

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 2(151) ♦ 2013

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

Главный редактор
Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора
Лучинин В. В.

Редакционный совет:

Аристов В. В.
Асеев А. Л.
Волчихин В. И.
Гапонов С. В.
Захаревич В. Г.
Каляев И. А.
Квардаков В. В.
Климов Д. М.
Ковальчук М. В.
Нарайкин О. С.
Никитов С. А.
Сауров А. Н.
Серебряников С. В.
Сигов А. С.
Стриханов М. Н.
Чаплыгин Ю. А.
Шахнов В. А.
Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И.
Андреевский 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.
Пожела К.
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:

Издательство
"Новые технологии"

Издается с 1999 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

- Лучинин В. В. Принцип матрицы — фундамент междисциплинарных технологий 2

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

- Гареев К. Г., Грачева И. Е., Мошников В. А. Золь-гель-технологии направленного синтеза нанокмполитов на основе наноразмерных магнитных частиц в порах изолирующей диэлектрической матрицы 9

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

- Каленов В. Е., Корляков А. В. Частотно-резонансный метод измерения механического воздействия с помощью нелинейного микромеханического преобразователя 15

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

- Александрова О. А., Максимов А. И., Мараева Е. В., Матюшкин Л. Б., Мошников В. А., Мусихин С. Ф., Тарасов С. А. Синтез и самоорганизация квантовых точек сульфида свинца для люминесцентных структур, полученных методом испарения коллоидного раствора 19
- Асташенкова О. Н., Корляков А. В. Контроль физико-механических параметров тонких пленок 24

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

- Афанасьев А. В., Демин Ю. А., Иванов Б. В., Ильин В. А., Кардо-Сысоев А. Ф., Лучинин В. В., Смирнов А. А. Высоковольтный миниатюрный карбидокремниевый источник наносекундных импульсов для генерации рентгеновского и микроволнового излучений 30

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

- Корляков А. В., Устинов Е. М. Критерии и оптимизация параметров вибродатчиков 33
- Горемыкин Н. И., Койгерев А. С., Смелов И. Н. Миниатюрные радиоидентификаторы на поверхностных акустических волнах 37
- Бройко А. П., Ленчук О. С. Анализ теплового состояния микросенсора, созданного на основе тонкопленочных технологий 45
- Аскерко А. Н., Бохов О. С., Лучинин В. В. Испытания и тестирование микро-электромеханических компонентов и систем на их основе 49
- Contents** 55

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

ПОДПИСКА:

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

Адрес для переписки:

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

УДК 621.382

В. В. Лучинин, д-р техн. наук, проф., зав. каф., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ), e-mail: cmid_leti@mail.ru

ПРИНЦИП МАТРИЦЫ — ФУНДАМЕНТ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Поступила в редакцию 18.12.2012

Представлен анализ эволюции принципов структурно-топологического кодирования в микро- и нанотехнологии. Подробно рассмотрен принцип матрицы как базис конвергентных междисциплинарных технологий.

Ключевые слова: микро- и нанотехнологии, структурно-топологическое кодирование, принцип матрицы, временные отношения, неравновесный термодинамический подход

"В той же степени, в какой неверные аналогии могут привести к неверным выводам и ввести в заблуждение, подлинные гомологии и изоморфизмы могут оказаться чрезвычайно полезными, если учесть возможность взаимного обогащения областей, которые в настоящее время изолированы друг от друга".

*Б. Г. Гудвин.
Аналитическая физиология клеток
и развивающихся организмов.
М.: Мир, 1979.*

Введение

Анализ современного состояния в области "критических" технологий и техники новых поколений позволяет сделать заключение о том, что одним из наиболее динамично развивающихся междисциплинарных научно-технических направлений является физика и технология микро- и наносистем. Данная область знаний служит базисом для новых прогрессивных технических решений в микро- и наноэлектронике, микро- и наносистемной технике, биотехнологии и геной инженерии [1].

Интегративным элементом для наиболее перспективных групп неорганических (алмаз, графен, карбид кремния) и органических (белки, нуклеиновые кислоты, полисахариды, липиды) материалов является углерод, он может образовывать, независимо от природы вещества, в синтезе которого участвует, сходные структурные конфигурации при гибридизации связей на атомно-молекулярном уровне и, кроме того, в силу пространственного "энергетического конформизма"

(конформационная изомерия), в условиях молекулярных комплексов поддерживать структурно-конформационную вариабельность, т. е. полиморфизм. Более слабые связи, типичные для органических веществ, определяют их склонность к структурному многообразию, проявляющемуся, как и в объектах неорганической природы, в полиморфизме (политипизме) при близости свободных энергий образования модификаций. В связи с ранее отмеченным **в рамках данной работы в качестве актуальной проблемы будет рассмотрен вопрос установления технологического и, возможно, функционального изоморфизма объектов различной физико-химической природы в целях активного использования некоторых аналогий при направленном синтезе микро- и наносистем.** При этом, безусловно, учитывался и тот факт, что при изучении объектов неорганической и биоорганической природы трудно спрогнозировать проявление другого столь явного подобия в процессах синтеза, которое должно наблюдаться в условиях матричного копирования.

Одной из основных целей данной работы следует считать отражение некоторых обобщающих принципов и процессов, которые обеспечивают активное использование природных естественных механизмов для синтеза сложных твердотельных микро- и наносистем.

Принципы структурно-топологического кодирования в микро- и нанотехнологии

Современное состояние микро- и нанотехнологий в отношении достижения конечных целей формирования изделия, определяемого такими параметрами, как топологическая норма, степень интеграции, быстродействие, информационная емкость и, наконец, стоимость выполнения одной логической операции, требует при реализации конструкторско-технологических решений установления оптимального соотношения между "принудительными" аппаратными средствами достижения конечных целей и "внутренними" естественными физико-химическими возможностями процессов и синтезируемых объектов.

В целом, если сформировать общую и идеализированную целевую установку при разработке и изготовлении традиционных информационных или механических технических микро- и наносистем, то ее можно определить следующим образом: создание в минимальном объеме твердого тела или на его поверхности максимального количества строго определенных областей с заданной геометрией, составом, структурой, а следовательно, и свойствами, кооперация которых (областей) обеспечивает выполнение определенных функций при малом расходе энергии, высоком быстродействии и надежности многократного повторения операций для требуемых условий эксплуатации.

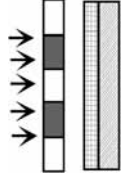
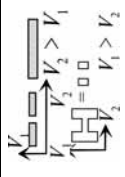
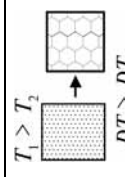
Эволюция микро- и нанотехнологии, в том числе развитие органического и биологического материаловедческого базиса, определяет переход от процессов, требующих полного задания структурной и топологической информации (искусственное упорядочение с потерей информации), к процессам, сочетающим искусственное и естественное упорядочение, в которых информация возникает как продукт взаимодействия между объектом и средой при протекании реакций в области кинетических ограничений или в среде, находящейся в состоянии, далеком от равновесного, при этом могут быть сформулированы следующие принципы структурно-топологического кодирования:

- *принцип селективности*, проявляющийся в избирательном анизотропном взаимодействии объекта и среды с особым характером движения (трансформации) фазовой границы и доминирующей ролью информации, изначально существующей в объекте, при реализации процессов в области кинетических ограничений;
- *принцип матрицы*, проявляющийся в изоструктурной и (или) комплементарной репродукции исходной структуры с сохранением структурно-топологической информации при реализации процессов в квазиравновесных условиях, а также в обновлении структуры подложки за счет внесения инородной матрицы — субстрата или проведении процесса в условиях, ограничивающих возможность полного упорядочения, т.е. стимулирующих самоупорядочение;
- *принцип самоорганизации*, проявляющийся в самоупорядочении среды в условиях, далеких от равновесия, с возникновением новых структурных состояний или фаз с резко отличающимися от исходных параметрами, которые либо устойчиво существуют, либо исчезают после снятия вещественно-энергетической неравновесности.

Системное изложение данных представлений иллюстрирует табл. 1, отображающая эволюцию принципов структурно-топологического кодирования.

Таблица 1

Эволюция принципов структурно-топологического кодирования

Принцип кодирования	Характер протекания процесса	Принцип управления процессом	Характер переноса структурно-топологической информации	Мерность пространства кодирования	Пространственное разрешение	Способ совмещения	Защищенность кодирования информации	Схема процесса
Маска	Тотально	Искусственный (человек, ЭВМ)	Параллельно	Двумерно	Микроскопическое	Искусственный (человек, ЭВМ)	Потеря информации	
Зонд	Локально	Искусственный (человек, ЭВМ)	Последовательно	Двумерно (трехмерно)	Микроскопическое* Субмикроскопическое** Молекулярное***	Искусственный (ЭВМ)	Потеря информации	
Селективность	Селективно	Естественный (самоформирование)	Параллельно: — избирательно; — анизотропно	Трехмерно	Молекулярное	Естественный	Информационное обогащение	
Матрица	Селективно, комплементарно	Естественный (автокатализ, адаптация)	Параллельно: — избирательно; — матрично	Одномерно, двумерно, трехмерно	Молекулярное	Естественный	Репродукция, генерация информации	
Самоорганизация	Кооперативно	Естественный (самоорганизация)	Параллельно, кооперативно	Трехмерно	Макромолекулярное	Естественный	Генерация информации	
* Лазерные технологии. ** Электронно-ионные зондовые технологии. *** Атомно-зондовые нанотехнологии.								

Принцип матрицы

Биоструктуры с различным уровнем иерархической сложности характеризуются протеканием процессов самоорганизации, самосборки, матричного копирования и размножения. Наряду с широко известным принципом биологической универсальности (построение всего живого из ограниченного набора биомолекул и надмолекулярных структур), в современной биологии выделяют еще лишь два принципа, претендующих на фундаментальность:

- конвариантной редупликации дискретно построенных генов, хранящих наследственную информацию (принцип матрицы);
- конкурентных отношений (принцип естественного отбора).

