^2 - r_{\rm oB}^2 \right) \lambda_{\rm o} \lambda_{\rm c}^{-1} \right]^{0.5}.$$
(10)

– НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 3, 2011 —

- 29



Рис. 2. НиМЭМС с симметрированием асимметричных нестационарных температур и симметричных элементов конструкции

Таким образом, получено соотношение для размеров элементов конструкции, которое характеризует условие минимизации асимметрии теплового потока на мембране НиМЭМС, вызванного нестационарной температурой и повышенными виброускорениями. Конкретная реализация разработанного решения в датчиках давления ДДВ 011 позволила уточнить конфигурацию НиМЭМС, как это изображено на рис. 2, и уменьшить в 2 раза погрешность датчиков при воздействии нестационарной температуры измеряемой среды от 25 ± 10 °C до -196 °C.

Список литературы

1. Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е. Тонкопленочные тензорезисторные датчики давления — изделия нано- и микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 12. С. 49—51.

2. Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е. Термоэлектрические явления в тонкопленочных тензорезисторных датчиках давления при воздействии нестационарных температур и виброускорений // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 6. С. 61–65.

3. Мокров Е. А., Белозубов Е. М. Датчик давления. Патент РФ № 2312319. Опубл. 10.12.2007. Бюл. № 34.

4. Мокров Е. А., Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е. Тонкопленочный датчик давления. Патент РФ № 2399030. Опубл. 10.09.10. Бюл. № 25.

5. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высш. шк., 1984. 247 с.

6. **Бронштейн И. Н., Семендиев К. А.** Справочник по математике. М.: Наука, 1980. 976 с

УДК 621.305.539.3

С. М. Афонин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доц., Московский государственный институт электронной техники, e-mail: eduems@mail.ru

КОРРЕКТИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЕЙ ПЬЕЗОАКТЮАТОРОВ НАНО-И МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Поступила в редакцию 28.10.10

Получены передаточные функции пьезоактюаторов нано- и микроперемещений при продольном и поперечном пьезоэффекте, проведена коррекция характеристик многослойного пьезоактюатора с использованием встроенного пьезодатчика. Для обеспечения качества систем управления деформацией многослойных пьезоактюаторов и требуемого показателя колебательности выбраны корректирующие устройства. Определены условия абсолютной устойчивости систем управления деформацией многослойных пьезоактюаторов нано- и микроперемещений для продольного и поперечного пьезоэффектов.

Ключевые: слова: пьезоактюатор нано- и микроперемещений, система управления деформацией, корректирующие устройства, условия абсолютной устойчивости

Введение

Использование пьезоактюаторов нано- и микроперемещений перспективно в оборудовании нанотехнологии, нанобиологии, микроэлектроники и астрономии для прецизионного совмещения, компенсации температурных и гравитационных деформаций. Одним из наиболее перспективных пьезоактюаторов нано- и микроперемещений является многослойный или составной пьезоактюатор, обеспечивающий нанометрическую точность в диапазоне десятков микрометров и полосу пропускания порядка сотни герц [1—6].

В системе управления нано- и микрометрической леформацией многослойного пьезоактюатора предъявляются жесткие требования к отсутствию автоколебаний и к устойчивости системы, поскольку рабочий режим прецизионной электромеханической системы нано- и микроперемещений без обеспечения устойчивости системы управления деформацией может оказаться вообще нереализуемым. Передаточные функции пьезоактюаторов [5, 6] позволяют рассчитать с учетом нагрузки и корректирующих обратных связей динамические характеристики многослойного пьезоактюатора в системе управления. Актуальными в настоящее время являются проблемы обеспечения устойчивости и качества систем управления деформацией многослойного пьезоактюатора нано- и микроперемещений.

В многослойном пьезоактюаторе при его изготовлении технологически изолируются один или несколько пьезослоев (одна или несколько пьезопластин) от остальных пьезослоев многослойного пьезодвигателя для формирования встроенного в пьезоактюатор чувствительного элемента пьезодатчика. Этот чувствительный элемент, конструктивно соединенный с выходным валом пьезоактюатора, позволяет за счет прямого пьезоэффекта проводить измерение усилия на пьезодатчик, развиваемого пьезоактюатором, и коррекцию с применением пьезодатчика в цепи отрицательной обратной связи динамических характеристик многослойного пьезоактюатора.

При практическом применении пьезоактюаторов нано- и микроперемещений из малогистерезисной отечественной пьезокерамики на основе цирконата и титаната свинца (ЦТС) или японской пьезокерамики типа Р-5Е, Р-7 фирмы MURATA с гистерезисом деформации менее 5 % [1, 2] возникают условия для использования критерия устойчивости Найквиста и классических методов обеспечения устойчивости и качества систем управления деформацией пьезоактюаторов в случае построения астатических систем управления пьезоприводами наноперемешений с использованием логарифмических амплитудночастотных характеристик для получения логарифмических амплитудно-частотных характеристик скорректированной разомкнутой системы управления пьезоактюатором. При использовании многослойных пьезоактюаторов из пьезокерамики ЦТС с гистерезисом деформации существенно более 5 %, например порядка 10-30 %, применяем критерий абсолютной устойчивости Якубовича для определения логарифмических амплитудно-частотных характеристик скорректированной разомкнутой системы управления деформацией многослойного пьезоактюатора [7-12].

Передаточные функции многослойного пьезоактюатора

Основным параметром внешней нагрузки пьезоактюатора является жесткость нагрузки, т. е. отношение силы упругой реакции нагрузки к деформации нагрузки. В зависимости от жесткости нагрузки выбирают конструктивные параметры пьезоактюатора (рис. 1).

Пьезопреобразователь для пьезоактюаторов нано- и микроперемещений собирают следующим образом: предварительно сжатый для выбора зазоров многослойный пьезопреобразователь стягивается также предварительно деформированным упругим элементом в виде шпильки или мембраны. Пьезопреобразователь может быть выполнен многослойным и с использованием тонкопленочной или толстопленочной технологии.

После армирования при внешней упругой нагрузке перемещение пьезоактюатора уменьшается [4], что видно из следующих выражений:

$$S_3 = d_{33}E_3 + s_{33}^E T_3, (1)$$

где $S_3 = \xi/l$ — относительная деформация пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте по оси 3, направление оси поляризации *P* является направлением оси 3, взаимно перпендикулярные оси *l* и 2 перпендикулярны оси 3; ξ — деформация; $l = n\delta$ длина многослойного пьезоактюатора; n — число пьезослоев; δ — толщина пьезослоя или пьезопластины; d_{33} — пьезомодуль при продольном пьезоэффекте; $E_3 = \frac{U}{\delta}$ — напряженность электрического поля в пьезоактюаторе; U — напряжение на электродах пьезоактюатора; $s_{33}^E = \frac{1}{E_u}$ — упругая податливость пьезоактюатора при E = const при управлении от источника напряжения; E_u — модуль Юнга пьезопреобразователя при E = const; $T_3 = -\frac{F}{S_0}$ — механическое напряжение в пьезоактюаторе; $F = F_0$ + + $C_a\xi + C_l\xi$ — внешняя сила; $F_0 = \sigma_a S_0$ — сила первоначального поджатия упругим элементом; σ_a механическое напряжение первоначального армирования; s_0 — площадь пьезоактюатора; C_a — жесткость армирующего элемента; C_l — жесткость нагрузки; $C_e = C_a + C_l$ — приведенная жесткость упругого элемента. Откуда

$$\xi = \frac{d_{33}nU - \frac{\sigma_{a}l}{E_{u}}}{1 + \frac{C_{a} + C_{l}}{C_{t}}} = \frac{l\left(d_{33}E_{3} - \frac{\sigma_{a}}{E_{u}}\right)}{1 + \frac{C_{e}}{C_{t}}},$$
 (2)

где $C_t = \frac{E_u S_0}{l} = \frac{S_0}{s_{33}^E l}$ – жесткость пьезоактюатора

при продольном пьезоэффекте.



Рис. 1. Кинематическая схема многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с пьезодатчиком при упругоинерционной нагрузке:

I — составной пьезопреобразователь; 2 — чувствительный элемент пьезодатчика

Так как механическое напряжение первоначального армирования для каждого образца пьезоактюатора имеет определенное постоянное значение, то перемещение пьезоактюатора в зависимости от первоначального армирования получает постоянное смещение, не зависящее от подаваемого на пьезоактюатор электрического напряжения. Следовательно, амплитуда перемещения армированного многослойного пьезоактюатора при внешней упругой нагрузке уменьшается и имеет вид

$$\Delta l = \frac{d_{33}nU_m}{1 + \frac{C_a + C_l}{C_t}} = \frac{ld_{33}E_{3m}}{1 + \frac{C_e}{C_t}}$$
(3)

или

$$\Delta l = \frac{\Delta l_m}{1 + \frac{C_e}{C_t}},\tag{4}$$

где $\Delta l_m = d_{33}nU_m$ — амплитуда перемещения многослойного пьезоактюатора до армирования; U_m — амплитуда напряжения на электродах пьезоактюатора; $E_{3m} = \frac{U_m}{\delta}$ — амплитуда напряженности электрического поля в пьезоактюаторе. Для многослойного пьезоактюатора из пьезокерамики ЦТС-19 основные величины имеют следующие значения: $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10} \dots 6 \cdot 10^{-10} \text{ м/B}, E_{3m} = 5 \cdot 10^5 \dots 6 \cdot 10^5 \text{ B/m},$ $E_u = 1,0 \cdot 10^{10} \dots 2,5 \cdot 10^{10} \text{ H/m}^2.$

Динамические характеристики пьезоактюатора рассчитывают на основе совместного решения волнового уравнения, уравнения пьезоэффекта при нулевых начальных и соответствующих граничных условиях. В ряде случаев применения пьезоактюатора имеем упругоинерционную нагрузку в виде упругого элемента (пружины, мембраны) и приведенной инерционной массы элемента нагрузки (координатного стола, сканирующего элемента), причем параметры внешней нагрузки C_e — приведенная жесткость упругого элемента; M_i — приведенная масса нагрузки к торцу однослойного пьезоактюатора при $x = \delta$, где x — ось перемещения нагрузки для пьезоактюаторов однослойных и многослойных: при продольном пьезоэффекте направление этой оси совпадает с направлением оси 3, при поперечном пьезоэффекте — с направлением оси 1. Например, при одном закрепленном торце пьезоактюатора при x = 0 получаем $\xi(0, t) = 0$, при упругоинерционной нагрузке на однослойный пьезоактюатор при $x = \delta$ имеем $\xi(\delta, t) = \xi(t)$, с учетом граничных условий уравнение сил будет

$$T_3(t)S_0|_{x=\delta} = -M_i \frac{\partial^2 \xi(t)}{\partial t^2} - C_e \xi(t).$$
⁽⁵⁾

Из уравнения обратного пьезоэффекта (1) с учетом волнового уравнения и действующих сил (5) на торец пьезоактюатора получим

$$\frac{d\Xi(x,p)}{dx}\Big|_{x=\delta} =$$

$$= d_{33}E_3(p) - \frac{s_{33}^E M_i p^2 \Xi(p)}{S_0} - \frac{s_{33}^E C_e \Xi(p)}{S_0}, \quad (6)$$

$$\Xi(x,p) = L\{\xi(x,t)\} = \int_0^\infty \xi(x,t) \mathbf{e}^{-pt} dt,$$

где $\Xi(x, p)$ — преобразование Лапласа деформации (перемещения); *p* — переменная преобразования Лапласа.

Учитывая, что один торец пьезоактюатора жестко закреплен при x = 0 и $\xi(0, p) = 0$, получаем при $x = \delta$ выражение

$$\Xi(x, p) = \frac{\Xi(p)\mathrm{sh}(x\gamma)}{\mathrm{sh}(\delta\gamma)}, \left. \frac{d\Xi(x, p)}{dx} \right|_{x = \delta} = \frac{\Xi(p)\gamma}{\mathrm{th}(\delta\gamma)}, \quad (7)$$

где $\gamma = \frac{p}{c^E} + \alpha$; c^E — скорость звука при E = const;

α — коэффициент затухания. Следовательно, запишем выражение, которое соответствует параметрически структурной схеме пьезоактюатора, закрепленного одним торцом, при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке:

$$\frac{\Xi(p)\gamma}{\mathrm{th}(\delta\gamma)} + \frac{\Xi(p)s_{33}^E M_i p^2}{S_0} + \frac{\Xi(p)s_{33}^E C_e}{S_0} = d_{33}E_3.$$
(8)

Из выражения (8) определяем передаточную функцию пьезоактюатора в виде

$$W_{1}(p) = \frac{\Xi(p)}{E_{3}(p)} = \frac{d_{33}}{\frac{s_{33}^{E}M_{i}p^{2}}{S_{0}} + \frac{\gamma}{\text{th}(\delta\gamma)} + \frac{s_{33}^{E}C_{e}}{S_{0}}}.$$
 (9)

Обозначим $C_{33} = \frac{S_0}{s_{33}^E \delta}$ — жесткость пьезопласти-

ны при продольном пьезоэффекте. Тогда передаточная функция однослойного пьезоактюатора, закрепленного одним торцом, при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке принимает вид

$$W_{1}(p) = \frac{\Xi(p)}{E_{3}(p)} = \frac{d_{33}\delta}{\frac{M_{i}p^{2}}{C_{33}} + \delta\gamma \text{cth}(\delta\gamma) + \frac{C_{e}}{C_{33}}}.$$
 (10)

Используя аппроксимацию гиперболического котангенса двумя членами степенного ряда, получаем следующее выражение для передаточной функции однослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте для упругоинерционной нагрузки при

– НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 3, 2011 –

Рис. 2. Параметрическая структурная схема многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте при упругоинерционной нагрузке при *m* « *M*;

 $m \ll M_i$, где m, M_i — массы пьезоактюатора и нагрузки, в диапазоне частот ω при $0 < \omega < 0,01c^E/\delta$:

$$W_{2}(p) = \frac{\Xi(p)}{U_{0}(p)} =$$

$$= \frac{d_{33}}{(RC_{0}p+1)\left(1+\frac{C_{e}}{C_{33}}\right)\left(T_{33}^{2}p^{2}+2T_{33}\xi_{33}p+1\right)}, \quad (11)$$

$$T_{33} = \sqrt{\frac{M_{i}}{C_{e}+C_{33}}}, \quad \xi_{33} = \frac{\alpha\delta^{2}C_{33}}{3c^{E}\sqrt{M_{i}\left(C_{e}+C_{33}\right)}},$$

где R — сопротивление согласующей цепи; C_0 — емкость пьезопластины; T_{33} , ξ_{33} — постоянная времени и коэффициент затухания пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке.

Аналогично для пьезоактюатора, закрепленного одним торцом, при поперечном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке пьезоактюатора (напряженность электрического поля и вектор поляризации направлены по оси *3*, деформация нагрузки — по оси *1*) получаем и выражение передаточной функции пьезоактюатора:

$$W_{2}(p) = \frac{\Xi(p)}{U_{0}(p)} = \frac{\frac{d_{31}l}{\delta}}{(RC_{0}p+1)\left\{\frac{M_{i}p^{2}}{C_{11}} + l\gamma \operatorname{cth}(l\gamma) + \frac{C_{e}}{C_{11}}\right\}},$$
 (12)

где $C_{11} = \frac{S_0}{d_{11}^E l}$ — жесткость пьезопластины при по-

перечном пьезоэффекте.

На низких частотах в диапазоне $0 < \omega < 0,01c^E/l$ соответствующее выражение передаточной функции для пьезоактюатора, закрепленного одним торцом, при поперечном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке при $m \ll M_i$ имеет вид

$$W_{2}(p) = \frac{\Xi(p)}{U_{0}(p)} = \frac{d_{31}\frac{l}{\delta}}{(RC_{0}p+1)\left(1+\frac{C_{e}}{C_{11}}\right)\left(T_{11}^{2}p^{2}+2T_{11}\xi_{11}p+1\right)}, \quad (13)$$

$$T_{11} = \sqrt{\frac{M_i}{C_e + C_{11}}}, \ \xi_{11} = \frac{\alpha l^2 C_{11}}{3c^E \sqrt{M_i (C_e + C_{11})}},$$

где T_{11} , ξ_{11} — постоянная времени и коэффициент затухания пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке. Аналогично запишем параметрическую структурную схему многослойного пьезоактюатора (рис. 2) и выражение для передаточной функции многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте и инерционной нагрузке при $m \ll M_i$, где m, M_i — массы многослойного пьезоактюатора и нагрузки, в диапазоне рабочих частот $0 < \omega < 0,01c^E/l$:

$$W_{2}(p) = \frac{\Xi(p)}{U_{0}(p)} =$$

$$= \frac{d_{33}n}{(RnC_{0}p+1)\left(1 + \frac{C_{e}}{C_{33}}\right)\left(T_{33}^{2}p^{2} + 2T_{33}\xi_{33}p + 1\right)}, \quad (14)$$

$$C_{33} = \frac{S_{0}}{\frac{S_{0}}{S_{33}l}}, \quad T_{33} = \sqrt{\frac{M_{i}}{C_{e} + C_{33}}},$$

$$\xi_{33} = \frac{\alpha l^{2}C_{33}}{3c^{E}\sqrt{M_{i}\left(C_{e} + C_{33}\right)}},$$

где C_{33} — жесткость многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте; T_{33} , ξ_{33} — постоянная времени и коэффициент затухания многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте и инерционной нагрузке.

Следовательно, получаем передаточную функцию многослойного пьезоактюатора, закрепленного одним торцом, для инерционной или упругоинерционной нагрузки при $m \ll M_i$ в диапазоне рабочих частот $0 < \omega < 0,01 c^E/l$:

$$W_t(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{k}{T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1},$$
 (15)

где U(p) — преобразование Лапласа напряжения на обкладках многослойного пьезоактюатора; k — коэффициент передачи пьезоактюатора в виде

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 3, 2011 -

$$k = \begin{cases} \frac{d_{33}n}{1 + C_e/C_{33}} - \text{при продольном пьезоэффекте } (l = n\delta), \\ \frac{d_{31}nh/\delta}{1 + C_e/C_{11}} - \text{при поперечном пьезоэффекте } (l = nh), \end{cases}$$

 δ , *h* — толщина и высота пьезослоя (пьезопластины), соответственно постоянная времени и коэффициент затухания колебательного звена многослойного пьезоактюатора записываются как $T_t = T_{33}$, $\xi_t = \xi_{33}$ — при продольном пьезоэффекте, $T_t = T_{11}$, $\xi_t = \xi_{11}$ — при поперечном пьезоэффекте. При эксплуатации пьезопривода в нанотехнологии и микроэлектронике необходимо учитывать емкостный характер нагрузки при подключении пьезоактюатора к схеме управления [5, 6].

Коррекция характеристик системы управления деформацией многослойного пьезоактюатора

Обобщенная структура системы коррекции характеристик пьезоактюатора нано- и микроперемещений (локальной системы управления пьезоактюатором с параллельной коррекцией) обеспечивает требуемые обратные связи по току, скорости, перемещению, ускорению (рис. 3). Для коррекции динамических характеристик пьезоактюатора в системе управления используется пьезодатчик, чувствительный элемент которого конструктивно соединен с выходным валом пьезоактюатора. Например, для улучшения качества работы системы автоматического управления сканирующего устройства с пьезоприводом при инерционной нагрузке можно применить корректирующую обратную связь по второй производной перемещения пьезоактюатора. Такая корректирующая обратная связь аналогична в классическом электроприводе обратной связи по второй производной угла поворота выходного вала.

В качестве корректирующего звена обратной связи применяем встроенный пьезодатчик (см. рис. 1), чувствительным элементом которого служит пьезослой или пьезопластина (пьезопакет). С учетом представления пьезоактюатора в виде колебательного звена при использовании отрицательной обратной связи по току, эквивалентной отрицательной



Рис. 3. Структурная схема локальной системы коррекции характеристик многослойного пьезоактюатора нано- и микроперемещений: $W_t(p)$ — передаточная функция многослойного пьезоактюатора; $W_p(p)$ — передаточная функция пьезодатчика

обратной связи по скорости получаем демпфирование пьезоактюатора в результате увеличения его коэффициента затухания:

$$\xi_{t_c} = \xi_t + \frac{kk_c}{2T_t},\tag{16}$$

где ξ_{t_c} — коэффициент затухания демпфированного по скорости пьезоактюатора; k_c — коэффициент передачи по току. В случае применения пьезодатчика и замыкании локальной отрицательной обратной связи при упругой нагрузке на многослойный пьезоактюатор (см. рис. 3) имеем сигнал отрицательной обратной связи, пропорциональный перемещению нагрузки, следовательно, уменьшается постоянная времени колебательного звена

$$T_{t_e} = T_t \sqrt{\frac{1}{1+kk_e}},$$
 (17)

где T_{t_e} — постоянная времени многослойного пьезоактюатора при упругой нагрузке; k_e — коэффициент передачи при упругой нагрузке.

В результате использования пьезодатчика (см. рис. 3) при инерционной нагрузке на многослойный пьезоактюатор получаем сигнал отрицательной обратной связи, пропорциональный ускорению. Следовательно, увеличивается постоянная времени многослойного пьезоактюатора

$$T_{t_i} = T_t \sqrt{1 + \frac{kk_i}{T_t^2}},$$
 (18)

где T_{t_i} — постоянная времени многослойного пьезоактюатора при инерционной нагрузке; k_i — коэффициент передачи при инерционной нагрузке.

При упругоинерционной нагрузке с использованием пьезодатчика (см. рис. 3) получаем сигнал, равный сумме составляющих, одна из которых пропорциональна перемещению, а другая — ускорению, соответственно постоянная времени многослойного пьезоактюатора записывается в виде

$$T_{t_{ei}} = T_t \sqrt{\frac{1 + \frac{kk_i}{T_t^2}}{1 + kk_e}},$$
(19)

где $T_{t_{ei}}$ — постоянная времени многослойного пьезоактюатора при упругоинерционной нагрузке. Например, при $T_t = 3 \cdot 10^{-4}$ c; $k = 4 \cdot 10^{-8}$ м/B; $k_e = 2 \cdot 10^6$ B/м; $k_i = 2$ B · c²/м значение $T_{t_{ei}} = 4 \cdot 10^{-4}$ c.

Следовательно, применение встроенного пьезодатчика в системе автоматического управления многослойным пьезоактюатором наноперемещений позволяет эффективно корректировать динамические характеристики пьезодвигателя. Полученные зависимости отражают особенности расчета как статики, так и динамики многослойных пьезоактюаторов и позволяют рассчитать с учетом нагрузки и коррек-



Рис. 4. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика астатической системы управления многослойным пьезоактю атором нано- и микроперемещений при упругоинерционной нагрузке

тирующих обратных связей постоянные времени многослойных пьезоактюаторов.

При использовании многослойных пьезоактюаторов из отечественной пьезокерамики ЦТС или японской пьезокерамики фирмы MURATA с гистерезисом менее 5 % [1, 2] для обеспечения качества системы управления деформацией при построении астатических систем управления пьезоприводами наноперемещений по методике Бесекерского [7] получаем для упругоинерционной нагрузки пьезоактюатора частоту среза $\omega_s = 1/T_s$ (рис. 4), при которой логарифмическая амплитудно-частотная характеристика разомкнутой системы под наклоном —20 дБ/дек пересекает ось частот.

При упругоинерционной нагрузке многослойного пьезоактюатора и массе нагрузки M_i , превышающей массу пьезоактюатора m, причем $M_i \gg m$, передаточная функция пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с учетом $l = n\delta$ имеет вид

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{nd_{33}}{(RnC_0p+1)\left(1 + C_e/C_{33}\right)\left(T_{33}^2p^2 + 2T_{33}\xi_{33}p + 1\right)},(20)$$

$$C_{33} = S_0/\left(s_{33}^El\right), \ T_{33} = \sqrt{M_i/\left(C_e + C_{33}\right)},$$

$$\xi_{33} = \alpha l^2 C_{33}/\left(3c^E\sqrt{M_i\left(C_e + C_{33}\right)}\right),$$

при поперечном пьезоэффекте с учетом l = nh

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{nd_{31}h/\delta}{(RnC_0p+1)\left(1+C_e/C_{11}\right)\left(T_{11}^2p^2+2T_{11}\xi_{11}p+1\right)},(21)$$

$$\begin{split} C_{11} &= S_0 / \left(s_{11}^E l \right), \ T_{11} &= \sqrt{M_i / \left(C_e + C_{11} \right)}, \\ \xi_{11} &= \alpha l^2 C_{11} / \left(3 c^E \sqrt{M_i \left(C_e + C_{11} \right)} \right). \end{split}$$

Соответственно, из (20) и (21) передаточная функция разомкнутой системы управления многослойным пьезоактюатором без корректирующих устройств будет

$$W_d(p) = \frac{k_d}{(T_a p + 1) \left(T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1\right)},$$
 (22)

где k_d — коэффициент передачи разомкнутой системы управления многослойным пьезоактюатором; $T_a = RnC_0$ — постоянная времени апериодического звена входной электрической цепи многослойного пьезоактюатора; T_t , ξ_t — постоянная времени и коэффициент затухания колебательного звена многослойного пьезоактюатора, причем $T_t = T_{33}$, $\xi_t = \xi_{33}$ при продольном пьезоэффекте, $T_t = T_{11}$, $\xi_t = \xi_{11}$ при поперечном пьезоэффекте.