В работе [2] при рассмотрении первого принципа указывалось, что "одно из главных проявлений жизни состоит не в нарастании массы живого, а в том, что множится число элементарных индивидов, при этом некоторое элементарное вещество строит себе подобное и отталкивает его от себя, давая начало новому индивидууму. Этот процесс называют не просто размножением, а именно редупликацией".

Понятие "матрица" исходит от латинского "matrix" — матка, источник, начало. Исторические факты практического использования матричной репликации (копирования) восходят к древним шумерам, использовавшим в системе "печать—глина" известный позднее способ массового копирования при книгопечатании и чеканке монет — принцип матрицы (в современной технологии — импринт-литография). Развитие в конце прошлого века идей об аналогии роста и размножения кристаллов и живых организмов (К. Штерне), несмотря на их ограниченность и определенные заблуждения (с учетом современных представлений об открытых неравновесных системах), инициировало формулирование в 1927 г. нашим соотечественником, биологом Н. К. Кольцовым принципа, который определил революционные изменения в представлении о наследственности, развитые в дальнейшем в работах физиков М. Дельбрюка, Э. Шредингера [3], Ф. Крика и генетика Дж. Уотсона.

Принцип матрицы, применительно к биосистемам сформулированный Н. К. Кольцовым [4], говорил о том, что "наследственные молекулы" синтезируются матричным путем, т. е. фактически каждая молекула от молекулы. При описании принципа матрицы применительно к передаче наследственной информации в схеме Н. К. Кольцова была допущена неточность, отражающая специфические особенности обеспечения надежности копирования, что впоследствии нашло отражение в известном принципе комплементарности. Синтез "самых на себе", т. е. "подобное к подобному", не оптимален с точки зрения надежности воспроизведения структуры матрицы. Принцип матричного копирования, основанный на комплементарности и классических представлениях о минимизации свободной энергии взаимодействующих элементов, в настоящее время фак-

тически является базисом в теории эволюции последовательно реплицирующихся систем. Комплементарность в рамках общей теории матричного синтеза обеспечивает максимальную точность копирования "антиподобное — комплементарное". Практика показала, что синтез белков по принципу автокатализа "самых на себе" неэффективен ввиду возможности возникновения ошибок копирования. В неравновесных условиях начинает работать принцип изменчивости, когда "подобное" синтезирует "подобное" с накоплением ошибок — без потери, с частичной или полной потерей исходной структурной информации. Фактически, можно предположить наличие генетических рядов производных от исходной структуры G_{ij} :

$$\{G_{ij}\} = g_{1j}, g_{2j}, \dots, g_{nj},$$

где $g_{1j}, g_{2j}, \dots, g_{nj}$ — производные от генотипа структуры, образующиеся в результате вариации ряда параметров внешней среды без создания условий, когда один или множество неравновесных факторов определяют возможность протекания спонтанного самоструктурирования с необратимой сменой генотипа исходной матрицы. Такая смена генотипа в общем случае изменяет и набор производных структур.

За пределами устойчивости при допустимом многообразии, т. е. полиморфизме (от греческого — многообразный), возникают конкурентные отношения и реализуется принцип естественного отбора (эволюционной селекции). При этом конкурентные отношения характеризуются матрицей селективности или селективной ценности:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & \dots & \dots \\ \dots & C_{ki} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}.$$

Отбираются сочетания структур и условий их синтеза (функционирования), дающие максимальные значения C_{ki} .

Известен факт гипотетического моделирования (словесная модель) естественного отбора с использованием представлений о росте кристаллов, способных к полиморфной кристаллизации. Наряду с выводом об отборе по кинетическому совершенству или "селективной ценности" [5], С. Э. Шноль [6] постулирует, что кинетически более совершенные формы, способные к более быстрой кристаллизации и доминирующие в отборе, являются формами все более сложными. Данное однозначное толкование взаимосвязи между устойчивостью и сложностью не имеет достаточных оснований, как и доводы о наличии у более сложных структур некоторого "воспроизводящего аппарата", который имеет "чертежи" и "функциональные схемы" в виде закодированной в последовательности ДНК информации. Причем чем сложнее последовательность, т. е. больше ее информационная емкость, тем скорость матричного синтеза (воспроизведения) выше. Правда, в этой же работе В. Эбелинг [7] выявляет и недостатки длинных цепочек, связанные

с возрастанием вероятности неточного копирования и разрушения структуры вследствие увеличения возможности мутации.

В то же время экспериментальные наблюдения кинетики ренатурации денатурированной ДНК указывают на уменьшение скорости формирования отдельных комплементарных цепей при образовании интактной двойной спирали из более разнообразных последовательностей большей сложности, на основании чего делаются выводы о том, что "скорость молекул ДНК количественно отражает степень разнообразия последовательностей и быстро ренатурирующая фракция состоит из молекул ДНК, повторяющихся в геноме тысячи раз". В литературе также приводятся результаты экспериментов Сола Спигелмана по моделированию "эволюции в пробирке" и обращается внимание на тот факт, что в условиях жестких временных ограничений процесса синтеза РНК имеет место отбор цепей РНК значительно меньшей длины, чем у исходной. Попытки моделирования связи между устойчивостью и сложностью биологических систем также не дают однозначного ответа.

Развивая общий подход к теории матричного синтеза применительно к объектам различной природы, в том числе и рассматривая в рамках терминологии Г. И. Дистлера [8] "кристаллизацию как матричный репликационный процесс", отметим, что детерминированность преобразований на поверхности матрицы определяется:

- видом и степенью упорядочения структуры;
- пространственными масштабами упорядочения и корреляции;
- временными масштабами упорядочения и корреляции;
- энергетическими параметрами структуры и внешних воздействий;
- предысторией базиса, т. е. его "опытом" или "памятью".

Известно, что для отображения реального процесса в объектах живой и неживой природы необходимо учитывать следующие его характеристики: материально-энергетические, информационные, пространственные и диахронические (временные). При этом по отношению к информационным характеристикам обращает на себя внимание положение, сформулированное в работе Ю. Г. Марковым [9]: "В самом информационном воздействии важна не величина передаваемой энергии (без которой немислимы вообще никакие воздействия), а пространственно-временная структура воздействующего материального носителя энергии".

Отметим, что, несмотря на известную биологичность термина "матричная репликация", данное понятие получило наиболее формализованное развитие именно в условиях твердого тела.

Достаточно общие подходы к проблеме упорядочения на матрице были сформулированы при решении задач эпитакии [10] и топотаксии в рамках теории симметрии с использованием законов компенсации симметрии, из которых следует, что

физические системы проявляют тенденцию компенсировать диссимметризацию на одном уровне структуры симметризацией на другом [11].

В работе [12] показано, что взаимная кристаллографическая ориентация эпитаксиальной пленки и подложки должна быть такой, чтобы удовлетворять условию: "двумерная точечная группа симметрии поверхности кристалла-подложки является подгруппой двумерной точечной группы симметрии контактирующих поверхностей и слоя". В работе [13] статические структурно-кристаллические и геометрические критерии соответствия были дополнены для гомоморфной границы раздела фаз (являющейся результатом встраивания кристаллической решетки формируемого слоя в решетку матрицы) правилом соответствия нормированных объемов, в рамках которого учитываются связи атомов кристаллической ячейки с соседями. Нормированный объем — это объем элементарной кристаллической ячейки, отнесенный к числу ее связей с соседями в кристалле. Для "залечивания" границы раздела фаз предполагается введение определенного типа ионов, что связано с разностью нормированных объемов матрицы и встроенной фазы. Фактически в данном случае имеет место учет не только симметричных законов сохранения, но и энергетической устойчивости системы.

С энергетических позиций процесс "молекулярного узнавания" трактуется и в биологической работе [14]. Отмечается, что благоприятные конформации, или состояния молекул, соответствуют минимуму свободных энергий, а ошибки при молекулярных взаимодействиях, как правило, носят случайный характер.

С этим можно согласиться, если фактически минимизировать структурирующую роль внешней среды и не рассматривать процесс матричной репликации с позиций адаптивного синтеза. Воспроизведение структуры на стадии роста подразумевает упорядочение кристаллизационной среды в потенциальных полях субстрата, практически это считывание структурной информации матрицы. Образовавшаяся кристаллическая форма может быть воспроизведена лишь в определенных пределах устойчивости, когда исходная информационная матрица способна к самовосстановлению в условиях генерации ошибок, вследствие неполноты упорядочения или примесного сбоя. Если ошибка станет источником нового структурного кода, который производит более устойчивый для данных условий тип структуры, то происходит смена информационной матрицы.

Конкурентная ситуация (отбор, селекция) в таких системах может возникнуть при условии ограничений, накладываемых на сырье [6], необходимое для автокаталитического процесса синтеза, протекающего по матричному принципу. Вынужденный отбор приводит к тому, что среди конкурирующих структур побеждает та, которая в течение определенного промежутка времени наилучшим образом приспосабливается к данной ситуации. В случае неорганической природы отбор

Таблица 2

Матрица как активный адаптивный кодирующий субстрат

Свойства матрицы	
- материальные (вещественные) - энергетические - информационные - пространственные - диахронические (временные)	
Тип матрицы	
- пассивная - активная	- изоморфная - комплементарная
Способы кодирования	
структурный код	- ориентация - пространственная группа - точечная группа - параметры решетки - структурное состояние - дефекты: точечные и протяженные
химический код	- вид атомов, молекул, радикалов - тип химической связи - чистота поверхности
энергетический код	- электрическое поле - магнитное поле - акустическое поле - оптическое и тепловое излучение
топологический код	- латеральное разрешение - характер кодирования: тотальный и локальный
диахронический код	- статика - динамика - частота - ритм

сводится к реализации возможностей (состояний, структур), изначально заложенных в системе, так как она не способна к мутациям и развитию (эволюция в узком смысле слова).