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика разомкнутой системы управления многослойным пьезоактюатором при упругоинерционной нагрузке для астатических систем управления [7] с заданным показателем колебательности *M* выбираем следующих типов: 1-2-4, 1-3, 1-2-1-2-4, 2-1-2-4 (рис. 4), где 1, 2, 3, 4 соответствуют отрицательному наклону логарифмической амплитудно-частотной характеристики -20, -40, -60, -80 дБ/дек, причем ω_1 , ω_2 , ω_3 , ω_4 — сопрягающие частоты. Для обеспечения устойчивости системы управления многослойным пьезоактюатором нано- и микроперемещений частота среза ω_s находится на участке с наклоном -20 дБ/дек. Для скорректированной логарифмической амплитудно-частотной характеристики типа 1-2-4 (рис. 4, *a*) с передаточной функцией скорректированной разомкнутой системы управления многослойным пьезоактюатором

$$W_{c}(p) = \frac{1}{T_{s}p(T_{a}p+1)\left(T_{t}^{2}p^{2}+2T_{t}\xi_{t}p+1\right)}$$
(23)

получаем передаточную функцию корректирующего устройства

$$W_k(p) = \frac{W_c(p)}{W_d(p)} = \frac{1}{k_d T_s p} .$$
(24)

Для скорректированной логарифмической амплитудно-частотной характеристики типа 1-3 (рис. 4, *б*) с передаточной функцией скорректированной разомкнутой системы

$$W_{c}(p) = \frac{1}{T_{s}p\left(T_{t}^{2}p^{2} + 2T_{t}\xi_{t}p + 1\right)}$$
(25)

имеем передаточную функцию корректирующего устройства

$$W_k(p) = \frac{W_c(p)}{W_d(p)} = \frac{T_a p + 1}{d_d T_s p}.$$
 (26)

С учетом показателя колебательности *М* системы управления получаем ограничение для модуля передаточной функции скорректированной разомкнутой системы управления многослойным пьезоактюатором:

$$\operatorname{Mod} W_{c}(j\omega) < \frac{M}{M+1}, \qquad (27)$$

откуда для логарифмической амплитудно-частотной характеристики скорректированной разомкнутой системы управления многослойным пьезоактюатором

$$L_c(\omega) \le 20 \lg \left(\frac{M}{M+1}\right). \tag{28}$$

Соответственно, резонансный пик логарифмической амплитудно-частотной характеристики скорректированной разомкнутой системы расположен ниже прямой

$$L_c(\omega) = 20 \lg \left(\frac{M}{M+1}\right).$$
(29)

Для логарифмической амплитудно-частотной характеристики типа 1-2-1-2-4 (рис. 4, θ) сопрягающие частоты записываются в виде $\omega_1 = 1/T_1$, $\omega_2 = 1/T_2 = \omega_s(M-1)/M$, $\omega_3 = 1/T_3 = \omega_s(M+1)/M$, $\omega_4 = 1/T_4 = 1/T_t$, где T_1 , T_2 , T_3 , T_4 — постоянные времени; T_t — постоянная времени колебательного звена многослойного пьезоактюатора при упруго-инерционной нагрузке. Аналогичные выражения получаем для сопрягающих частот логарифмической амплитудно-частотной характеристики типа 2-1-2-4 (рис. 4, ϵ).

При использовании многослойных пьезоактюаторов из отечественной пьезокерамики ЦТС-19, ЦТС-21 или зарубежной PZT-4, PZT-8 с гистерезисом 10-30 % необходимо учитывать гистерезис при обеспечении устойчивости системы управления деформацией многослойного пьезоактюатора, так как в системе управления возможно возникновение автоколебаний [11, 12]. Рассмотрим абсолютную устойчивость систем автоматического управления пьезоприводами при продольном и поперечном пьезоэффектах на основе критерия Якубовича [8-10], являющегося развитием критерия абсолютной устойчивости Попова. При описании системы автоматического управления используем передаточную функцию линейной части системы W(p) и гистерезисную функцию S₃ пьезоактюатора. Описание гистерезисной нелинейности многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте (рис. 5) в общем виде

$$S_3 = F\left[E_3\Big|_0^t, t, S_3(0), \operatorname{sign}\dot{E}_3\right]$$
 (30)

означает, что значение функции S_3 в каждой точке *t* зависит от поведения функции напряженности электрического поля $E_3(t)$ на промежутке [0, t], от *t* и от начального значения $S_3(0)$ и знака скорости из-

менения напряженности электрического поля $\dot{E}_3(t)$. При этом $S_3(0)$ должно принадлежать некоторому дополнительно заданному множеству $L_3[E_3(0)]$, зависящему в общем случае от $E_3(0)$. Величину v_{33} при продольном пьезоэффекте определяем по гистерезисной статической характеристике многослойного пьезоактюатора нано- и микроперемещений, измеренной при максимально допустимой напряженности электрического поля в многослойном пьезоактюаторе. Значение этой величины равно максимальному значению тангенса угла наклона касательной к нелинейности. Гистерезисная петля многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте нано- и микроперемещений обходится против часовой стрелки (рис. 5).

Условие абсолютной устойчивости систем с гистерезисными характеристиками деформации многослойных пьезоактюаторов при продольном пьезоэффекте [8—12] имеет вид

Re
$$W(j\omega) + v_{33}^{-1} \ge 0.$$
 (31)

Этот частотный критерий абсолютной устойчивости прост и удобен для синтеза корректирующих устройств систем управления пьезоактюаторами. Для многослойного пьезоактюатора нано- и микроперемещений из пьезокерамики ЦТС-19 при продольном пьезоэффекте максимальное значение тангенса угла касательной к нелинейности составляет $v_{33} = 1$ нм/В.

Аналогично (30) описание гистерезисной нелинейности многослойного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте имеет вид

$$S_1 = F \left[E_3 \Big|_0^t, t, S_1(0), \operatorname{sign} \dot{E}_3 \right],$$
 (32)

——— НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 3, 2011 —





причем значение функции S_1 в каждой точке t зависит от поведения функции $E_3(t)$ на промежутке [0, t], от t и от начального значения $S_1(0)$ и знака скорости изменения напряженности электрического поля $\dot{E}_3(t)$. При этом $S_1(0)$ должно принадлежать некоторому дополнительно заданному множеству $L_1[E_3(0)]$, зависящему в общем случае от $E_3(0)$.

Значение величины v_{31} при поперечном пьезоэффекте определяем по гистерезисной статической характеристике многослойного пьезоактюатора нанои микроперемещений, измеренной при максимально допустимой напряженности электрического поля в пьезоактюаторе, это значение равно максимальному значению тангенса угла наклона касательной к нелинейности. Гистерезисная петля многослойного пьезоактюатора нано- и микроперемещений при поперечном пьезоэффекте обходится против часовой стрелки.

Условие абсолютной устойчивости систем с гистерезисными характеристиками многослойных пьезоактюаторов при поперечном пьезоэффекте имеет вид

$$\operatorname{Re} W(j\omega) + v_{31}^{-1} \ge 0.$$
 (33)

Для многослойного пьезоактюатора нано- и микроперемещений из пьезокерамики ЦТС-19 при поперечном пьезоэффекте максимальное значение тангенса угла касательной к нелинейности составляет $v_{31} = 0,6$ нм/В.

Преобразуем критерий абсолютной устойчивости системы автоматического управления многослойным пьезоактюатором нано- и микроперемещений к виду, приведенному на рис. 6:

$$\operatorname{Re} W(j\omega) + \nu^{-1} \ge 0. \tag{34}$$



Рис. 6. Критерий абсолютной устойчивости системы управления деформацией многослойного пьезоактюатора: для систем 1 выполняются условия и для систем 2 не выпол-

няются условия абсолютной устойчивости

Величину $v = v_{33}$ при продольном пьезоэффекте и $v = v_{31}$ при поперечном пьезоэффекте определяем по гистерезисной статической характеристике многослойного пьезоактюатора нано- и микроперемещений, измеренной при максимально допустимой напряженности электрического поля в многослойном пьезодвигателе. Значение этой величины равно максимальному значению тангенса угла наклона касательной к нелинейности. Гистерезисная характеристика многослойного пьезоактюатора нано- и микроперемещений обходится против часовой стрелки. Для пьезоактюатора нано- и микроперемещений из пьезокерамики ЦТС-19 при продольном пьезоэффекте значение $v = v_{33}$ составляет порядка 1 нм/В, а при поперечном пьезоэффекте $v = v_{31}$ — около 0.6 нм/В.

Геометрически на плоскости амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы, получаемой из исходной нелинейной системы заменой нелинейного элемента линейным усилителем с коэффициентом усиления v, частотная характеристика разомкнутой системы $v W(j\omega)$ должна быть для всех $\omega \ge 0$ расположена правее прямой $\operatorname{Rev} W(j\omega) = -1$. Критерий абсолютной устойчивости системы на плоскости логарифмической частотной характеристики разомкнутой линеаризированной системы $v W(j\omega)$ системе декартовой координат в $L(\omega) = Q[\varphi(\omega)],$ где $L(\omega) = 20 \lg |vW(j\omega)|$ — логарифмическая амплитудно-частотная характеристика, φ(ω) — логарифмическая фазочастотная характеристика, формулируется следующим образом. Для абсолютной устойчивости системы достаточно, чтобы скорректированная логарифмическая амплитудно-частотная характеристика $L_{c}(\omega) = Q[\phi(\omega)]$ разомкнутой линеаризированной системы управления многослойным пьезоактюатором для всех ω ≥ 0 располагалась ниже граничной кривой $L_l(\omega) = 20 \lg |1/\cos \varphi|$, которая является отображением прямой Rev $W(j\omega) = -1$. Когда логарифмическая амплитудно-частотная характеристика $L(\omega) = Q[\varphi(\omega)]$ пересекает $L_{l}(\omega) = 20 \lg (1/\cos \varphi)$, естественно возникает задача введения в систему



Рис. 7. Критерий абсолютной устойчивости системы управления деформацией многослойного пьезоактюатора на плоскости логарифмической амплитудно-частотной характеристики и фазовой частотной характеристики разомкнутой системы:

для систем 1 выполняются условия и для систем 2 не выполняются условия абсолютной устойчивости

корректирующего устройства, при наличии которого условие абсолютной устойчивости выполняется (рис. 7).

Целесообразно также проводить линеаризацию гистерезисной характеристики путем коррекции напряжения, подаваемого на многослойный пьезоактюатор, с учетом направления движения и начального положения пьезоактюатора. При наличии компенсатора гистерезиса многослойного пьезоактюатора используют частотные методы для расчета характеристик систем управления и корректирующих устройств.

Заключение

Предложено для коррекции динамических характеристик многослойного пьезоактюатора использовать один из его пьезослоев как чувствительный элемент встроенного пьезодатчика системы управления деформацией многослойного пьезоактюатора нанои микроперемещений. Показано, что в случае применения встроенного пьезодатчика в системе управления деформацией при инерционной нагрузке на многослойный пьезоактюатор постоянная времени колебательного звена многослойного пьезоактюатора возрастает, а при упругой нагрузке постоянная времени уменьшается.

Получены условия абсолютной устойчивости системы управления деформацией пьезоактюатора при продольном и поперечном пьезоэффектах для производной гистерезисной характеристики деформации многослойного пьезоактюатора из пьезокерамики с большим гистерезисом. При использовании корректирующих устройств достигнуты устойчивость и требуемый показатель колебательности системы управления деформацией многослойного пьезоактюатора из малогистерезисной пьезокерамики при продольном и поперечном пьезоэффектах.

Список литературы

1. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004. 144 с.

2. Джагупов Р. Г., Ерофеев А. А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники систем контроля и управления: Справочник. СПб.: Политехника, 1994. 608 с.

3. Акопьян В. А., Панич А. Е., Соловьев А. Н., Шевцов С. Н. Некоторые физико-механические проблемы пьезоэлектрических актюаторов и области их применения // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 10. С. 35—40.

4. **Физическая** акустика. Т. 1. Ч. А. Методы и приборы ультразвуковых исследований / Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1966. 592 с.

5. Афонин С. М. Пьезопреобразователи для приводов микроперемещений // Приборы и системы управления. 1998. № 2. С. 41-42.

6. Афонин С. М. Решение матричных уравнений в задачах электроупругости для многослойных актюаторов наноперемещений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 8. С. 39—45.

7. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Профессия, 2004. 752 с.

8. Барабанов Н. Е., Якубович В. А. Абсолютная устойчивость систем регулирования с одной гистерезисной нелинейностью // АиТ. 1979. № 12. С. 5—12.

9. Наумов Б. Н. Теория нелинейных автоматических систем. Частотные методы. М.: Наука, 1972. 544 с.

10. Наумов Б. Н. Частотный метод абсолютной устойчивости и качества нелинейных систем и систем с переменными во времени параметрами при заданных и случайных воздействиях // Многосвязные и инвариантные системы. Нелинейные и дискретные системы / Под ред. В. А. Трапезникова. М.: Наука, 1968. С. 254—270.

11. Афонин С. М. Исследование абсолютной устойчивости системы управления деформацией пьезопреобразователя для нано- и микроперемещений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 1. С. 10—16.

12. Афонин С. М. Абсолютная устойчивость системы управления деформацией электроупругого преобразователя для нано- и микроперемещений // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 5. С. 25—32.

Н. И. Мухуров, д-р техн. наук, зав. лаб., Г. И. Ефремов, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., С. П. Жвавый, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.,

Государственное научное учреждение "Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси", e-mail:mukhurov@inel.bas-net.by

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОТОКОВЫХ МИКРОРЕЛЕ

Поступила в редакцию 11.11.2010

Предложена конструкция и метод теоретического моделирования электротоковых микрореле с меандровыми токовыми участками при равенстве и неравенстве токов. Установлено, что базовая функция в нормированном виде графически представляет собой симметричную параболу с координатами экстремальной точки $m_o = 0,5$ и $I^* = 0,5$. Рассмотрена эффективность переключения векторов сил электромагнитных полей с притяжения при прямом ходе на отталкивание при обратном ходе, возможность использования емкостного оперативного контроля параметров.

Ключевые слова: электротоковое микрореле, электрический ток, электромагнитные и реактивные силы, планарно-объемная конструкция

Введение

Микроэлектромеханические реле широко используют в различных функциональных устройствах в качестве регулирующих, управляющих, контролирующих элементов. Большое внимание уделено теоретическому моделированию и практическим разработкам электростатических актюаторов [1—3].

В данной статье рассматриваются возможности использования взаимодействия электромагнитных сил, возникающих между двумя параллельными проводниками, по которым проходит постоянный электрический ток. Как известно, при пропускании тока в одном направлении возникает результирующая активная сила F, сближающая проводники, т. е. сила притяжения. При противоположном направлении токов проводники расходятся под действием сил отталкивания. Это взаимодействие и возможность изменения вектора сил могут быть практически реализованы в микрореле с актюатором, которые естественно назвать электротоковыми: электротоковое микрореле (ЭТМ) и электротоковый актюатор (ЭТА).

Конструктивные параметры электротокового микрореле

По конструкции ЭТМ аналогичны электростатическим микрореле [4]. Пример такого плоскопараллельного электротокового микрореле, содержащего ЭТА, представлен на рис. 1. Оно состоит из диэлек-

трических подложки 1 и пластины 2, жестко соединенных между собой металлическими штырьками. Подложка сверху содержит продольную канавку 4 с плоским дном 5 и продольными боковыми выступами 6. Пластина 2 выполнена в виде рамки с широкими короткими сторонами-площадками 7 и длинными сторонами-планками 8. В площадках и подложке сделаны соосные отверстия 9, в которых размещены штырьки. В центре пластины 2 сформирован подвижный элемент-якорь 10, соединенный с площадками зигзагообразными пружинными упругими держателями 11. Планки обеспечивают стабильность геометрии держателей в процессе изготовления и сборки пластины. На дне и внутренней стороне якоря сформированы идентичные зеркально расположенные неподвижный 12 и подвижный 13 меандровые участки (МУ) электротокового привода 14. Они токопроводящими дорожками и штырьками (на рис. 1 показаны условно) соединены с управляющей цепью 15. В осевом поперечном сечении на краях внутренней стороны якоря 1 размещены подвижные точечные контакты 16, а на его внешней стороне перемычка 17, электрически соединенная с контактами. Неподвижные точечные контакты 18, сформированные на дне, расположены под подвижными контактами и соединены с управляемой цепью 19, образуя в ней нормально разомкнутую (НР) группу. Такое расположение обеспечивает получение максимальной площади для формирования меандровых участков 12 и 13. На одной из площадок размещены штырек входа 20, штырек выхода 21, переключаемый штырек 22. Такое компактное расположение штырьков обеспечивает простоту соединения с управляющей цепью и повышает надежность функционирования микрореле. В исходном состоянии начала неподвижного 12 и подвижного 13 МУ соединены токоведущими дорожками соответственно с переключаемым штырьком и штырьком входа (рис. 2, а). Концы обоих МУ соединены между собой и со штырьком выхода. Таким образом МУ включены в управляющую цепь и геометрически, и электрически параллельно. Промежутки между МУ являются рабочим межмеандровым расстоянием t, между контактами 16 и 18 — межконтактным расстоянием $t_{\rm K} < t$. Элементы электрических цепей соединены токопроводящими дорожками управляющей и управляемой цепей. К основным параметрам ЭТМ относятся ток срабатывания, межмеандровое расстояние, управляемая часть рабочего цикла, усилия контактное и возврата.

В качестве материала для изготовления частей ЭТМ может быть использован диэлектрик, обладающий высокими электромеханическими свойствами и технологическими возможностями формирования элементов различной конфигурации. Предпочтительным из материалов представляется анодный оксид алюминия (AOA) [3]. Его самоорганизующаяся ячеистая структура является основой формирования прецизионных конфигураций плоских и объемных перфорированных деталей. Процесс изготовления базируется на интегральной технологии и оборудовании микросхем и не требует разработки установок с уникальными параметрами. Толщина пластин мо-



Рис. 1. Конструктивная схема планарно-объемного варианта электротокового микрореле

Некоторые характеристики анодного оксида алюминия

Материал	Предел упругости σ _e , МПа	Предел прочности σ _в , МПа	Модуль упругости <i>E</i> , ГПа	Микро- твердость <i>H_v</i> , МПа	КТР α, град ⁻¹	Относительная диэлектриче- ская прони- цаемость є	Объемное электрическое сопротивление ρ_{v} , Ом/м	Поверхностное электрическое сопротивление р _s , Ом/кв
Аморфный АОА γ-АОА	400 370	400 370	140	4700 5600	$6,8 \cdot 10^{-6}$ $6,8 \cdot 10^{-6}$	6,2 6,4	$5 \cdot 10^{10}$ $6 \cdot 10^{6}$	$1 \cdot 10^{15} \\ 1 \cdot 10^{12}$

жет быть получена от долей до сотен микрометров. Некоторые характеристики оксида приведены в таблице, из которых особо отметим равенство пределов упругости и прочности. Оно исключает потенциально возможное появление пластических деформаций, ис-



Рис. 2. Электрическая схема и направление тока в МУ при прямом (*a*) и обратном (*б*) ходе ЭТА

кажающих функциональную взаимосвязь электрических и геометрических размерных параметров.

Токопроводящие элементы наносятся напылением или распылением в вакууме металлов с близким к АОА значением КТР и с одновременным или последующим образованием топологического рисунка. Толщина напыления составляет доли микрометров и на рис. 1 показана условно.

Анализ рабочего цикла

При включении ЭТМ в управляющую цепь (рис. 2, a) по обоим МУ потечет электрический ток I в одном направлении, и якорь под действием электромагнитных активных сил F начнет приближаться к подложке (рис. 3, a). Согласно [5] сила F определяется формулой

$$F = \frac{\mu_0 I^2 L}{2\pi (t - y)},$$
 (1)

где $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ B} \cdot \text{c/A} \cdot \text{м}$ — магнитная постоянная; *L* — суммарная длина ветвей меандра, м; *y* — смещение якоря, м.



В деформируемых держателях якоря возникнет реактивная механическая сила *P* [6], равная

$$P = k \frac{Eab^3}{12l^3} qy = Ky, \qquad (2)$$

где K — жесткость упругих держателей, H/M; k — число держателей; q — коэффициент заделки концов держателей; a, b, l — ширина, толщина, длина держателей, M; E — модуль упругости АОА, H/M^2 .

При постепенном плавном увеличении *I* в каждый момент сохраняется равновесное состояние

$$F = P. \tag{3}$$

Из формул (1)—(3) следует, что для осуществления такого перемещения необходим ток силой

$$I = \sqrt{\frac{2\pi K t^2}{\mu_0 L}} \sqrt{m(1-m)}, \qquad (4)$$

где *m* — нормированное значение смещения якоря в межмеандровом промежутке.

Приняв обозначения

$$D = \sqrt{\frac{2\pi K t^2}{\mu_0 L}}; \qquad (5)$$

$$I^* = \sqrt{m(1-m)}, \qquad (6)$$

получим

$$I = I^* \cdot D, \tag{7}$$

где D — конструктивная константа; *I*^{*} — базовая функция, характеризующая изменение І в функции т и не зависящая от параметров D. Теоретический анализ с использованием дифференцирования показывает, что она представляет симметричную параболу с координатами экстреточки $m_0 = 0,5,$ мальной $I_{\rm max}^*$ = 0,5. Такая форма объясняется разной зависимостью *F* и *P* от *y*: активные электромагнитные силы F являются функцией y^{-1} , а реактивные механические силы Р пропорциональны *y*. B интервале m = 0...0,5 равновесное состояние достигается за счет интенсивного увеличения силы тока в меандрах, а затем в области m = 0, 5...0, 9 постепенного снижения І, обеспечивающего равенство *F* и *P* (рис. 3, *a*). Однако практически реализовать такой цикл пока не представляется возможным, так как при снижении І и, следовательно F, прогиб держателей уменьшится, и начнется возврат якоря в исходное состояние.

ЭТМ могут эффективно использоваться в управляющих схемах за счет подачи на МУ токов разного значения, создающих электромаг-

нитную силу

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi t (1-m)},$$
(8)

где I_1 — ток контроля переменной величины; I_2 — постоянный опорный ток.

По значению силы тока I_1 , равному

$$I_1 = \frac{2\pi K t^2}{\mu_0 L I_2} m(1-m) = D I_1^* \frac{1}{I_2}, \qquad (9)$$

определяют фактические параметры контролируемых процессов.

Значение силы тока срабатывания I_{1p} при $m_0 = \text{const} = 0,5$ определяется соотношением

$$I_{1p} = 0.25 \frac{D}{I_2}.$$
 (10)

Контроль положения подвижного МУ, смещение которого является функцией активных внешних воздействий, может одновременно с данными о I_1 осуществляться по изменению емкости C межмеандрового объема:

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{t(1-m)},\tag{11}$$

где А — суммарная площадь меандровых ветвей.

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 3, 2011 -

- 41

Анализ параметров практической конструкции

В реальных условиях работы устройств, отслеживающих изменение электрического тока I, наблюдается незначительное превышение значения I^* . После положения якоря, характеризующегося равновесным состоянием и значением относительной величины m_0 , равновесие нарушается. В результате, под действием стремительного возрастания силы Fнаблюдается резкое уменьшение межмеандрового расстояния. Сближение якоря с неподвижным электродом оканчивается замыканием НР контактов управляемой цепи и ее включением (рис. 3, δ). Оценим изменение значения контактного усилия Qв диапазоне от $m_0 = 0,5$ до m = 0,9. Его возрастание с увеличением m определяется соотношениями

$$\alpha = \frac{F_m}{F_{m_0}} = \frac{1 - m_0}{1 - m};$$
(12)

$$\beta = \frac{P_m}{P_{m_0}} = \frac{m}{m_0}; \qquad (13)$$

$$\gamma = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{(1 - m_0)m_0}{(1 - m)m},$$
 (14)

т. е. отношения при m = 0,9 (рис. 3, *б*) возрастают: механические силы в $\beta = 1,8$ раз, электромагнитные силы в $\alpha = 5$ раз, а последние больше механических сил в 2,8 раза, что определяет максимальное значение усилия *Q*.

Управляемый участок рабочего цикла, соответствующий равновесному состоянию, ограничен диапазоном m = 0...0,5, это на 33,4 % больше, чем в электростатических микрореле.

После замыкания управляемой цепи сразу или через некоторый интервал времени, определяемый выполняемым функциональным режимом, происходит отключение микрореле или переключение его на обратный ход.

Рассмотрим подробней эти варианты, так как они оказывают существенно различное влияние на дальнейший ход рабочего цикла.

При отключении электромагнитные силы F = 0. Возврат якоря осуществляется реактивными силами P, которые значительно меньше $F_{m=0,9}$ (рис. 3, e). Силы P должны преодолеть суммарное значение реактивных сил индуцированных зарядов на диэлектрических участках, инерцию подвижных масс, возможное залипание контактов. Практически время возврата имеет значительный разброс, что снижает надежность микрореле.

Переключение меандровых участков на последовательное соединение (см. рис. 2, δ) между проводниками создает электромагнитное поле с отталкивающей силой $F_{\rm B}$ обратного хода, равной F_m . При этом начало МУ 12 отключается от переключающего штырька 22 и соединяется со штырьком выхода 21, от которого одновременно отключается конец МУ 12. Возврат якоря в первый момент будет происходить

при суммарном воздействии реактивных механических сил $P_{m=0,9}$ держателей и превосходящих их в ~3 раза, электромагнитных сил $F_{\rm B}$ (рис. 3, ϵ). Далее обе силы будут снижаться, но совместно они обеспечивают повышение надежности возврата якоря и уменьшение времени обратного хода. Вариант переключения дает возможность дальнейшего увеличения силы $F_{\rm B}$ в целях повышения надежности срабатывания микрореле в диапазоне СВЧ. Реализация достигается кратковременным увеличением тока при переключении в *n* раз, что согласно формуле (1) повысит *F* в n^2 раз при неизменном значении величины *P*.

Заключение

Предложена конструкция электротокового микрореле, работающего за счет реализации эффекта взаимодействия электромагнитных сил, возникающих между двумя идентичными меандровыми участками электрической цепи с одинаковым или противоположным направлением тока. Токи в меандровых участках могут быть по значению равными и отличными.

Основная характеристика $I^*(m)$ имеет вид симметричной параболы с относительными координатами экстремальной точки $m_0 = 0.5$, $I^* = 0.5$. Управляемая часть межмеандрового расстояния равна половине межэлектродного промежутка, что на 33,4 % больше, чем у электростатических микрореле. При m = 0.9 электромагнитные силы минимум в 3 раза превосходят реактивные механические силы, что в совокупности обеспечивает высокое контактное усилие.

Переключение в конце прямого хода рабочего цикла взаимодействия электромагнитных сил с притяжения на отталкивание позволяет повысить скорость возврата якоря в исходное положение и надежность срабатывания.

Результаты моделирования показывают, что предложенное электротоковое микрореле может успешно работать в слаботочных электрических пороговых, регулирующих, высокочастотных устройствах.

Список литературы

1. Дятлов В. А., Коняшкин В. В., Потапов Б. Е., Фадеев С. И. Пленочная электромеханика. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1991.

2. Chan E. K., Dutton R. W. Effects of capacitors, resistors and residual charge on the static and dynamic performance of electrostatically — actuated devices // Proc. of SPIE. 1999. Vol. 3680. P. 120–130.

3. Мухуров Н. И., Ефремов Г. И., Куданович О. Н. Устройства микромеханики и микросенсорики на нанопористом анодном оксиде алюминия. Минск: Бестпринт, 2005.