Автор известной теории самоорганизации материи М. Эйген [5] при оценке конкурентоспособности компонента использует понятие "селективная ценность": $W_i = A_i Q_i - D_i$, определяя ее через кинетические параметры системы — скорость образования i -последовательности ($A_i Q_i$) и скорость ее разрушения (D_i), где A_i — фактор усиления; Q_i — фактор качества. Последний фактор играет в отборе исключительно значимую роль, так как он характеризует достоверность копирования исходной матрицы. Совершенно очевидно, что существуют объективные факторы, ограничивающие размеры последовательности, которая может быть воспроизведена достоверно, без ошибок. Отметим также, что для ранее оговоренных условий устойчивость структуры и направления "эволюции", в первую очередь, будут определяться не термодинамическими, а кинетическими факторами. Табл. 2 отражает современное представление о матрице как активном структурно-топологическом и функциональном субстрате.

Время как определяющий фактор в управлении процессами структурообразования

В рамках современных представлений *"структура есть устойчивая выделенность дискретных частей системы как целого и фаз или стадий, процессов ее изменения и развития, а также устойчивая*

системная упорядоченность, определенный строй всей совокупности связей, отношений и взаимодействий между этими частями, фазами и стадиями" [15]. Тогда, учитывая, что всякая конкретная форма материи ограничена и переходящая во времени, динамику любой системы можно рассматривать как развитие и взаимопреобразование ее структур, т. е. через пространственно-временной полиморфизм. Он проявляется в виде возможностей "пространства" системы, определяемого в рамках той или иной его параметрической формализации [16] совокупностью доступных системе состояний.

Открытость и неравновесность системы при синтезе (как необходимое условие ее возникновения) создает предпосылки к развитому пространственно-временному полиморфизму системы и одновременно, с учетом внутренних факторов, ограничивает пространство ее возможностей.

В качестве наиболее существенного внешнего, ограничивающего структурное и химическое многообразие фактора в случае гетерогенного упорядочения выступает субстрат, на котором происходит процесс структурообразования, а для гомогенно зарождающихся систем — степень неравновесности процесса (например, пересыщение), определяющая, фактически, скорость доставки и количество вещества в зоне синтеза.

Как в первом, так и во втором случаях классические термодинамические функции неэффективны при прогнозировании возникновения той или иной структурно-морфологической модификации. Переход к неравновесной термодинамике в случае открытых систем требует для прогнозирования устойчивости введения такого параметра, как **производство энтропии**, т. е. изменения упорядоченности во времени. При этом следует обратить внимание на тот факт, что **"пространственное структурообразование требует времени"** [17], и структурно-морфологические особенности синтезируемого объекта будут находиться в определенной зависимости от соотношения времен, условно называемого "лабораторного", т. е. определяемого внешними условиями синтеза (например, скоростью поступления вещества на поверхность субстрата), и "функционального", т. е. времени, необходимого для развития процессов упорядочения, определяемого миграцией частиц, диссипацией энергии, структурными релаксациями различного уровня. Эффективность данного подхода была продемонстрирована нами [18] при разработке и практической реализации концепции управляемого синтеза наноструктур, применительно к естественным сверхрешеткам наиболее структурно многообразного (при единстве основного химического состава) классического политипного (одноосный полиморфизм) материала карбида кремния.

Далее будут изложены представления о том, что при неравновесном и матричном синтезе нанопорядоченных материалов **эффективным является подход, основанный на особой информативности времени и временных отношений в управлении процессами структурообразования.**

Для открытых систем эволюция структуры есть результат неустойчивости, обусловленной потоками вещества и энергии от внешней среды. Реакцией на искусственно созданное неравновесное состояние является релаксация со спонтанным возникновением новых пространственно-временных структур. Для неравновесных систем, находящихся за пределами устойчивости, оставаясь в рамках классической термодинамической теории, невозможно предсказать возникновение определенного нового вида упорядоченности, поскольку эволюция системы происходит при наличии значительных внешних возмущений, связанных с процессами тепло- и массообмена. В рамках ранее сформулированных представлений можно предположить, что образовавшаяся структура имеет предел устойчивости по воспроизведению, когда ее матрица способна к самовосстановлению при генерации "ошибок" внешней средой. Если ошибка становится источником нового структурного кода, который определяет более устойчивую для данных условий синтеза структуру, должна происходить ее смена.

Поскольку каждой пространственной структуре, построение которой в вероятностной трактовке может быть рассмотрено с позиции проб и ошибок, присуще характерное время ее организации, т. е. упорядочения (τ_i структурное), то в условиях движущей силы упорядочения F_i , подвижности процессов упорядочения μ_i и характеристического пространственного периода структуры λ_i она воспроизводится, если время потери подвижности частиц (τ_s) в результате их встраивания в растущий объем больше необходимого времени упорядочения:

$$\tau_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i F_i}, \tau_i < \tau_s.$$

При обратном знаке неравенства получаем критерий смены исходной пространственной структуры с образованием структур меньшим периодом трансляции. Таким образом, **условием разрушения (изменения) исходной пространственной периодичности структуры является меньшее значение реализуемого времени упорядочения, определяемого скоростью синтеза по сравнению с необходимым для аккомодации в требуемую структуру** [19].

Следует обратить внимание, что организация структур может происходить как вследствие диффузных процессов путем коррелированных блужданий частиц в поле потенциальных сил, так и вследствие образования конкретной "архитектуры" связей бездиффузионным способом. Под подвижностью следует понимать среднюю скорость дрейфа аккомодирующей частицы или среднюю скорость организации связей на единичную упорядоченную силу.

В рамках предложенной модели "временной устойчивости" структуры с меньшим пространственным периодом возможны в условиях использования высоких скоростей кристаллизации или при переходе к средам, где имеет место невысокая подвижность частиц в процессе упорядочения. Обсуж-

дение параметра D в представлениях о коэффициенте диффузии показывает, что уплотнение среды эквивалентно увеличению энергии процесса "блуждания" частиц, связанного с их переносом через потенциальный барьер. Интенсификация данного процесса обеспечивается за счет увеличения кинетической энергии мигрирующих частиц, что имеет место, например, при повышении температуры. В рамках модельных представлений высокие температуры синтеза должны способствовать возникновению длиннопериодных структур, поскольку в этих условиях упорядочение характеризуется эффективным протеканием миграционных процессов.

Изменения свойств кристаллизационной среды, связанные с ее "уплотнением", например за счет роста пересыщения, ограничивают возможность развития длиннопериодных модификаций.

Неравновесный термодинамический подход к процессам структурообразования

Больцмановский принцип упорядочения недостаточен для понимания механизма образования дальнего порядка в веществах, способных к существованию в виде множества структурно устойчивых состояний, между которыми разница в свободных энергиях и энтропиях незначительна.

Преимущество термодинамического подхода к рассмотрению проблемы возникновения упорядоченности заключается в возможности восстановления непосредственной связи между физической природой кооперативных явлений, имеющих место при организации структуры, и микроскопическими параметрами, позволяющими управлять технологическим процессом. Поэтому данный раздел посвящен термодинамическому анализу проблемы упорядочения сверхструктур в условиях открытой неравновесной системы.

Для открытых систем в результате неустойчивости, обусловленной потоками вещества и энергии от внешней среды, возникает временная эволюция системы. Это требует введения в фундаментальное уравнение параметра "**время**". Поэтому в неравновесной термодинамике [20] вводится параметр полного производства энтропии, складывающегося из производства энтропии внутри системы, — $d_i S/dt$, и компоненты, обусловленной обменом с внешней средой, — $d_e S/dt$:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d_i S}{dt} + \frac{d_e S}{dt}.$$

Из вариационного принципа, основанного на минимизации производства энтропии внутри системы в стационарном состоянии, предложенного И. Пригожиным для открытых систем [20], вытекает, что основным параметром, характеризующим необратимые процессы, следует считать не энергию, а производство энтропии.

При изучении процессов структурного упорядочения может использоваться совокупность следующих положений:

- рост — неравновесный процесс, производство энтропии в котором направлено на понижение

структурной упорядоченности и увеличение дефектности синтезируемого материала;

- упорядочение в определенную структуру происходит за конечное время, необходимое для организации структурных элементов в соответствии с потенциальными полями.

Производство энтропии достигает в стационарных условиях своего минимального значения. При этом избыточная энтропия в стационарном режиме роста индивида $\Delta S'_{изб.j}$, рассчитанная на единицу площади поверхности, определяется исходя из баланса интенсивности производства энтропии dS/dt , являющегося следствием неравновесности роста и интенсивности стока энтропии, вызванного процессами упорядочения в потенциальных полях растущего индивида и протекающего за время упорядочения $\tau_{уп}$:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\Delta S'_{изб.j}}{\tau_{уп}}.$$

Последняя формула является следствием стационарности процесса упорядочения и, как уже отмечалось, выражает баланс между интенсивностью производства энтропии внутри системы и интенсивностью ее экспорта. Поскольку значение производства энтропии, являясь результатом необратимости процесса кристаллизации, одинаково при образовании различных структурно устойчивых состояний, имеющих равный химический потенциал, то избыточная энтропия данной структурной модификации j (при заданных условиях синтеза) определяется исходя из значения суммарного времени релаксации процесса упорядочения временем упорядочения определенной структуры j :

$$\tau_{уп.стр.j} = \sum \tau_{рел.l}$$

где $\tau_{рел.l}$ — время релаксации l -го процесса.

В интервал функционально необходимого времени упорядочения могут быть включены такие процессы, как адсорбция, аккомодация, насыщение связей, установление ближнего порядка, диффузия дефектов и примесей, структурная релаксация. Известно, что их временной диапазон варьируется в интервале от 10^{-13} до $10^2 \dots 10^3$ с.

Можно предположить, что активное обращение к наноразмерным объектам в отношении их прогонизируемого синтеза и изучения свойств потребует активизации научных исследований в области быстро протекающих процессов, в том числе на молекулярном уровне. Таким образом, освоение метрического нанодиапазона стимулирует исследовательскую и практическую направленность работ в гига- и терагерцовом диапазоне частот, в том числе для практического использования в информационно-коммуникационных, медико-диагностических, экологических и других направлениях, что может привести к революционным научно-техническим изменениям, подобным прорыву в нанобласти. Знание реальных механизмов образования (в пространстве и времени) и параметров молекулярных ансамблей, а также особенностей межфазных границ и их динамики позволит придать

предложенным моделям практическую силу. На данном этапе на основе экспериментальных исследований и оценки времени упорядочения естественных сверхструктур карбида кремния, протяженностью от единиц до десятков нанометров, в рамках рассмотренной неравновесной термодинамической модели было показано, что *для веществ, имеющих малые различия в свободных энергиях образования структур и высокие потенциальные барьеры между ними при ростовом кинетическом переходе в определенную структуру, выполняется постоянство критической избыточной энтропии, независимо от исходной структуры, а возрастание ее значения определяет эволюцию структуры в направлении уменьшения кратчайшего пространственного периода трансляции* [18].