- 4. Патент № 2667 РБ. Электростатическое микрореле / И. Л. Григоришин, Г. И. Ефремов, Н. И. Мухуров. 1996.
 - 5. Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1983.
- 6. Справочник машиностроителя / Под ред. С. В. Серенсена. Т. 3. М.: Машгиз, 1955.

Д. В. Гусев, ст. науч. сотр., e-mail: gusev@tcen.ru,

Н. Л. Данилова, ст. науч. сотр.,

В. В. Панков, ст. науч. сотр.,

В. С. Суханов, нач. лаб.,

НПК "Технологический центр" МИЭТ

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ СРЕДСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМАХ

Поступила в редакцию 12.11.10

Рассматриваются конструкции микроэлектронных преобразователей давления, выполненных на базе кремниевых структур. Приведена конструкция, обеспечивающая защиту микроэлектронного преобразователя от воздействия окружающей среды, а также варианты использования в системах теплоавтоматики.

Ключевые слова: чувствительный элемент давления, датчик абсолютного давления, датчик дифференциального давления, теплоавтоматика, контроллер

Одним из параметров, контролируемых в системах теплоавтоматики, является давление. Измерение давления применяется для сред энергоносителей, например, прямая и обратная ветки в контуре теплоснабжения, давление или перепад давлений воздуха в контуре приточной вентиляции и воздушного обогрева и кондиционирования.

Применение средств автоматизации в системах теплоавтоматики вызывает необходимость применения датчиков физических величин с электрическим выходом, который может быть подключен к измерительной системе для преобразования в цифровой вид и дальнейшей передачи информации пользователю.

Преобразователи абсолютного давления — тензомодули серии ТДМ-А и ТДМ1-А, а также преобразователи дифференциального давления ТДМ-Д (рис. 1) для неагрессивных газовых сред на базе кристаллов интегральных преобразователей давления (ИПД) мембранного типа — выпускаются в соответствии с ГОСТ 22520. Тензомодули ТДМ-А выпускаются на ряд давлений с пределами измерений от 0 до 0,01...10 МПа, ТДМ-Д — на ряд давлений от 0 до 1,0 МПа. На кристалле ИПД сформирована тензометрическая схема в виде моста Уитстона и схема температурной компенсации. В соответствии с указанными диапазонами давлений применяются три типа кристаллов ИПД5.2, ИПД6 и ИПД9.1, различающихся размером кристалла и геометрией мембраны.

Каждый преобразователь имеет индивидуальную характеристику преобразования давления в выходное напряжение. Выходной сигнал $U_{\rm BЫX}$ при поданном на тензомодуль давлении P вычисляется по формуле

$$U_{\rm BMX} = U_{\rm BMX_0} + \frac{\Delta U_{\rm BMX_{\rm HOM}}}{P_{\rm HOM}} P,$$

где $U_{\text{вых}_0}$ — выходное напряжение при избыточном давлении P = 0, мВ; P_{HOM} — верхний предел преобразуемого давления, МПа; $\Delta U_{\text{вых}_{HOM}}$ — диапазон изменения выходного напряжения при номинальном давлении ($P = P_{\text{HOM}}$), мВ; $U_{\text{вых}_{HOM}}$ — выходное напряжение при номинальном давлении ($P = P_{\text{HOM}}$), мВ; $U_{\text{вых}_{HOM}}$ — выходное напряжение при номинальном давлении ($P = P_{\text{HOM}}$), мВ; $U_{\text{вых}_{HOM}}$ — выходное напряжение при номинальном давлении ($P = P_{\text{HOM}}$), мВ;

$$\Delta U_{\rm BMX_{HOM}} = U_{\rm BMX_{HOM}} - U_{\rm BMX_0}.$$

Основные параметры тензомодулей приведены в таблице.

Конструкции тензомодулей абсолютного давления серии ТДМ-А приведены на рис. 2, *а*. Кристалл ИПД монтируется в корпус 5 в составе чувствительного элемента давления (ЧЭД), который состоит из кристалла ИПД *1* и кремниевой прокладки *2* и стеклянного основания *3*, соединенных в вакууме легкоплавким стеклом, при этом под мембраной ИПД образуется вакуумированная полость *4*.

Тензомодули серии ТДМ1-А предназначены для контроля абсолютного давления газовых сред с повышенной влажностью. Чтобы обеспечить работу тензомодуля при повышенной влажности, применена заливка компаундом "СИЭЛ" (рис. 2, *б*). Для тензомодулей ТДМ1-А номинальное давление не более



Рис. 1. Тензомодуль избыточного давления ТДМ-Д

Основные параметры тензомодулей давления

Наименование параметра, обозначение,	Диап измен парам	азон нения метра	Темпе- ратура	
режим измерения,	не менее	не более	среды, °С	
Ток потребления, I _{пот} , мА		1,5	От -45 ло +85	
Выходное напряжение, U_0 , мВ, при $P = 0$	-6	6	20 ± 10	
Диапазон изменения выходного напряжения, $\Delta U_{\text{вых}_{\text{ном}}}$, мВ	40	150	20 ± 10	
Нелинейность выходной характеристики, $2K_{\rm H}$, %	-0,2	0,2	20 ± 10	
Температурный коэффициент дрейфа U_0 , ТКН, %/10 °С	-0,2	0,2	От -45 до +85	
Температурный коэффициент диа- пазона изменения выходного на- пряжения $\Delta U_{\rm Вых_{HOM}}$, ТКД, %/10 °С	-0,2	0,2	От -45 до +85	
Температурный гистерезис "нуля", $\Gamma_{\rm TH}, \%$	-0,2	0,2	От -45 до +85	
Температурный гистерезис диапа- зона изменения выходного напря- жения, Г _{ТД} , %	-0,2	0,2	От -45 до +85	

0,25 МПа, по остальным параметрам тензомодули ТДМ1-А аналогичны тензомодулям серии ТДМ-А.

Для защиты конструкции микроэлектронного преобразователя от воздействия окружающей среды и расширения диапазона преобразования давления относительно ТДМ1-А создана новая конструкция чувствительного элемента абсолютного давления ЧЭДА-1 (рис. 3, а) и соответственно новая конструкция тензопреобразователя ТДМ203 (рис. 3, б). Конструкция ЧЭДА-1 состоит из четырех частей: кристалла ИПД 1, кремниевой прокладки 2, кремниевого основания 3 и кристалла-крышки 4. Соотношение размеров внутренних полостей в соединяемых деталях выбрано таким образом, чтобы обеспечить механическую развязку ИПД от корпуса преобразователя [1]. Кристалл ИПД имеет квадратную форму с размерами $6,2 \times 6,2$ мм, в кристалле сформирована тонкая мембрана с жестким центром, на которую подается измеряемое давление. С лицевой стороны кристалла ИПД расположены четыре тензорезистора 9. Над лицевой поверхностью ИПД расположена крышка, в которой анизотропным травлением сформировано углубление. Крышка по периметру герметично соединяется с ИПД с помощью легкоплавкого стекла. Процесс соединения деталей происходит в вакууме. При этом под крышкой создается вакуумная полость 5, относительно которой происходит измерение давления. В кристалле ИПД соединение тензорезисторов с металлической разводкой осуществлено с помощью переходных высоколегированных областей p^+ -типа проводимости [2]

колегированных областей *р* -типа проводимости [2] за пределами зоны соединения кристалла ИПД с за-



Рис. 2. Конструкции тензомодулей абсолютного давления:

а — серия ТДМ-А, *б* — серия ТДМ1-А; *1* — кристалл ИПД; *2* — кремниевая прокладка; *3* — стеклянное основание; *4* — вакуумированная полость; *5* — основание корпуса; *6* — крышка; *7* — ключ; *8* — штуцер крышки; *9* — компаунд "СИЭЛ"



Рис. 3. Конструкция чувствительного элемента давления ЧЭДА-1 (*a*) и тензомодуля абсолютного давления, защищенного от воздействия окружающей среды (б):

1 -кристалл ИПД; 2 -кремниевая прокладка; 3 -кремниевое основание; 4 -защитная крышка; 5 -вакуумированная полость; 6 -основание корпуса; 7 -крышка корпуса; 8 -трубка; 9 -тензорезисторы; 10 -герметичное соединение; 11 -внутренняя полость тензопреобразователя

щитной крышкой, что обеспечивает надежность созданной конструкции.

Из рис. 3, δ видно, что такая конструкция ЧЭД позволяет полностью изолировать электрическую схему кристалла от воздействия внешней среды за счет крышки корпуса 7. Давление измеряемой среды подается со стороны основания корпуса через трубку 8. При этом измеряемая среда воздействует на кремний и соединительное стекло, что позволяет контролировать давление как газообразных, так и жидких сред.



Ж1 — жалюзи; К1 — клапан запорно-регулирующий; К2 — калорифер; К3 — контроллер КМ-010; М1 — привод жалюзи; М2 — привод запорно-регулирующего клапана теплоносителя; М3 — двигатель вентилятора; Р1 — датчик давления в прямой ветке теплоносителя; Р2 — датчик давления в обратной ветке теплоносителя; Р3 — датчик перепада давлений на вентиляторе; Т1 — датчик температуры внешнего воздуха; Т2 — датчик температуры теплоносителя на входе калорифера; Т3 — датчик температуры теплоносителя на выходе калорифера; Т4 — датчик температуры нагретого воздуха; Ч1 — частотный преобразователь

Данная конструкция защищенного малогабаритного тензомодуля показала метрологические характеристики, идентичные серийно выпускаемым тензомодулям ТДМ-А и ТДМ1-А. Интегральная технология изготовления кристалла тензочувствительного преобразователя давления, технологичность сборки тензомодуля, защита его от внешних воздействующих факторов обеспечивают его низкую себестоимость и расширяют функциональные возможности применения в различных областях техники.

Пример использования датчиков давления в системе приточной вентиляции показан на рис. 4. В системе применяются три датчика: один измеряет разницу давлений в канале подачи воздуха, что позволяет иметь информацию о производительности вентилятора и о динамическом сопротивлении канала, которое зависит от объема помещений и степени их герметизации. Два других датчика установлены на прямой и обратной ветках контура обогрева, используемого в калорифере для подогрева входящего воздуха. Обработка данных от датчиков проводится контроллером КМ-010 [3].

Применение преобразователей давления серии ТДМ позволяет эффективно проводить мониторинг процесса подготовки воздуха для жилых и промышленных зданий.

Список литературы

1. Патент РФ № 2169912, МПК G01L9/04. Микроэлектронный датчик давления / Зимин В. Н., Ковалев А. В., Панков В. В., Тимошенков С. П., Шелепин Н. А. Опубл. 2001.06.27.

2. Патент РФ № 2278447, МПК Н01L 29/84, G01L 9/04. Интегральный преобразователь давления / Зимин В. Н., Резнев А. А., Сауров А. Н., Шелепин Н. А. Опубл. 2005.12.10.

3. Отчет о НИР "Исследование способов создания программно-аппаратных средств для решения задач по регулированию и мониторингу технологических процессов в энергосберегающих системах жилых и промышленных зданий", 1-й этап, НПК "Технологический Центр" МИЭТ, 2009.

Молекулярная электроника

УДК 530.145(21)

Л. М. Журавлева, канд. техн. наук, доц., МИИТ, e-mail: zhlubov@mail.ru, **В. Г. Плеханов**, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф., Институт вычислительной техники, Эстония, г. Таллин e-mail:plekhanov@iati.ee

ИЗОТОПТРОНИКА И КВАНТОВАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Поступила в редакцию 29.10.10

Рассматриваются основы квантовой информации и ее связь с физикой. Кратко обсуждается реализация кубита в различных средах и продолжительность времени жизни его в этих средах. Вторая часть статьи посвящена описанию изотопического квантового процессора в твердом теле. Показана перспективность использования экситонов в квантовых точках изотопически смешанных кристаллов в качестве элементарного гейта квантового процессора.

Ключевые слова: квантовая информация, реализация кубита, изотопический квантовый процессор, экситон, квантовая точка, элементарный гейт

Часть 1. Квантовая информация

Информация имеет глубокий философский смысл и заключается в отражении реального мира. Это любые сведения, которые можно передавать или хранить с помощью материального носителя.

Количество информации можно измерить. Это необходимо для осуществления двух основных операций: вычисления и передачи информации. В рамках классической теории информации используется единица измерения количества информации — бит. Один бит — это двоичный логарифм от величины, обратной вероятности события P = 1/2. Такая оценка означает, что чем неожиданнее сообщение, тем больше количества информации оно несет.

Математические методы оценки количества информации ввел в 1948 г. К. Шеннон [1]. Это послужило началом классической теории информации.

Развитие квантовой механики и открытие в результате экспериментов квантовых эффектов микрочастиц явилось началом квантовой теории информации. Возник вопрос, можно ли использовать эти открытия для передачи информации, например, со скоростью выше скорости света, что противоречило бы теории относительности Эйнштейна. Рассмотрение этой задачи привело к ряду открытий, которые были положены в основу теории квантовой информации. Был доказан тезис о невозможности копирования квантовых состояний и предложены методы управления квантовыми состояниями, которые стали основополагающими для квантовых вычислений.

Идея реализовать математические алгоритмы с помощью квантовых систем родилась в 80-е годы прошлого века. Так, в 1981 г. на возможность квантовых вычислений впервые указал наш соотечественник Ю. А. Манин. Затем эту работу продолжил лауреат Нобелевской премии американский ученый Р. Фейман [1]. После публикаций этих ученых квантовыми вычислениями стали интенсивно заниматься по всему миру (см. также [2]).