Таким образом, показано, что возникновение в неравновесных условиях определенного вида структурной упорядоченности следует рассматривать как кинетический фазовый переход в форме адаптивного матричного синтеза с сопряженным протеканием двух процессов:

- матричного копирования (репликация), т. е. упорядочения в потенциальных полях матрицы-субстрата при гетерогенном синтезе;
- самоструктурирования в открытой системе с доминированием в качестве базовых переменных и критериев структурной селекции временных характеристик процесса упорядочения, а в качестве параметров неравновесной термодинамики, характеризующих структурные превращения: производства энтропии, т. е. изменения ее во времени; избыточную энтропию, определяющую упорядочение структуры в неравновесных условиях [21].

Заключение

По мнению многих исследователей, трудно ожидать, что при изучении объектов живой и неживой природы вновь будет установлен столь явный изоморфизм в механизмах воспроизведения, подобный процессу матричного синтеза. Принципиальным отличием естественных биосистем от искусственных остается протекание в них специфического биологического процесса — размножения, когда не просто увеличивается масса за счет "каталитических" процессов упорядочения на поверхности матрицы, а образуется "подобное" с "оттачиванием" последнего и его индивидуализацией [2].

Безусловно, желательно, чтобы при рассмотрении биосред как материаловедческого базиса искусственных систем максимально использовались присущие им специфические свойства на этапе как синтеза, так и функционирования. При этом нельзя игнорировать и утверждение о том, что "любая сложная целенаправленная система (в том числе и биологическая) является одновременно и физической, а следовательно, должна подчиняться и физическим законам" [9].

В реальных системах матричный синтез носит адаптивный характер, т. е. по существу отражает взаимодействие матрицы-субстрата и внешней (материнской) среды. Он несет в себе не только материальные элементы, необходимые для реплика-

ции, но и возмущения, могущие стать источником новой информации. Возможны изменения самообновляющейся матрицы через внешнее вещество-энергетическое и полевое воздействие, в том числе в связи с созданием условий для протекания спонтанных процессов в открытой системе, далекой от равновесия — самоорганизации.

Работа проводилась при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2012—2013 гг.: № ГС 14.В37.21.05.68, ГС 14.В37.21.07.93, а также в рамках программы стратегического развития университета (СПбГЭТУ "ЛЭТИ").

Список литературы

1. Лучинин В. В. Микро- и нанотехника. Технологии превосходства // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 12. С. 2—8.
2. Медников Б. М. Аксиомы биологии. М.: Знание, 1982. 136 с.
3. Шредингер Э. Что такое жизнь с точки зрения физика? М.: Атомиздат, 1972. 88 с.
4. Кольцов Н. К. Организация клетки. М.: Гостехиздат, 1936. 211 с.
5. Эйген М. Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул. М.: Мир, 1973. 260 с.
6. Шноль С. Э. Физико-химические факторы биологической эволюции. М.: Наука, 1979. 261 с.
7. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. М.: Мир, 1979. 256 с.

8. Дистлер Г. И. Информационная структура твердых тел как определяющий фактор гетерогенных процессов // Активная поверхность твердых тел. М.: ИКАН, 1976. С. 96—105.

9. Марков Ю. Г. Функциональный подход в современном научном познании. Новосибирск: Наука, 1982. 255 с.

10. Александров Л. Н. Переходные области эпитаксиальных полупроводниковых пленок. Новосибирск: Наука, 1978. 272 с.

11. Шубников А. В., Копчик В. А. Симметрия в науке и искусстве. М.: Наука, 1972. 400 с.

12. Ефимов А. Н. Дефекты, возникающие при самоформировании эпитаксиального слоя на неизоморфной подложке // Тезисы докладов I Всесоюзной конференции "Автоматизация, интенсификация, интеграция процессов технологии микроэлектроники". Ч. 2. Л.: ЛЭТИ, 1989. С. 111—112.

13. Емельянов А. В., Портнов С. М. Принцип объемно-структурного соответствия фаз и формирование элементов в микро- и нанoeлектронике. // Электронная промышленность. 1994. В. 7—8. С. 54—59.

14. Албертс Б., Льюис Дж., Рэфф М. и др. Молекулярная биология клетки. Т. 1. М.: Мир, 1994. 509 с.

15. Кремянский В. И. Структурные уровни живой материи. М.: Наука, 1969. 288 с.

16. Заварзин Г. А. Фенотипическая систематика бактерий: пространство логических возможностей. М.: Наука, 1974. 211 с.

17. Лучинин В. В. Пространственно-временной полиморфизм и временная организация биологических систем // Труды Ленинградского общества естествознавателей. 1988. Т. 87, вып. 1. С. 22—35.

18. Кальнин А. А., Лучинин В. В., Нойберт Ф., Таиров Ю. М. Закономерность эволюции кристаллической структуры при синтезе веществ, обладающих множеством структурно-устойчивых состояний // ЖТФ. 1984. Т. 54, вып. 7. С. 1388—1390.

19. Лучинин В. В. Проблемы интеграции микро- и биотехнологии // Петербургский журнал электроники. 1996. Вып. 1. С. 9—21.

20. Николис Г., Пригожин Н. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. 477 с.

21. Тердислов В. А., Сидорова А. Э., Яковенко Л. В. Биофизическая экология. М.: Красанд, 2012. 544 с.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 621.315.592

К. Г. Гареев, аспирант,
e-mail: ky gareev@rambler.ru,
И. Е. Грачева, канд. физ.-мат. наук, доц.,
В. А. Мошников, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет "ЛЭТИ"
(СПбГЭТУ)

ЗОЛЬ-ГЕЛЬ-ТЕХНОЛОГИИ НАПРАВЛЕННОГО СИНТЕЗА НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ МАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ В ПОРАХ ИЗОЛИРУЮЩЕЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ

Поступила в редакцию 20.09.2012

Рассмотрены особенности магнитных свойств нанокomпозитов и перспективы развития технологических приемов формирования магнитных нанокomпозитов, совместимых с операциями создания устройств нано- и микросистемной техники.

Золь-гель-методом получены магнитные нанокomпозиты с образованием ферритовой нанofазы с иерархической структурой. Проведен комплексный анализ слоев нанокomпозитов в системах Fe—Ni—O—Si и Fe—Mn—O—Si с использованием методов тепловой десорбции, атомно-силовой микроскопии, дифракции быстрых электронов и вибрационной магнитометрии.

Ключевые слова: магнитные наноматериалы, ферриты, иерархическая структура, золь-гель-технология

Введение

Исследование свойств вещества, находящегося в наноразмерном состоянии, вызывает повышенный интерес и имеет большое значение как для развития фундаментальной науки, так и для практического применения таких наноматериалов в устройствах нано- и микросистемной техники [1]. Уменьшение характерных размеров частиц до значений, соответствующих длине волны де Бройля в твердом теле, приводит к квантованию энергетических уровней и сильному изменению поляризуемости частиц. Происходящее при этом возрастание роли релаксации поверхностных атомов сопровождается изменением электронной структуры

точечных дефектов. При уменьшении диаметра частиц отношение площадей их поверхностей к внутреннему объему повышается, растет доля поверхностных атомов. Это приводит к изменению условий фазовых равновесий, уменьшению температур плавления, к изменению пределов растворимости, к сдвигу фононного спектра в область коротких длин волн, к изменению каталитических свойств, образованию нанофаз и другим эффектам. Это предопределяет принципиальные возможности создания новых наноматериалов с уникальными физико-химическими свойствами, среди которых безусловный интерес представляют магнитные наноконкомпозиты [2].

Актуальными проблемами синтеза магнитных наноконкомпозитов являются задачи обеспечения стабильности, равномерной плотности и однородности наночастиц. Агрегация наночастиц, вызванная их высокой активностью, представляет острую проблему для исследователей. Не всегда капсулирование наночастиц в полимерные оболочки является оптимальным технологическим решением [3]. Среди вариантов стабилизации наночастиц, помимо внедрения их в объем полимерной матрицы, разрабатываются способы фиксации их на поверхности микроносителей, в этом случае частицы остаются доступными для реагентов извне и сохраняют основные физические характеристики [3]. Применение магнитных наночастиц в биологии и медицине, например, в качестве "наномаркеров", а также магнито-контрастных веществ при проведении магнитно-резонансной томографии [4–10] дополняется системами детектирования полей и определения положения в пространстве [11, 12]. Принцип действия подобных сенсоров позволяет отнести их к классу МЭМС, конструктивно они подобны датчикам давления и ускорения, приведенным, например, в работах [13, 14].

По функциональному назначению традиционно принято классифицировать магнитные материалы на магнитотвердые, магнитомягкие, магнитострикционные, магнитооптические и термомагнитные материалы. Но все чаще при характеристике магнитных наноконкомпозитов необходимо более глубокое изучение механизмов магнитного упорядочения, классификация которых включает микромагнетики, метамгнетики, асперомагнетики, гелимагнетики, сперимагнетики, сперомагнетики, спиновое стекло, кластерное стекло и др. Влияние аморфизации и неупорядоченности атомных магнитных моментов, а также роли обменных взаимодействий возрастают в наноконкомпозитах. Детальное рассмотрение этих вопросов выходит за рамки этой статьи, но отметим, что в обзоре [15] были систематизированы 14 разных типов магнитного упорядочения.

Одним из интересных новых классов магнитных материалов являются микромагнетики (micromagnets), или кластерные стекла, представляющие собой нестехиометрические соединения, содержащие хотя бы один ферромагнитный компонент. И из-за флуктуаций концентрации возможно появление магнитных кластеров — областей, в которых преобладают ферромагнитные взаимодействия между ато-

мами. Кластерные стекла отличаются высокой чувствительностью к условиям приготовления и последующей термообработки. Для них характерен заметный температурный и магнитный гистерезис, большая остаточная намагниченность, другие эффекты необратимости магнитных свойств [16].

Сопоставление свойств наночастиц и массивных материалов демонстрирует возможность получения значительно больших значений намагниченности на атом и магнитной анизотропии, а значения температур Кюри и Нееля могут различаться на сотни градусов. Возможность направленно менять форму, размер, состав и строение наночастиц в наноконкомпозитах позволяет управлять магнитными характеристиками конечного материала. Таким образом, наноконкомпозитные материалы перспективны для применения в системах записи и хранения информации нового поколения, для создания новых постоянных магнитов, в системах магнитного охлаждения, в качестве магнитных сенсоров и т. п.

Целью работы являлись разработка методик направленного золь-гель-синтеза наноконкомпозитов на основе наноразмерных металлооксидных частиц, распределенных внутри сетчатых структур из диоксида кремния с иерархией пор. При достижении поставленной цели обеспечивается изоляция магнитных наночастиц внутри трехмерной сетки диоксида кремния, которая также хорошо совместима с кремниевыми и стеклянными подложками и образует прочный адгезионный контакт. Дополнительным достоинством развиваемых методик представляется возможность выполнения технологических операций с локальностью, необходимой для устройств микросистемной техники.

Наноматериалы с иерархической структурой

На современном этапе ведущие научные школы в области материаловедения микро- и наносистем интенсивно изучают возможности применения не только процессов совместной самосборки и направленной самосборки [17, 18] для создания наноматериалов, но и процессов иерархической самосборки. В последние годы активно проводятся фундаментальные и практические исследования по разработке новых функциональных иерархических материалов [19–22]. В научной литературе этот подход все чаще называют модулярным принципом материаловедения.

Иерархическая архитектура функционального материала позволяет в рамках единой технологической платформы создавать материалы с большим разнообразием новых "полезных" характеристик, управляя составом или строением субструктур на одном или нескольких уровнях иерархической архитектуры. В настоящее время уже имеются несколько примеров искусственных функциональных иерархических материалов, как пленочных, так и объемных. Возрастание доли материалов, получаемых по технологиям "снизу-вверх", несомненно, приведет к тому, что материалы именно такой архитектуры придут на смену современным синтетическим функциональным материалам.

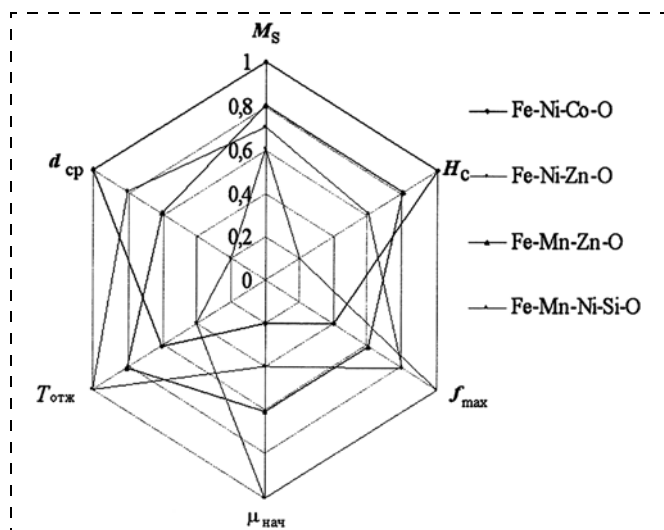


Рис. 1. Сравнение характеристик материалов на основе различных ферритовых систем

Материалы, содержащие системы пор разного размера, представляют большой интерес (как нанореакторы с разной ролью капиллярных явлений, с эффективными каналами доставки и отвода продуктов реакций, с модифицированными адсорбционными центрами, с ионногенными функциональными группами и др.).

Следует отметить, что в существующую классификацию пор по ИЮПАК (микропоры, мезопоры, макропоры) положены особенности адсорбции, десорбции водяных паров в зависимости от размеров пор. В макропорах (размер более 50 нм) происходит обратимая моно- и полимолекулярная адсорбция подобно наблюдаемой в макротелах, в мезопорах (с размерами 2...50 нм) существенную роль играет капиллярная конденсация. В микропорах (размер менее 2 нм) происходит объемная конденсация.

Актуальными и научно значимыми являются исследования объектов с иерархической пористой структурой, образуемых путем самосборки в золь-гель-процессах. Управляя составом или строением субструктур в условиях иерархической самосборки золь-гель-процессов на одном или нескольких уровнях иерархической архитектуры, возможно создать магнитные наноконпозиционные материалы с заданными свойствами, существенно отличающимися от присущих объемному материалу (рис. 1). В частности, при возможном некотором снижении удельного магнитного момента M_s подобные наноконпозиции характеризуются повышенными предельными частотами f_{max} , высокой начальной магнитной проницаемостью $\mu_{нач}$, малой коэрцитивной силой H_c и позволяют существенно снизить температуру синтеза.

Золь-гель-синтез магнитных наноматериалов с иерархической структурой

В зависимости от различных экспериментальных факторов (значение температуры, состав прекурсоров, катализаторов, добавок и др.) образова-

ние и эволюция структуры в золь-гель-процессах протекают совершенно различными путями. Для углубленного понимания сущности процессов развиваются старые и предлагаются новые модели роста и эволюции. На этапе образования и созревания золя наиболее плодотворными являются модели диффузионного-лимитированного роста и кластер-кластерной агрегации [23, 24]. При этом фрактальности первичных элементов существенно зависят от параметра pH и при достижении определенных размеров частицы приобретают вид глобул. Самосборка глобул происходит по схематично описанной модели кластер-кластер или другими более усложненными моделями. В наноконпозициях могут существовать одновременно фракталы нескольких видов, расшифровка которых требует развития специальных методик, в частности, результаты малоуглового рассеяния интерпретируются в работах Г. Бьюкейджа [25, 26]. Далее при формировании структуры в наноконпозициях на основе фаз с различными свойствами широко используются модели теории перколяции. При отжиге происходит синерезис. Неорганические полимеры в сложных системах могут сопровождаться спинодальным распадом подобно модели Флори—Хаггинса, широко известной в физике полимеров [27, 28]. Наконец, рассмотрение реальных структур требует использования модели микрофазного разделения [29], которое реализуется в различных локальных частях объекта. Нужно отметить, что в золь-гель-процессах свойства структур композитов предопределяются процессами формирования и эволюции фрактальных агрегатов, происходящих на стадии приготовления растворов-золей, а также условиями спинодального распада, происходящего в процессе нанесения золя на поверхность подложки и термической обработки структур.

В работе исходные компоненты, использованные для приготовления золей, представляли собой легко гидролизующиеся соединения, которые в результате взаимодействия с водой образовывали полимолекулы или полисольватированные группы. Для получения пленочных наноструктур на основе диоксида кремния был выбран представитель алкоксисоединений этиловый эфир ортокремневой кислоты (ТЭОС, $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$). Растворы ТЭОС обуславливали пленкообразующие качества и способность к растеканию по поверхности подложек. Возможно проведение реакций гидролиза и поликонденсации ТЭОС в присутствии источников металлооксидов в виде солей, что существенно расширяет возможности метода получения многокомпонентных оксидных материалов на основе диоксида кремния. В работе в качестве источников металлооксидов были выбраны неорганические соли железа ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), никеля ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), кобальта ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), марганца ($\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), цинка (ZnCl_2) и эрбия ($\text{Er}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

Приготовленные золи наносили на поверхности кремниевых подложек, предварительно обработанных в ацетоне, спирте и деионизированной воде под воздействием ультразвука, распределяли с по-

мощью центрифуги (3000 мин^{-1}) и подвергали термической обработке при температурах от 600 до 1000 °С. Порошки ксерогелей получали из золей. Перевод золей в гелеобразное состояние осуществлялся путем введения водного раствора аммиака. Полученные влажные гели подвергали предварительной сушке при комнатной температуре в течение 100...150 ч. Технологический процесс завершали сушка при 100 °С и отжиг при температурах от 600 до 1100 °С.

Исследование механизмов образования магнитных наноматериалов в ходе золь-гель-процесса

Формируемые на поверхности подложек гели можно представить как системы фрактальных объектов, образующих каркас будущей сетки. При этом ухудшаются реологические свойства и происходит частичная иммобилизация растворителей в ячейках этих сеток на уровне малых систем (элементарных ячеек гелей). Для этих иммобилизованных фаз отсутствует внешняя макроскопическая текучесть, тогда как внутри ячеек массоперенос молекул растворителей протекает почти так же легко, как в золях с такой же концентрацией. Механизм подобных процессов хорошо изучен в физике органических полимеров [24]. Кинетические явления при распаде полимерных растворов имеют значительно более сложный характер, чем типичные явления при распаде полупроводниковых твердых растворов. Поэтому отметим особенности этих явлений более подробно. Несмотря на наличие сеток гели неорганических полимеров являются типичными системами, фазовые диаграммы которых похожи на обычные диаграммы полимер—растворитель.

При созревании полимерных растворов (золей) изменяется поляризуемость полимеров. Это дополнительно приводит к возрастанию энтальпии смешения $\Delta H_{\text{см}}$. Система перестает быть термодинамически устойчивой при положительных значениях функции свободной энергии смешения $\Delta G_{\text{см}}$. Фазовые диаграммы смеси двух неорганических полимеров могут иметь как верхнюю, так и нижнюю критическую температуру смешения, предсказанную теорией Флори—Хаггинса [27, 28]. Смещение взаимно нерастворимых полимеров приводит к образованию гетерофазной системы, т. е. дисперсии одного полимера в матрице другого.