Какими преимуществами обладают квантовые вычисления можно пояснить на следующем примере. Несмотря на успехи вычислительной техники сегодняшнего дня, которая способна развивать производительность порядка 10^{12} операций в секунду, требуются еще большие мощности. Так, для отыскания простых сомножителей 300-значного числа необходимо сделать $5 \cdot 10^{24}$ шагов в секунду. При производительности современной вычислительной техники на это потребуется 150 тысяч лет. Для сравнения следует отметить, что квантовый компьютер должен будет сделать $5 \cdot 10^{10}$ шагов и затратить на все операции меньше секунды [3].

Отсюда понятно, что современное развитие науки и техники не может обойтись без квантовых компьютеров, которые обладают следующими преимуществами перед классическими:

- высокой скоростью, обусловленной эффектом параллельных вычислений;
- огромным объемом памяти;
- миниатюрными размерами вычислительных ячеек (гейтов);
- свойством переносить информацию без трения и нагрева (фотон — переносчик квантовой информации не имеет массы, в отличие от электрона в классических компьютерах);
- большим быстродействием (скорость распространения света выше, чем электрического тока);
- значительной эффективностью для систем хранения информации (например, при создании электронных замков).

В основе квантовых вычислений лежит уравнение Шредингера, описывающее поведение микрочастицы и вытекающие из него квантовые эффекты. К микрочастицам можно отнести электроны, экситоны, фотоны, фононы и др., которые обладают не только корпускулярными, но и волновыми свойствами. Впервые гипотезу о том, что движение любой частицы, имеющей импульс $p = \frac{hv}{c}$ (где h — постоянная Планка, равная $6.6 \cdot 10^{-34}$ Дж · с, v — частота, c — скорость света), описывается волновым процессом с длиной волны $\lambda = \frac{h}{p}$, высказал французский физик де Бройль (см. также [2]).

В общем виде уравнение Шредингера, описывающее волновую функцию у микрочастицы, имеет следующий вид [3]:

$$i\hbar\frac{\partial|\psi\rangle}{\partial t} = H|\psi\rangle, \qquad (1)$$

где $\hbar = h/2\pi$; |> — дираковское обозначение состояния в квантовой механике; $\frac{\partial}{\partial t}$ — обозначение частной производной по времени; N — линейный оператор, обладающий свойством суперпозиции, а именно:

$$H(a|\psi_1\rangle + b|\psi_2\rangle) = aH|\psi_1\rangle + bH|\psi_2\rangle.$$

Это означает, что если система существует в состояниях $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$, то она может существовать и в состоянии $a|\psi_1\rangle + b|\psi_2\rangle = \psi$, где *а* и *b* — комплексные амплитуды, обладающие свойством

$$|a|^2 + |b|^2 = 1.$$
 (2)

Формулы (1) и (2) легли в основу построения элементной базы квантовых вычислительных устройств. Чтобы понять, как применяются волновые функции в квантовых процессорах, нужно вспомнить следующее. Передача и обработка информации осуществляется с помощью кодирования букв, цифр или других символов, переносящих конкретное сообщение. Для этого необходим вычислительный базис. Так, для классического представления информации таким базисом является двухпозиционный код в виде 0 и 1. Закодированные в двоичной системе символы, отображающие информацию, составляют кодовые слова разной длины, с которыми затем осуществляют различные операции сложения, деления и т. д. по правилам Булевой алгебры. В квантовых вычислениях в качестве вычислительного базиса используется волновая функция Шредингера. Мысль о возможности использования волновой функции в этом качестве возникла в связи с развитием нового направления в теории информатики, занимающегося вероятностными алгоритмами вычислений.

Волновая функция, применяемая для описания чистого (когерентного) состояния изолированной от окружающей среды квантовой системы, легла в основу абстрактного понятия "кубит". Определение кубиту, являющемуся квантовой версией бита, дал в

1995 г. Б. Шумахер [1]. Кубит представляет собой когерентную суперпозицию двух базисных состояний волновой функции: $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$, где *a* и *b* комплексные амплитуды. Кубит — это абстрактное математическое понятие, которое можно реализовать с помощью квантовой системы. Квадрат амплитуды определяет вероятность нахождения квантовой системы в одном из базисных состояний. При этом обязательно должно выполняться условие (2). Если классический бит подобен положению монеты (либо орел, либо решка), то кубит, напротив, до момента наблюдения может находиться в целом континууме состояний между 0 и 1. Это можно сравнить с несовершенной монетой, которая может занимать промежуточные состояния, например, балансирование на ребре. В результате измерений состояния кубита каждый раз получают конкретный результат: или 0, или 1 (после балансирования монета обязательно упадет или орлом, или решкой). Отсюда, кубит может находиться в состояниях 0 или 1 с определенными вероятностями. Если в половине случаев получили 0 или 1, то состояние кубита можно записать в следующем виде:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle.$$

Простейшим примером реализации кубита можно считать модель атома [1]. Известно, что электрон в атоме может существовать либо в основном состоянии, либо в возбужденном. Эти состояния можно обозначить соответственно $|0\rangle$ и $|1\rangle$. Перевод состояния электрона из одного в другое осуществляется с помощью облучения светом. Так, при облучении электрона светом с определенной энергией в течение некоторого времени электрон переходит из состояния |0> в |1>. Возбужденный электрон постепенно теряет энергию и возвращается в основное состояние с излучением фотона. Электрон, как классический бит, может находиться только в двух состояниях: 0 или 1. Однако если сократить время облучения, то электрон может оказаться на полпути между |0> и |1>. Только после измерений можно определить: перешел электрон в состояние |1> или возвратился в состояние |0>. Это подтверждает реальность существования кубита.

Таким образом, физическими системами, реализующими кубиты, могут быть любые объекты, имеющие два квантовых состояния. Это — ортогональные поляризационные состояния фотонов и фононных мод, спиновые состояния ядер, энергетические состояния электронов в квантовых структурах и т. д.

Кубит обладает рядом уникальных особенностей. Если один кубит может быть в двух суперпозиционных состояниях $|0\rangle$ и $|1\rangle$, то два кубита — уже в четырех состояниях $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$, $|11\rangle$ и представлять собой четыре числа. Это позволяет оперировать сразу с четырьмя состояниями вычислительного базиса. Имея в своем распоряжении k кубитов, можно выполнять математические операции с 2^k числами одновременно. Если есть сотня кубитов, то можно оперировать с количеством чисел, превосходящим число атомов во Вселенной [3]. В квантовых вычислениях (как и в классических) основными логическими элементами являются И, ИЛИ, НЕ-ИЛИ и т. д., которые могут быть реализованы на одном или нескольких кубитах. Из этих элементов составляются квантовые схемы, с помощью которых осуществляются определенные вычисления.

Самые простые схемы (гейты или ячейки) состоят из двух кубитов. Для проведения однокубитовых и двухкубитовых операций составляются специальные матрицы состояний, в которых находятся амплитуды состояний, согласно выражениям (2) и (3). Для описания состояния двухкубитовой квантовой системы по аналогии с выражением (2) необходимо сопоставить каждому состоянию вычислительного базиса $|x\rangle$ комплексный коэффициент (амплитуду), а именно:

$$|\psi\rangle = a_{00}|00\rangle + a_{01}|01\rangle + a_{10}|10\rangle + a_{11}|11\rangle, \qquad (3)$$

где $\Sigma |a_x|^2 = 1, x = 00, 01, 10, 11.$

Так же как для одиночного кубита, измерение состояния двух кубитов даст один из четырех возможных вариантов. Чтобы получить коэффициенты перед всеми слагаемыми в выражении (3), определяющие вероятности состояний x, необходимо осуществить многократные измерения. Однако многократность измерений в одной ячейке может быть заменена результатами измерений в большом числе ячеек, выполняющих одинаковую задачу [1]. В результате такой вычислительной операции сразу получим значения волновой функции ψ от всех ее аргументов $|x\rangle$. Это существенно ускоряет вычислительный процесс.

Таким образом, в квантовом процессоре вычисления осуществляются за один шаг (параллелизм вычислений) (см. также [2]). В классическом процессоре значения функции для каждого аргумента определяются в несколько этапов. Так, одношаговая операция с k кубитами потребует от классического компьютера 2^k элементарных шагов.

Если в классических элементах логики и памяти информация обрабатывается и хранится в виде битов "0" и "1", то в квантовых элементах используются другие правила обработки и хранения информации. Так, выражение (3) описывает важное свойство квантовых систем, которое называется запутыванием или сцеплением состояний. Запутанные, или сцепленные, квантовые объекты связаны между собой, независимо от того, насколько далеко они расположены друг от друга. Если измеряется состояние одного из сцепленных объектов (кубитов), то немедленно получаются сведения о состоянии других объектов. Так, если два кубита сцеплены между собой, то они лишены индивидуальных квантовых состояний. Они зависят друг от друга так, что если измерение одного кубита дает $|0\rangle$, то для другого — $|1\rangle$, и наоборот. Запутанные состояния — важный вычислительный ресурс квантовых компьютеров. Разработка надежных методов генерации сцепленных кубитов и алгоритмов вычислений с их помощью является главной задачей теории квантовой информации [1, 3].

Развитие квантовой информации и применение ее в виде различных приложений происходят необычайно быстро. В последнее десятилетие в мире развернулась настоящая "научная гонка" за достижениями в области квантовой информации и квантовых вычислений.

Как уже отмечалось выше, квантовые компьютеры — это вычислительные устройства, которые должны оперировать с огромным количеством чисел со скоростью, не достижимой классическими компьютерами. Важность задачи создания квантовых компьютеров трудно переоценить. Они нужны для моделирования сложных физических процессов, в том числе биологических. За рубежом уже проведены удачные опыты по реализации квантовых вычислительных процессоров [4].

Физическая реализация квантовых компьютеров задача чрезвычайно трудная. Она требует выдающихся научных достижений во многих областях науки, прежде всего в физике низкоразмерных (квантовых) структур, квантовой оптике, нанотехнологиях и т. д.

Квантовые компьютеры состоят из квантового процессора, устройств для установки начальных состояний кубитов, запуска вычислительного процесса и измерения конечных результатов. Каждый этап вычислительного процесса связан со множеством проблем. Одна из самых главных — коррекция ошибок, возникающих в процессе квантовых вычислений [4]. Квантовые состояния очень чувствительны к внешним возмущениям. Эффективность коррекции ошибок связана с сохранением суперпозиционных состояний квантовых объектов. Быстрый распад суперпозиционных состояний, называемый декогеренцией, накладывает основные требования на физические элементы в квантовых процессорах. Время сохранения когерентности состояний должно быть больше, чем время вычислений. Для этого нужно или найти квантовую систему, максимально изолированную от окружающей среды, или увеличить время когерентности искусственно. Продолжительность когерентного состояния объектов т_к и число логических операций n_{оп} в квантовом процессоре связаны между собой

$$n_{\rm OII} = \tau_{\rm K}/\tau_{\rm OII}$$

где т_{оп} — время вычислительной (унитарной) операции. Примеры значений времени когеренции для

Значения параметров $\tau_{\rm K}$, $\tau_{\rm on}$, $n_{\rm on}$ различных квантовых систем

Система	$\tau_{_K}, c$	τ _{οΠ} , c	n _{оп}
Спин ядра Спин электрона Ионная ловушка Электрон — Au Электрон — GaAs Квантовая точка Оптический резонатор СВЧ резонатор	$10^{-2} - 10^{8}$ 10^{-3} 10^{-1} 10^{-8} 10^{-10} 10^{-6} 10^{-5} 10^{0}	$\begin{array}{r} 10^{-3} - 10^{-6} \\ 10^{-7} \\ 10^{-14} \\ 10^{-14} \\ 10^{-13} \\ 10^{-9} \\ 10^{-14} \\ 10^{-4} \end{array}$	$10^{5} - 10^{14}$ 10^{4} 10^{13} 10^{6} 10^{3} 10^{3} 10^{9} 10^{4}

различных типов квантовых систем приведены в таблице [1].

Наиболее перспективными с точки зрения управления квантовыми объектами и сохранения их когерентности являются экситоны в низкоразмерных структурах [5, 6]. Экситон — это связанное состояние электрона и дырки, возникающее в результате поглощения фотона и не обладающее электрическим зарядом. Возбуждение экситонов значительно облегчается в низкоразмерных структурах даже при комнатной температуре, так как локализация в ограниченной области усиливает эффекты перекрытия волновых функций электронов и дырок. У таких экситонов боровской радиус *r* больше геометрических размеров квантовой структуры [5, 6]. С помощью экситонов можно реализовать одно- и двухкубитные системы. Так, экситон в низкоразмерной структуре, например квантовой яме, представляет собой изолированную квантовую систему (кубит). Двухкубитную систему (элементарный гейт) можно получить на базе двух низкоразмерных структур, например, в двух квантовых ямах, в каждой из которых возбужден экситон. Главное, чтобы перегородка между ямами позволяла "чувствовать" экситонам друг друга для создания сцепленного состояния.

Основными параметрами таких микрочастиц являются энергия экситона $E_{_{\rm 3KC}}$, энергия связи экситона $E_{_{\rm CB}}$, боровский радиус r [5].