Исследования морфологии полученных золь-гель-методом пленочных магнитных наноматериалов проводились с применением "полуконтактной" колебательной методики атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью нанолaborатории *Ntegra Terra*. По результатам проведенных экспериментов выявлено, что увеличение температуры отжига наноматериалов системы Fe—Er—O—Si от 600 до 1000 °С приводит к изменению механизма образования гетерофазной системы, сферические образования, сформированные при нуклеофильном росте, сменяются перколяционными иерархическими сет-

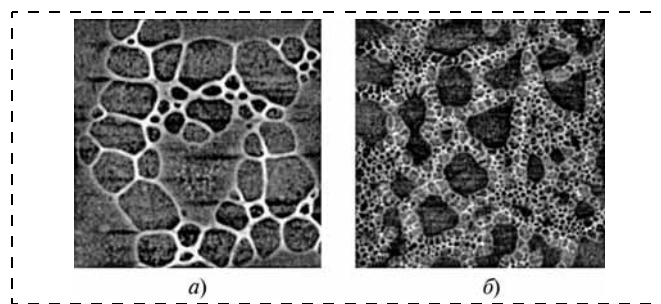


Рис. 2. АСМ-изображение слоя на основе системы Fe—Er—Si—O, $T_{\text{отж}} = 1000 \text{ °С}$, размер области сканирования:

а — $5 \times 5 \text{ мкм}$; б — $50 \times 50 \text{ мкм}$

чатыми структурами, сформированными в условиях спинодального распада (рис. 2).

В работе проведено исследование влияния времени выдержки золя на морфологию нанокомпозигов. По мере увеличения времени выдержки золя происходит рост фрактальных агрегатов, при этом средний молекулярный вес полимеризующихся веществ в растворе возрастает. Выявлено, что молекулярно-массовое распределение неорганических полимерных цепей в золе оказывает значительное влияние на надмолекулярную структуру нанокомпозигов. Показано, что чем длиннее полимерные цепи в золе, тем более сильная наблюдается тенденция к спинодальному распаду.

Установлено, что при температуре отжига нанокомпозигов 600 °С увеличение времени выдержки золей на 96 ч приводит к эволюции сферических образований в корпускулярно-пористую систему (рис. 3), в которой порами являются также промежутки между сферическими структурами.

При температуре отжига нанокомпозигов 1000 °С увеличение времени выдержки золей на 96 ч приводит к смене иерархических пористых структур (см. рис. 2) макропористыми объектами, представляющими сферические образования, соединенные через сетку (рис. 4).

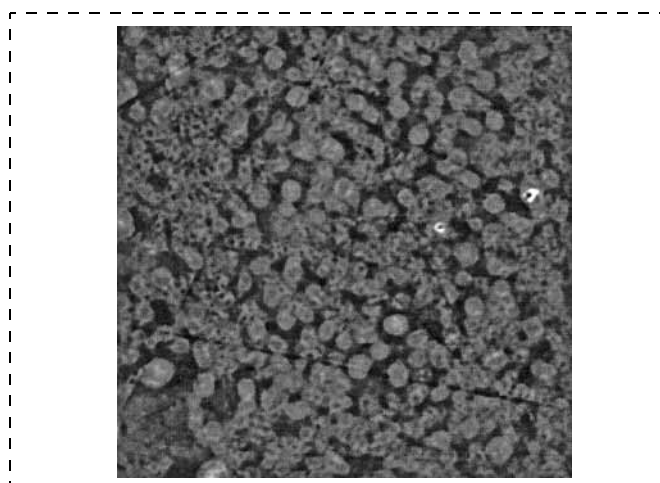


Рис. 3. АСМ-изображение слоя на основе системы Fe—Er—Si—O, $T_{\text{отж}} = 600 \text{ °С}$, 96 ч

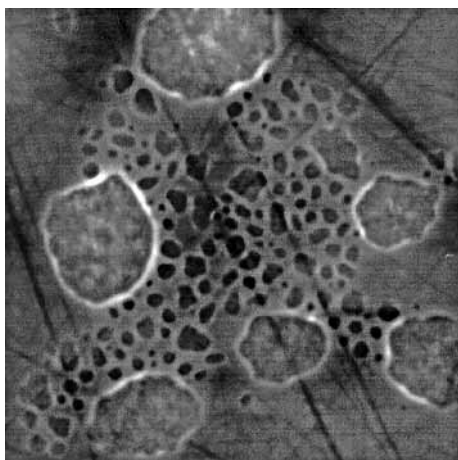


Рис. 4. АСМ-изображение слоя на основе системы Fe—Er—Si—O, $T_{\text{отж}} = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, 96 ч

Анализ структуры и магнитных свойств нанокompозитов

В микропорах потенциал адсорбции повышен из-за сложения дисперсионных потенциалов близко расположенных стенок пор, что приводит к повышению теплоты адсорбции и заполнению таких пор при малых относительных давлениях [30]. Далее адсорбция продолжается в мезо- и макропорах по механизмам полимолекулярной адсорбции, затем в мезопорах начинается капиллярная конденсация при продолжающейся полимолекулярной адсорбции в крупных мезо- и макропорах. После предельного заполнения мезопор продолжается лишь полимолекулярная адсорбция на поверхности макропор. Выявлено, что для исследуемых в работе систем характерны изотермы IV типа по классификации Брунауэра, Деминга, Теллера (рис. 5). Это позволяет оценить распределение пор по размерам и определить емкость монослоя (количество адсорбата, которое может разместиться в полностью заполненном адсорбционном монослое на

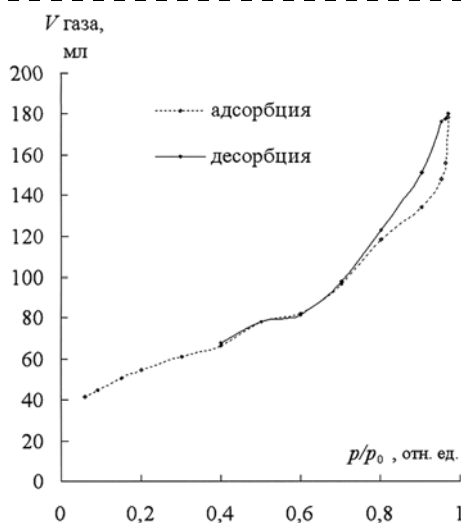


Рис. 5. График полной изотермы адсорбции и десорбции для образца системы Fe—Ni—Si—O, $T_{\text{отж}} = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$

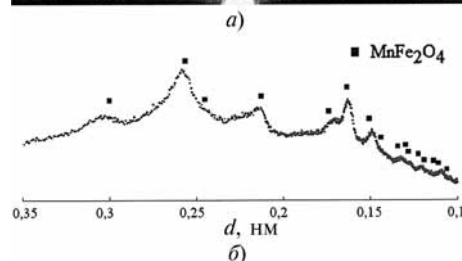
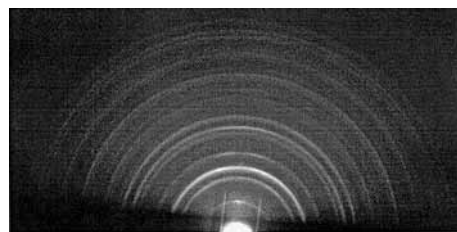


Рис. 6. Картина дифракции быстрых электронов от слоя на основе системы Fe—Mn—O—Si (a) и ее расшифровка (б)

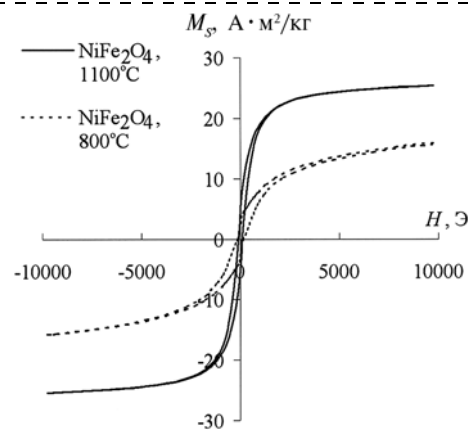


Рис. 7. Зависимости удельного магнитного момента от напряженности магнитного поля для образцов на основе системы Fe—Ni—O, отожженных при температурах 800 и 1100 $^{\circ}\text{C}$

поверхности единицы массы твердого тела) этого образца, которую можно использовать для вычисления его удельной поверхности.

Диаграммы распределения относительного объема пор по их радиусу свидетельствуют о том, что основной вклад в площадь удельной поверхности образцов вносят микропоры с размером менее 2 нм. Доля микропор составляет до 50 % от общего объема.

Анализ кристаллической структуры пленочных образцов проводился с помощью электронографа малоуглового регистрирующего ЭМР-102. Результаты исследований свидетельствуют, что после температурной обработки при 1000 $^{\circ}\text{C}$ пленочных образцов на основе системы Fe—Ni—O—Si, Fe—Mn—O—Si происходит формирование простых ферритов. На рис. 6 приведены результаты анализа фазового состава пленки системы $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{—Mn}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$, $T_{\text{отж}} = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, методом дифракции быстрых электронов.

Снятие петель перемагничивания на низкой частоте проводилось с помощью вибрационного магнитометра VSM7400 фирмы LakeShore. В работе было исследовано влияние среднеокисляемого состава $((\text{Fe}_x\text{Ni}_y\text{Co}_{1-x-y}))$, где $x, y, 1 - x - y =$

мольные доли окисляемых элементов (железа, никеля, кобальта соответственно)) и температуры отжига нанокмполитов на магнитные свойства образцов. На рис. 7 приведены петли перемагничивания образцов состава $\text{Fe}_{0,66}\text{Ni}_{0,34}$, отожженных при температуре 800 и 1100 °С. Значение коэрцитивной силы H_{ci} составило около 100 Э, а удельный магнитный момент M_S — 25 А · м²/кг.

Заключение

Золь-гель-процессы полимеризации и поликонденсации, протекающие в гетерофазных системах, приводят к образованию иерархических структур. Сочетание механизмов структурообразования приводит к многообразию магнитных форм упорядочения. Выбранная технология позволила достичь сопоставимых с промышленными образцами значений намагниченности насыщения, при этом благодаря проявлению суперпарамагнитного эффекта [15] удается существенно снизить коэрцитивную силу, а значит, и потери на гистерезис. Данный результат, наряду с технологической совместимостью процесса нанесения золь-гель-покрытия дает возможность применения исследуемых нанокмполитов в микроминиатюрных устройствах СВЧ техники.

Работы проводились в рамках реализации Программы стратегического развития СПбГЭТУ "ЛЭТИ" на 2012-2016 годы и ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 годы при выполнении государственного контракта П1249 от 07.06.2010, а также Программы стратегического развития университета (СПбГЭТУ "ЛЭТИ") "Развитие междисциплинарных исследований и инструментально-технологической базы как основа непрерывного инженерного образования по приоритетным направлениям российской экономики" на 2012—2016 годы.

Список литературы

1. Климов Д. М., Васильев А. А., Лучинин В. В., Мальцев П. П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Нано- и микросистемная техника. 1999. № 1. С. 3—6.
2. Юрков Г. Ю. Введение в химию и физику наноразмерных объектов / Кособудский И. Д., Ушаков Н. М., Юрков Г. Ю. Саратов: СГТУ, 2007. 182 с.
3. Юрков Г. Ю. Физическая химия наноразмерных объектов: композиционные материалы / И. Д. Кособудский, В. В. Симаков, Н. М. Ушаков, Г. Ю. Юрков. Саратов: СГТУ, 2009. 230 с.
4. Наночастицы кобальтового феррита на основе мезопористого диоксида кремния / С. В. Комогорцев, Т. Н. Патрушева, Д. А. Балаев и др. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, Вып. 19. С. 6—11.
5. Microwave absorbing properties of magnesium-substituted MnZn ferrites prepared by citrate-EDTA complexing method / Song J., Wang L., Xu N. and Zhang Q. // J. Mater. Sci. Technol. 2010. Vol. 26 (9). P. 787—792.
6. Magnetic particle hyperthermia: nanoparticle magnetism and materials development for cancer therapy / Hergt R., Dutz S., Muller R., Zeisberger M. // J. Phys.: Condens. Matter. 2006. Vol. 18. P. 2919—2934.
7. The preparation of magnetic nanoparticles for applications in biomedicine / Tartaj P., Morales M. del P., Veintemillas-Verdaguer S. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. Vol. 36. P. 182—197.
8. Superparamagnetic gel as a novel material for electromagnetically induced hyperthermia / Babincova M., Leszczynska D., Sourivong P. et al. // J. of Magnetism and Magnetic Materials. 2001. Vol. 225. P. 109—112.
9. Synthesis of ferrite and nickel ferrite nanoparticles using radio-frequency thermal plasma torch / S. Son, M. Taheri, E. Carpenter, V. G. Harris, M. E. McHenry // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 91, N 10. P. 7589—7591.
10. Rao P. B. C., Setty S. P. Electrical properties of Ni—Zn nano ferrite particles // International Journal of Engineering Science and Technology. 2010. Vol. 2 (8). P. 3351—3354.
11. Herrera-May A. L., Aguilera-Cortés L. A., Garcera-Ramirez P. J., Manjarrez E. Resonant Magnetic Field Sensors Based On MEMS Technology // Sensors 2009, N 9. P. 7785 — 7813.
12. Dnaz-Michelena M. Small Magnetic Sensors for Space Applications // Sensors 2009, N 9. P. 2271—2288.
13. Лукьянов Д. П., Лучинин В. В., Скворцов В. Ю. Микроакселерометр на поверхностных акустических волнах // Нано- и микросистемная техника. 2001. № 2. С. 3—7.
14. Бохов О. С., Бройко А. П., Корляков А. В., Лучинин В. В. Микросенсор для контроля остаточного давления на основе периодического теплового режима // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 2. С. 14—17.
15. Херд К. М. Многообразие видов магнитного упорядочения в твердых телах // УФН. 1984. Т. 142. Вып. 2. С. 331—356.
16. Ракитин Ю. В., Калинин В. Т. Современная магнетохимия. СПб.: Наука, 1994.
17. Nanofabrication by self-assembly / G. A. Ozin, K. Hou, B. V. Lotsch et al. // Materials Today. May 2009. V. 12. N 5. P. 12—23.
18. Мошников В. А., Грачева И. Е., Пронин И. А. Исследование материалов на основе диоксида кремния в условиях кинетики самосборки и спинодального распада двух видов // Нанотехника. 2011. № 2. С. 46—54.
19. Hierarchical nanostructured semiconductor porous materials for gas sensors / V. A. Moshnikov, I. E. Gracheva, V. V. Kuznetsov et al. // Journal of Non-Crystalline Solids. 2010. V. 356, N 37—40. P. 2020—2025.
20. Nanostructured materials obtained under conditions of hierarchical self-assembly and modified by derivative forms of fullerenes / I. E. Gracheva, V. A. Moshnikov, E. V. Maraeva et al. // Journal of Non-Crystalline Solids. 2012. V. 358, N 2. С. 433—439.
21. Мошников В. А., Грачева И. Е., Аньчков М. Г. Исследование свойств наноматериалов с иерархической структурой, полученных золь-гель методом // Физика и химия стекла. 2011. Т. 37. № 5. С. 38—50.
22. Pat. US2010010513. Porous material having hierarchical porous structure and preparation method thereof, 14.01.2010.
23. Грачева И. Е., Максимов А. И., Мошников В. Д. Анализ особенностей строения фрактальных нанокмполитов на основе диоксида олова методами атомно-силовой микроскопии и рентгеновского фазового анализа // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. Вып. 10. С. 16—23.
24. Грачева И. Е., Мошников В. А. Анализ газочувствительных фрактальных структур на основе диоксида олова методом атомно-силовой микроскопии // Изв. Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ". 2008. № 5. С. 3—10.
25. Beaucage G. Approximation leading to a unified exponential / power-law approach to small-angle scattering // J. Appl. Cryst. 1995. V. 28. P. 717—728.
26. Beaucage G. Small-angle scattering from polymeric mass fractals of arbitrary mass-fractal dimension // J. Appl. Cryst. 1996. V. 29. P. 134—146.
27. Flory P. J. Principles of polymer chemistry. Ithaca, New York: Cornell University Press. 1953.
28. Гроссберг А. Ю., Хохлов А. Р. Статистическая физика макромолекул: учеб. руководство. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 344 с.
29. Розенберг Б. А. Микрофазовое разделение в отверждающихся многокомпонентных полимер-олигомерных системах // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева). 2001. Т. XLV. № 5—6. С. 23—31.
30. Карнаухов А. П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. Новосибирск: Наука, 1999. 469 с.

УДК 621.382, 621.389

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

ЧАСТОТНО-РЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ С ПОМОЩЬЮ НЕЛИНЕЙНОГО МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Поступила в редакцию 28.09.2012

Изложены основные принципы измерения механического воздействия частотно-резонансным методом с помощью нелинейного микромеханического преобразователя. Представлены условия, повышающие чувствительность нелинейного микромеханического преобразователя по перемещению и силе. Рассмотрен пример акселерометра на основе нелинейного преобразователя и проведена оптимизация его параметров.

Ключевые слова: МЭМС, микромеханический акселерометр, нелинейный микромеханический преобразователь, частотно-резонансный метод измерения

Введение

В настоящее время в микромеханических датчиках различных физических величин применяют различные (электростатические, магнитоэлектрические, пьезоэлектрические, тензорезистивные) способы преобразования для измерения полезных сигналов. Для компенсации систематических погрешностей, возникающих в процессе измерения, используют различные технические решения, такие как мостовые схемы, алгоритмическая компенсация ошибок и т. д. Ресурс этих решений не бесконечен, и часто ограничение по точности измерения связано непосредственно с физическим принципом преобразования сигнала. Таким образом, существует объективная потребность увеличения точности измерения не только за счет компенсации систематических погрешностей, но и за счет использования других физических принципов преобразования сигнала. В этом плане определенный

интерес представляет частотно-резонансный способ измерения. В первую очередь, это связано с более высокой точностью измерения за счет использования высокодобротных резонаторных структур, а также с упрощением преобразования выходного сигнала в цифровой код. Основным преимуществом частотно-резонансного метода измерения является частотный выходной сигнал, который позволяет транслировать его на значительные расстояния. Но в то же время прецизионное формирование чувствительного элемента в кремнии, схемы возбуждения автоколебаний и снятия полезного сигнала является технологически сложной и не до конца решенной задачей в конструировании интегрированных резонансных микросистем.

Частотно-резонансный метод измерения

Можно выделить несколько способов измерения частотно-резонансным методом, применяемых в микроприборах. Безусловно, один из наиболее распространенных способов — с помощью преобразователей на основе ПАВ структур [1]. В микроэлектромеханике для этих целей часто применяют струнные преобразователи, в которых измеряется изменение резонансной частоты отдельного чувствительного элемента (струны) [2]. Струнный преобразователь представляет собой упругую, зашпеленную с двух сторон балку (струну), выполненную из проводящего материала. Раскачка струны на резонансной частоте осуществляется за счет попеременной подачи опорного напряжения на электроды C1 и C2 (рис. 1). Снятие сигнала происходит с помощью электродов C3 и C4. Управление опорным напряжением осуществляется за счет обратной связи. Измерение механического воздействия со стороны подвижной опоры, непосредственно связанной с микромеханическим преобразователем (например инерционной массой), осуществляется за счет изменения резонансной частоты.

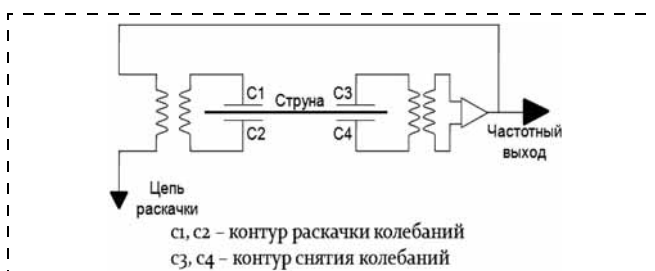


Рис. 1. Схематическое изображение принципа работы струнного преобразователя:

C1, C2 — контур раскачки; C3, C4 — контур снятия колебаний

нансной частоты струнного преобразователя вследствие изменения механического натяжения струны.