Энергии связанных состояний микрочастицы *E*_{экс} определяются следующим уравнением [5]:

$$E_{\rm 3KC} = -13.6(\mu/m_0)\varepsilon_r^2 \frac{1}{n^2}$$
 3B, (4)

где $\mu = \frac{m_{\mathfrak{I}} + m_{\mathfrak{I}}}{m_{\mathfrak{I}}m_{\mathfrak{I}}}; m_{\mathfrak{I}}, m_{\mathfrak{I}}$ – соответственно эффектив-

ные массы электрона и дырки; m_0 — масса свободного электрона; ε_r — относительная высокочастотная диэлектрическая постоянная; n = 1, 2, ... — номер уровня квантования.

Радиус вращения экситона вокруг центра тяжести для объемного кристалла определяется следующим образом:

$$r = \hbar^2 / m e^2, \tag{5}$$

где $m = \mu$ — приведенная масса экситона; e — заряд электрона; \hbar — приведенная постоянная Планка.

Уровни квантования с энергией E_{3KC} расположены в запрещенной зоне полупроводника, чуть ниже границы проводимости E_3 .

Представляет интерес сравнение характеристик экситонов для двух полупроводников, вычисленных по формулам (4) и (5). Так, в предположении, что приведенная масса экситона составляет 0,1 массы свободного электрона, имеем для кремния $E_{
m экс} = 1,088$ эВ и r = 3,12 нм, энергия связи экситона $E_{\rm CB} = E_3 - E_{\rm ЭКС}$ (где E_3 — ширина запрещенной зоны, для кремния $E_3 = 1,1$ эВ) равна 12 мэВ; для германия аналогичные параметры равны соответственно $E_3 = 0,746$ эВ, $E_{3KC} = 0,741$ эВ, $E_{CB} = 5$ мэВ, r = 8 нм [6]. Приведенные данные показывают, что боровской радиус, энергия экситона, энергия связи (влияет на "время" жизни микрочастицы) различаются для кремния и германия. Это свидетельствует о том, что характеристики квантовых объектов значительно зависят от материала. Необходимые размеры квантовых структур для локализации микрочастиц требуют высокой точности изготовления (менее одного нанометра). Отсюда следует, что создание низкоразмерных структур для квантовых процессоров возможно при использовании специальных нанотехнологий. С их помощью нужно будет создавать квантовые структуры размером в несколько постоянных кристаллической решетки. Такими технологиями могут стать ядерные технологии, которые способны изменять изотопический состав исходного вещества и создавать новые материалы.

Часть 2. Изотопический квантовый процессор

Квантовый процессор является неотъемлемой частью квантового компьютера, который предназначен для обработки информации. Наиболее перспективными с точки зрения физической реализации квантового процессора являются квантовые объекты в низкоразмерных структурах [7].

Успех создания квантовых процессоров на базе низкоразмерных структур зависит от их возможностей обеспечить:

- необходимые значения времени "жизни" квантовых объектов (например, экситонов) и времени когеренции в условиях помех (фононов);
- способы избирательного управления вычислительными ячейками;
- надежные методы считывания конечных результатов.

На перечисленные выше условия реализации квантовых процессоров во многом влияют чистота материала, точность изготовления геометрических размеров низкоразмерных (квантовых) структур, качество "гетеропереходов", оптоэлектронные характеристики вещества и т. д.

На рис. 1 представлено схематическое изображение вычислительной ячейки процессора на квантовых ямах. В виде E_9 и E_{π} обозначены уровни квантования для электрона и дырки, V_9 и V_{π} — потенциальные барьеры для электрона и дырки, которые образованы за счет разницы ΔE величин запрещенных зон E_{3_1} и E_{3_2} стыкуемых материалов в "гетеропереходах".

Известно, что экситоны гораздо легче и чаще наблюдаются в собственных полупроводниках, чем легированных другими элементами, поскольку в последних свободные носители частично экранируют кулоновское взаимодействие между электроном и дыркой. Поэтому создавать квантовые структуры благоприятнее из разных изотопов одного и того же химического элемента. Такие изотопы отличаются друг от друга шириной запрещенной зоны, коэффициентами диэлектрической проницаемости, преломления света, спинами ядер, теплопроводностью и т. д. [8].

Отсюда следует, что изотопы можно использовать для легирования собственных полупроводников и получать различные оптоэлектронные устройства. С помощью сочетания разных изотопов можно создавать "гетеропереходы" и низкоразмерные структуры. Например, множество квантовых точек в кристалле могут состоять из более тяжелых изотопов (Si²⁹ или Si³⁰), разделяющие слои — из более легких изотопов (Si²⁸). Это значит, что потенциальный барьер "гетероперехода" будет образован за счет разницы запрещенных зон ΔE изотопов Si²⁸ и Si³⁰ [8].

Изотопическая нанотехнология на базе нейтронного облучения позволяет создавать такие структуры без посторонних примесей и дефектов, которые могут быть дополнительными причинами распада экситонов [8]. Кроме того, высокая точность изготовления низкоразмерных структур, которой обладают ядерные технологии, обеспечит максимальную энергию связи и время "жизни" квантовым объектам.



Рис. 1. Схематическое изображение квантовых ям и уровней квантования для электрона и дырки



Рис. 2. Зависимость энергии связи от ширины квантовой ямы

Одним из главных условий использования изотопически смешанных веществ для создания квантовых структур является наличие достаточно большой величины ΔE .

Следует отметить, что значение ΔE для различных изотопов может меняться от нескольких десятых миллиэлектронвольта до нескольких миллиэлектронвольт. Так, максимальная разница запрещенных зон для сочетания изотопов кремния (Si²⁸ и Si³⁰) составляет 2 мэВ. Для изотопов гидрида и дейтерида лития эта разница значительно больше и равна 0,103 эВ [6]. Это свидетельствует о больших возможностях создания новых материалов для квантовых структур с помощью изменения изотопического состава исходного вещества.

Очень важным условием физической реализации изотопического процессора является обеспечение достаточного времени "жизни" квантовых объектов. Для рассматриваемого примера квантового процессора — это экситоны. Время существования экситона зависит от особенностей экситон-фононного взаимодействия, определяемого энергией фонона и энергией связи Е_{св} экситона. Энергия связи Е_{св} зависит от многих параметров (материала, размеров квантовой структуры, высоты потенциального барьера и т. д.) и при определенных условиях может достигать максимальной величины [9]. На рис. 2 изображена зависимость энергии связи экситона от ширины квантовой ямы а для сочетания полупроводников GaAs-AlGaAs [9]. На рисунке видно, что небольшие флуктуации геометрических размеров сильно влияют на энергию связи Е_{св}. Отсюда следует, что время "жизни" квантовых объектов, прежде всего, зависит от качества физической реализации квантовой системы. Влияние точности изготовления низкоразмерных структур на характеристики квантовых объектов можно оценить с помощью зависимости $E_{\rm CB} = f(a)$. Чтобы построить эту зависимость, нужно знать много параметров (оптоэлектронные характеристики и изотопический состав материала, высоту потенциального барьера, подвижность полупроводниковых носителей, высоты потенциальных барьеров для электрона и дырки, энергии возбуждения экситонов и т. д.), некоторые из которых определяются экспериментальным путем. Все это свидетельствует о сложности поставленной задачи. Основные этапы ее решения целесообразно рассмотреть на примере квантовой ямы с шириной а из арсенида галлия [9]. В основе методики определения зависимости энергии связи экситона от значения а лежит описание поведения микрочастицы в квантовой яме (см. рис. 1) с конечным потенциальным барьером. Для этого анализируются отдельно потенциальные ямы для электрона и дырки (рассчитываются высоты потенциальных барьеров ямы для электрона и дырки $V_{\mathfrak{I}}$ и $V_{\mathfrak{I}}$ в зависимости от разницы запрещенных зон "стыкуемых" материалов ΔE , отыскиваются соответствующие волновые функции) [9].

Для нахождения зависимости между $E_{\rm CB}$ и *а* необходимо осуществить следующие вычислительные операции:

1) определение разницы в значениях запрещенных зон ΔE между слоями в "гетеропереходах", образующих квантовую яму (см. рис. 1).

2) вычисление высоты барьера для электрона V_{3} и дырки V_{d} , значения которых зависят от конкретного материала, например, для сочетания GaAs—AlGaAs имеется такая зависимость: $V_{3} = 0,85\Delta E$, $V_{d} = 0,15\Delta E$ [9];

3) решение уравнения Шредингера применительно к потенциальной яме ограниченной высоты для расчета волновых функций электрона $\psi_{9}(z)$ и дырки $\psi_{d}(z)$, которые в общем виде можно записать как

$$\psi(z) = \begin{cases} C\cos(kz), C\sin(kz) \text{ внутри ямы;} \\ D\exp(-kz) \text{ вне ямы,} \end{cases}$$

где
$$k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}$$
 внутри ямы, $k = \sqrt{\frac{2m(V-E)}{\hbar^2}}$ вне ямы;

m — эффективная масса частицы; E — энергия квантования; V — высота потенциального барьера ямы; \hbar — нормированная постоянна Планка;

4) после решения численным методом приведенных выше уравнений рассчитываются значения энергий низшего уровня (n = 1) для электрона E_3 и дырки E_n ;

5) определяется энергия связи как разность между энергией электрон-дырочной пары и энергией экситона, а именно: $E_{\rm CB} = (E_3 + E_{\rm A}) - E_{\rm 3KC}$;

6) построение зависимости $E_{\rm CB} = f(a)$, где a — ширина ямы;

7) определение значения a, соответствующего максимальному значению функции, т. е. $\max E_{cB}$.

Как видно из рис. 2 [9], зависимость $E_{\rm CB} = f(a)$ имеют явно нелинейный характер с максимумом в области 3—4 нм. Этот размер примерно в 3 раза меньше боровского радиуса экситона для арсенида галлия. Применительно к кремнию ширина ямы для локализации экситона должна быть меньше 3 нм. Это предъявляет особые требования к технологии изготовления квантовых структур.

Такую высокую точность изготовления низкоразмерных структур можно обеспечить с помощью изотопической нанотехнологии с источниками нейтронов, имеющими разрешающую способность по энергии $\Delta E_{\rm H} \le 10^{-9}$ эВ [8, 10]. Так, обеспечивая необходимую точность создания квантовых структур, можно повысить максимальную энергию связи экситона в квантовой яме в 3 раза по сравнению со значением для объемного кристалла. При дальнейшем уменьшении ширины ямы (меньше оптимальной величины) волновые функции электрона (и в меньшей степени дырки) начинают преодолевать энергетический барьер за счет туннелирования [9]. Это уменьшает эффективную локализацию экситона и его энергию связи, которая постепенно понижается до обычного уровня в объемном материале. Применительно к изотопическим квантовым структурам самым сложным в рассмотренном примере является определение высоты барьера между изотопами одного и того же вещества для электронов и дырок. Для этого необходимы теоретические и экспериментальные исследования, которыми занимается изотоптроника [6, 8, 11].

Приведенные выше преимущества новых материалов из изотопов одного и итого же химического элемента (чистота материала и точность изготовления изотопических структур) позволяют сделать вывод о возможности продления "жизни" квантовым объектам и целесообразности применения изотопической нанотехнологии для квантовых процессоров (подробнее см. обзор [6]).

Модели изотопических процессоров могут быть самыми разными в зависимости от выбранных квантовых объектов. Так, в качестве физической реализации кубитов могут быть или только экситоны, или только фононы, или сочетание экситонов и фононов. Так, если за основу взять механизм экситон-фононного взаимодействия, то можно использовать его для реализации вычислительных гейтов. В этом случае один кубит может быть представлен в виде экситона, другой кубит — в виде фонона, фактом сцепления этих кубитов является их взаимодействие (столкновение). Фононы могут быть использованы как самостоятельные квантовые объекты, а также для сцепления кубитов, реализованных, например, на экситонах или электронах в квантовых структурах.

Таким образом, механизм работы этих моделей описывается поведением квантовых объектов (экситонов и фононов) в низкоразмерных структурах. При этом основными вопросами являются кодирование информации и получение устойчивых двухкубитных квантовых систем (элементарных гейтов). Так, кодирование квантовой информации на базе экситона можно осуществить с помощью его поляризации (горизонтальной, вертикальной) или направления (вверх, вниз) собственного момента вращения (спина), для фононов — использовать ортогональность поперечной и продольной мод.

Как было отмечено выше, примером изотопической вычислительной ячейки могут быть две квантовые структуры с экситонами [8], разделенные "тонкой перегородкой", дозволяющей квантовым объектам индуцировано "чувствовать друг друга". Это означает взаимное влияние друг на друга и общую волновую функцию.

Однако для выполнения квантовых операций нужно еще обеспечить способы:

- возбуждения квантовых объектов и установки начальных состояний;
- избирательного управления каждым кубитом (например, экситоном) для осуществления унитарных операций;
- обеспечения необходимого времени когерентности квантовых состояний;
- считывания результатов.

Первая операция возбуждения экситонов и задания, например, требуемой поляризации (горизонтальной или вертикальной) осуществляется с помощью импульса света соответствующей поляризации от лазерного источника. Причем энергия фотона должна быть приблизительно равной энергии экситона полупроводника или его изотопа, из которого состоит квантовая структура. Если в качестве признака информации используется спин, то нужная ориентация его (вверх или вниз) достигается с помощью внешнего магнитного поля.

Последняя операция считывания результатов также теоретически не вызывает трудностей. Известно, что после квантовых операций результаты вычислений оцениваются по физической величине, получаемой после измерений конечных квантовых состояний. Экситоны излучательно аннигилируют с испусканием фотона света. Поэтому такими физическими величинами для экситонов могут быть поляризация излученного ими фотона или направление спина. Измерения можно осуществить с помощью специальных фотодетекторов, реагирующих на определенную поляризацию света или направление спина электрона после разрушения экситона, которое происходит естественным путем с течением времени.

Важным вопросом в реализации квантового процессора является обеспечение избирательного управления отдельными кубитами для реализации логических квантовых операций и создания супер-

позиции состояний всего регистра (цепочки кубитов) квантового процессора, состоящего из нескольких регистров. В случае квантовых структур (ям, проволок или точек) состояние сцепленности (запутанности состояний) можно осуществить с помощью электрического поля или импульсов света различной поляризации. Энергия электрического поля повышает энергию экситонов и создает возможность экситонам мигрировать, например между квантовыми точками, и создавать тем самым состояние сцепленности между отдельными кубитами (экситонами). Однако для избирательного воздействия на отдельные точки вычислительного гейта нужны дополнительные признаки. Например, управляемые и управляющие кубиты гейта могут различаться энергией возбуждения экситона и, следовательно, управляться импульсами света разной длины. Это можно осуществить, если изготовлять квантовые структуры из материалов с разной шириной запрещенной зоны, для которых энергия экситонов имеет разные значения. В объеме одного кристалла это можно сделать из разных изотопов одного и того же химического элемента. При этом избирательность возбуждения экситонов именно в квантовых структурах объясняется тем, что энергия связи в них больше, чем в разделяющих объемах за счет сжатия микрочастицы [8]. После излучательного распада экситонов фотоны света будут различаться по длине волны, что позволяет также создавать ячейки памяти для хранения информации [6].

Наиболее сложной задачей является обеспечение заданного времени когеренции квантовых объектов, которое связано со временем "жизни" экситона. Здесь главную роль играет механизм экситон-фононного взаимодействия внутри квантовых структур. Экситон в квантовой структуре при своем вращении вокруг центра "тяжести" генерирует фононы (квазичастицы). Несмотря на то, что энергия фонона на три порядка меньше, чем у экситона, волновые функции этих квантовых объектов будут пересекаться. Это означает столкновение фонона и экситона, в результате чего последний может потерять когеренцию. Известно, что энергия фононов зависит от материала низкоразмерной структуры. Для более тяжелых изотопов энергия фононов меньше. Если создавать низкоразмерные структуры из разных изотопов, то можно не только избирательно возбуждать экситоны, но и менять энергию фононов, а следовательно, и время когеренции квантовых состояний.

Поэтому для решения проблемы декогеренции квантовых состояний, с которой связано время вычислительных операций, необходимо уменьшать влияние фононов. Фононы — это локализованная область колеблющихся атомов, которая перемещается по кристаллу в виде квантов энергии. Поведение фононов в низкоразмерной структуре описывается уравнением Шредингера [12]. Снижение числа фононов и их энергии повысит возможности квантовых процессоров, а также быстродействие различных оптоэлектронных устройств. Для этого нужно исследовать характеристики экситон-фононного взаимодействия в изотопических низкоразмерных структурах.

Время когеренции $t_{\rm k}$ квантового объекта зависит от времени "жизни" $t_{\rm x}$ экситона ($10^{-7}...10^{-12}$ с), частоты столкновений экситона с фононами и среднего времени жизни фонона 5 пс (причем время испускания фонона — доли пикосекунд). Среднее время между столкновением с фононом определяется, например, шириной ямы, материалом ямы, энергией частицы (экситона). Частота рассеяния имеет порядок 0,5...25 пс⁻¹, среднее время между столкновениями — 2...0,04 пс [12]. Эти временные характеристики позволяют сделать вывод, что экситон за время "жизни" минимум один раз (1 пс/2 пс) = 0,5 столкнется с фононом. Каждое такое столкновение может закончиться потерей когеренции.

Характер образования фононов зависит от типа полупроводника. Ввиду того, что фононы обладают относительно небольшой энергией, они заперты потенциальным барьером квантовой структуры в большей степени, чем экситоны. В свою очередь, экситоны в квантовой структуре за счет потенциального барьера изолированы от действия внешних фононов, возникающих в объемном кристалле в результате тепловых волн, что облегчает их возбуждение в низкоразмерных структурах. Отсюда следует, что главным источником фононов в квантовой структуре является сам экситон. Генерируемые в них фононы отражаются от потенциальных барьеров, и тем самым повышается вероятность поглощения отраженного фонона экситоном. В результате столкновений с фононами экситон теряет энергию (повторное рождение фонона) или поглощает фонон, и его энергия (экситона) возрастает [12]. Это продлевает время "жизни" экситона (но не время когерентного состояния). Результирующая скорость потери энергии экситоном в процессе движения по квантовой структуре (скорость термализации) определяется скоростью описанных выше процессов испускания фонона и скоростью поглощения фононов [12]. Время термализации влияет не только на возможности квантовых процессоров (время вычислений), но и определяет скорость работы многих оптоэлектронных устройств, лазеров, фотодетекторов.

Следует отметить, что быстродействие приемопередающих устройств (особенно оптических модуляторов) имеет в последнее время решающее значение для повышения скорости передачи информации, например, по волоконно-оптическим системам передачи [8]. В любом случае скорости процессов передачи и обработки информации должны быть соизмеримы. Поэтому борьба с фононами в квантовых структурах — одно из самых важных научных направлений. Результаты этой борьбы зависят от времени "жизни" фононов. Фононы могут сами разрушаться в результате ангармонических взаимодействий с кристаллической решеткой [12]. Отсюда следует, что строение кристаллической решетки, размеры атомов играют большую роль в эмиссии фононов. Использование изотопически смешанных материалов для создания квантовых структур могут снизить число собственных фононных мод и время их "жизни". Кроме того, создание низкоразмерных структур путем сочетания разных изотопов может привести к образованию внутри квантовых систем только акустических (низкочастотных) мод, которые не влияют на когеренцию экситонов [12].

Кроме собственных колебаний кристаллической решетки и вращения экситонов другой причиной возникновения фононов может быть механическое напряжение в гетеропереходе низкоразмерной структуры. При сопряжении слоев полупроводника с разным размером кристаллической решетки а могут возникать внутри слоев сжимающее или растягивающее механическое воздействие [8]. Наличие искажений в решетке приводит к накапливанию упругой энергии, которая пропорциональна толщине слоя (например, квантовой ямы). При достижении некоторого порогового значения (критической толщины) в системе происходят релаксации, в том числе с рождением фононов. Изотопические низкоразмерные структуры, имеющие близкие значения а, позволят уменьшить механические напряжения в "гетеропереходе" и вероятность образования фононов.

Таким образом, время термализации можно снизить наиболее эффективно путем совершенствования гетеропереходов, снижения числа и энергии фононов, генерируемых носителями (экситонами). Наиболее перспективным способом борьбы с фононами является моделирование квантовых структур, позволяющих "гасить" фононы. В этом случае важную роль играет сочетание характеристик материала отдельных слоев, из которых состоит низкоразмерная структура. Например, чередование нескольких слоев с разной плотностью материала в виде многослойного сандвича или сверхрешеток позволяет сократить время "жизни" фононов [12]. Похожий эффект может дать создание низкоразмерных структур с различной геометрией и формой. Такими структурами могут быть длинные квантовые проволоки. Генерируемые экситоном фононы в виде "бегущих волн" будут распространяться в противоположные стороны. При условии достаточной длины квантовой проволоки фононы затухнут через 5 пс (что соответствует длине квантовой проволоки примерно в несколько микрометров) или не успеют вернуться (отразиться от границ квантовой структуры) к экситону за время его "жизни", чтобы нарушить его когеренцию.

Другим примером физической реализации изотопического квантового процессора могут быть квантовые точки в виде "вытянутых колец" (микроколлайдеров). В каждой такой точке возбуждается экситон (кубит). Повышение времени когеренции квантовых объектов добиваются путем интерференции фононов друг с другом. Фононы, генерируемые экситоном в такой квантовой точке, будут двигаться в противоположных направлениях от экситона навстречу друг другу по кругу. При равной скорости фононы встретятся посередине "кольца". При условии их противофазности это приведет к аннигиляции фононов. Противофазности бегущих волн можно добиться введением в квантовую точку дефекта, например, атома фосфора путем легирования материала. Наилучшее качество легирования обеспечивает ядерная технология. Так, например, путем облучения нейтронами изотопов кремния может образоваться нестабильный изотоп Si³¹, который превращается затем в фосфор.

Изотопическая нанотехнология, которая использует нейтронное облучение, дает возможность создавать различные квантовые структуры с заданными параметрами экситонов и фононов.

Таким образом, моделирование по форме и составу вещества низкоразмерных структур позволит заранее предсказать поведение фононных мод. Следовательно, есть основания считать, что изотопические низкоразмерные структуры могут стать в будущем основой для проектирования современных устройств передачи и обработки информации.

Таким образом, главная проблема квантовых компьютеров — их физическая реализация — может быть решена с помощью исследований в области свойств изотопически смешанных веществ. Научные работы в области разработки новых моделей изотопических квантовых процессоров, а также предлагаемые новые материалы в сочетании с ядерной технологией могут значительно ускорить процесс физической реализации квантового компьютера и повысить его вычислительные возможности.

Список литературы

1. **Нильсон М., Чанг И.** Квантовые вычисления и квантовая информация. М.: Мир, 2006. 822 с.

2. Кадомцев Б. Б. Динамика и информация // Успехи физических наук, 1999. 400 с.

3. Щука А. А. Наноэлектроника. М.: Физматкнига, 2007. 463 с.

4. Килин С. Я. Квантовая информация // Успехи физических наук, 1999. Т. 169. № 5.

5. Мартинес-Дуарт Дж. М., Мартин-Палма Р. Дж., Агулло-Руеда Ф. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники. М.: Техносфера, 2007. 368 с.

6. **Plekhanov V. G.** Elementary excitations in isotope — mixed crystals // Phys. Reports. 2005. Vol. 410. P. 1–235.

7. Валиев К. А., Кокин А. А. Квантовые компьютеры: надежды и реальность. Москва—Ижевск: Изд. НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2004. 320 с.

8. **Журавлева Л. М., Плеханов В. Г.** Изотопическая нанотехнология низкоразмерных структур // Нано- и микроструктурная техника, 2010. № 9.

9. Greene R. L., Bajaj K. K. & Phelps D. E. Energy levels of Wannier excitons in GaAs—GaAlAs quantum-well structures // Phys. Rev. 1984. Vol. 29. N 4. P. 1807—1812.

10. **Журавлева Л. М., Плеханов В. Г.** Ядерная нанотехнология низкоразмерных изотопически-смешанных структур // Наноиндустрия. 2009. № 4. С. 28—30.

11. **Plekhanov V. G.** Isotopetronics — new direction of nanoscience // ArXiv, phys/1007.5386. 2010. P. 1—98.

12. Строшио М., Дута М. Фононы в наноструктурах. М.: Физматлит, 2006. 319 с.



НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 3, 2011

CONTENTS

Keywords: colloidale systems, laser radiation, fractal geometry, nanostructures

Keywords: inertial navigation, error model, micromechanical accelerometer, small-sized two-axis test table

It is shown, that there is optimum time of processing of a composite material ultrasound at which for the set concentration inclusions it is reached maximum it conductivity.

It is received, that with growth of value of external pressure, at consolidation a composite material, the imaginary part of dielectric permeability of a composite increases under the linear law.

Keywords: microstrip photonic structures, dielectric permittivity, composites, carbon nanotubes, ultrasound, pressure

Keywords: photonic crystals, semiconductors, gallium arsenide, optical waveguides

Results of nanostructured diamond containing carbon materials field emission properties investigation are presented. Composite samples with diamond particles size and pyrocarbon content varied in a broad range were investigated. Current-voltage characteristics and the field emission current dependence on the residual gases pressure were analysed.

Keywords: field emission, cold cathode, diamond-carbon composites, carbon materials

Keywords: thin-film nano- and microelectromechanical systems (NaMEMS), identical strain-sensing elements, transient temperature

Keywords: piezoactuator for nano- and microdisplacement, control systems for deformation, correct arrangements, absolute stability

Mukhurov N. I., Efremov G. I., Zhvavyi S. P. Functional Capabilities the Electrocurrent Microrelay 39 The design and method of theoretical modelling the electrocurrent microrelay with meander strips is offered at equality and an inequality of currents. It is established, that base function in the normalized kind graphically represents a symmetric parabola with coordinates of an extreme point $m_0 = 0.5$ and $I^* = 0.5$. Efficiency of switching of vectors of forces of electromagnetic fields from an attraction is considered at a direct course on pushing away at reverse motion, an opportunity of use of the capacitor operative control of parameters. **Keywords:** the electrocurrent microrelay, a current, electromagnetic and jet forces, planar-volume structure

Keywords: sensitive element of pressure, the gage of absolute pressure, the gage of differential pressure, the thermal automatics, the controller

Keywords: quantum information, realization qubits, isotopical quantum processor, excitons, quantum dots, elementary gate

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://www.microsystems.ru

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства

в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

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

Сдано в набор 20.01.2011. Подписано в печать 22.02.2011. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,42. Заказ 136. Цена договорная

усл. печ. л. 6,66. уч.-изд. л. 6,42. заказ 156. цена договорная

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15

- НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 3, 2011 –