Другой способ измерения частотно-резонансным методом — это измерение изменения резонансной частоты всей структуры чувствительного элемента датчика. Принцип работы такого сенсора основан на изменении жесткости упругих элементов подвеса, вследствие чего меняется резонансная частота всей конструкции чувствительного элемента пропорционально измеряемому воздействию. Автоколебания системы, компенсация смещения и подстройка резонансной частоты в режиме измерения осуществляются за счет наличия обратной связи.

При измерении частотно-резонансным методом в микромеханических структурах за счет изменения жесткости чувствительного элемента или упругого подвеса в целом выражение для резонансной частоты можно записать как

$$\omega = \sqrt{\frac{k_0 + \Delta k}{m}},$$

где ω — круговая частота; k_0 — жесткость подвеса; Δk — изменение жесткости подвеса; m — эффективная масса струны или всего чувствительного элемента.

После необходимых преобразований, с учетом малости величины $\Delta k/k_0 \ll 1$, получим выражение для изменения резонансной частоты:

$$\Delta\omega \approx \omega_0 \frac{\Delta k}{2k_0}, \quad (1)$$

где $\omega_0 = \sqrt{k_0/m}$ — круговая резонансная частота.

В общем случае для повышения чувствительности при измерении частотно-резонансным методом необходимо использовать нелинейный микромеханический преобразователь, у которого жесткость зависит от значения измеряемого сигнала. В области малых изменений жесткости изменение резонансной частоты линейно зависит от изменения жесткости (1).

В качестве нелинейного микромеханического преобразователя можно представить упругий элемент, у которого имеет место изменение жесткости хотя бы в одном направлении при приложении нагрузки. В частности, это может быть струна с приложенной в центре сосредоточенной нагрузкой, где имеет место зависимость натяжения струны от прогиба, а следовательно, и изменение ее жесткости.

Для оценки частотных и конструктивных характеристик нелинейного преобразователя представим выражение для обобщенной силы упругости F в направлении y как

$$F = k_0 y + k_1 y^2 + k_2 y^3,$$

тогда, соответственно, общая жесткость k нелинейного преобразователя примет следующий вид:

$$k = \frac{dF}{dy} = k_0 + 2k_1 y + 3k_2 y^2, \quad (2)$$

и круговую резонансную частоту можно записать как

$$\omega = \sqrt{\frac{k_0 + 2k_1 y + 3k_2 y^2}{m}}.$$

Тогда чувствительность нелинейного преобразователя по перемещению S_y можно записать следующим образом:

$$S_y = \frac{d\omega}{dy} = \omega \frac{k_1 + 3k_2 y}{k}.$$

При этом независимость чувствительности S_y от смещения y , что соответствует линейной зависимости частоты $\omega(y)$ в области малых смещений, определяется условием для коэффициентов нелинейной жесткости:

$$k_1^2 = 3k_0 k_2. \quad (3)$$

Из зависимостей, приведенных на рис. 2, видно, что можно добиться линейной зависимости резонансной частоты (постоянная чувствительность по смещению) от малых смещений для нелинейного преобразователя при выполнении определенных условий (3), накладывающих ограничения на параметры преобразователя.

Также практически важным параметром частотно-резонансного нелинейного преобразователя является его чувствительность по силе S_F , которую можно определить как

$$S_F = \frac{d\omega}{dF} = \omega \frac{k_1 + 3k_2 y}{k^2}.$$

Зависимость чувствительности S_F от силы имеет максимум в нуле при условии

$$k_1^2 = k_0 k_2. \quad (4)$$

На рис. 3 представлены зависимости чувствительности S_F и резонансной частоты ω от приложенной силы F при выполнении условия (4). При малых силовых воздействиях (при значениях F около 0) наблюдается наибольший наклон зависимости резонансной частоты от силы, что соответствует мак-

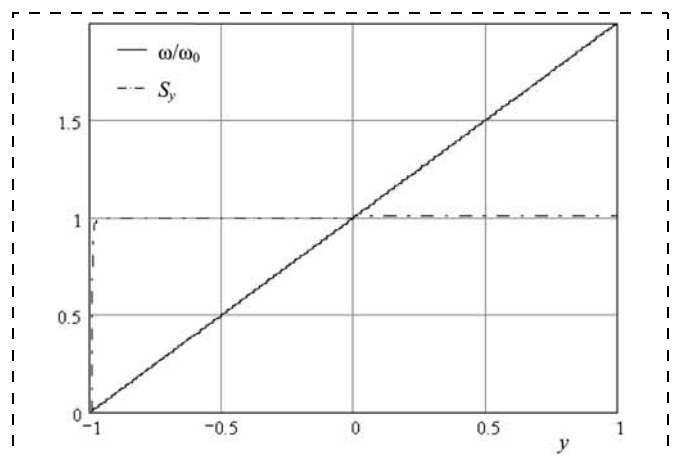


Рис. 2. Зависимость частоты и чувствительности по перемещению нелинейного преобразователя от прогиба при условии (3)

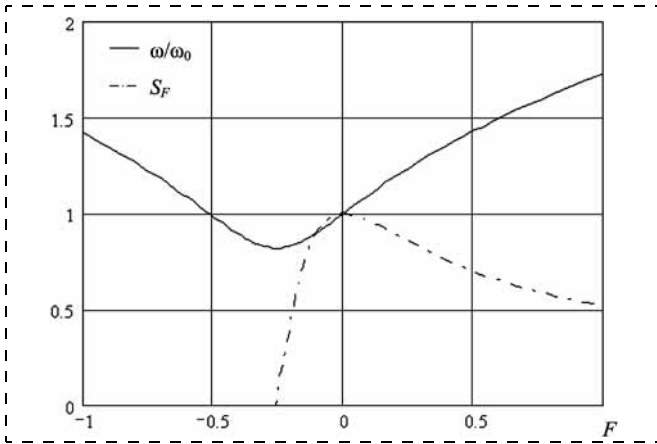


Рис. 3. Зависимость частоты и чувствительности по силе нелинейного преобразователя от приложенной нагрузки в центре при условии (4)

симуму чувствительности, а также минимальному изменению чувствительности S_F от силы.

Таким образом, при частотно-резонансном методе измерения с помощью нелинейного микромеханического преобразователя наилучшая чувствительность (по силе или смещению) достигается в конструкции нелинейного упругого элемента с определенным соотношением (3), (4) параметров в выражении для силы упругости. В качестве нелинейного упругого механического элемента могут выступать балки, струны, мембраны в условиях больших деформаций.

Нелинейный микромеханический преобразователь

Рассмотрим частный случай нелинейного преобразователя: защемленную с двух концов изогнутую балку с начальным прогибом в центре y_0 (рис. 4) и остаточными механическими напряжениями σ_0 . В этом случае при приложении поперечной сосредоточенной нагрузки F в центре возникает продольная сила натяжения

$$F_1 = (\sigma_0 + \sigma_d)bh, \quad (5)$$

где b — ширина балки; h — толщина балки; σ_d — дополнительные механические напряжения, возникающие при приложении сосредоточенной нагрузки в центре балки за счет ее удлинения,

$$\sigma_d = E \frac{\Delta l}{l}, \quad (6)$$

где E — модуль упругости; $\Delta l/l$ — относительное удлинение балки.

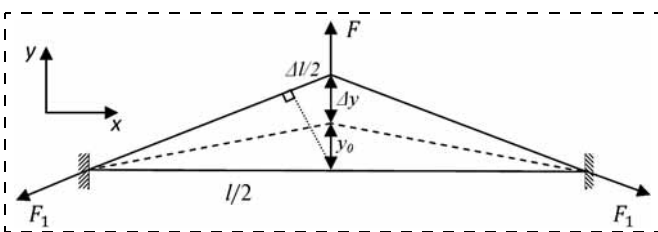


Рис. 4. Схема нелинейного микромеханического преобразователя

Условие равновесия сил по оси y определяется из рис. 4 как

$$F = 2F_1 \frac{y_0 + \Delta y}{l/2}. \quad (7)$$

Таким образом, с учетом выражений (5)–(7) для защемленной с двух концов изогнутой балки с начальным прогибом в центре y_0 , получим выражение для нелинейной зависимости приложенной сосредоточенной нагрузки в центре F от прогиба Δy :

$$F = 16 \frac{Ebh^3}{l^3} \left(1 + \frac{\sigma_0 l^2}{4Eh^2} + \frac{y_0^2}{h^2} \right) \Delta y + 24 \frac{Ebh}{l^3} y_0 \Delta y^2 + 8 \frac{Ebh}{l^3} \Delta y^3,$$

тогда в соответствии с формулой (2) уравнение для общей жесткости примет следующий вид:

$$k = 16 \frac{Ebh^3}{l^3} \left(1 + \frac{\sigma_0 l^2}{4Eh^2} + \frac{y_0^2}{h^2} \right) + 48 \frac{Ebh}{l^3} y_0 \Delta y + 24 \frac{Ebh}{l^3} \Delta y^2. \quad (8)$$

Из формулы (8) для жесткости нелинейного преобразователя можно определить выражения для коэффициентов k_0 , k_1 и k_2 . Стоит обратить внимание на то, что коэффициент k_1 зависит от величины начального прогиба и равен нулю при $y_0 = 0$. Поэтому для получения максимальной чувствительности нелинейного преобразователя, что соответствует условиям (3) и (4), необходимо, чтобы $k_1 \neq 0$, это возможно для упругого элемента с начальным прогибом.

Таким образом, с учетом формул (1) и (8) можно записать равенство для изменения резонансной частоты нелинейного преобразователя в виде

$$\Delta \omega = 0,75 \omega_0 \frac{2y_0 + \Delta y}{h^2 \left(1 + \frac{\sigma_0 l^2}{4Eh^2} + \frac{y_0^2}{h^2} \right)} \Delta y. \quad (9)$$

Из формулы (9) видно, что относительная чувствительность $\Delta \omega / \omega_0 \Delta y$ преобразователя с нелинейным чувствительным элементом максимальна при следующих условиях:

$$\frac{\sigma_0 l^2}{4Eh^2} \ll 1; \quad h \approx y_0.$$

Метрологические характеристики нелинейного преобразователя также зависят от его конструкции и добротности. В частности, при использовании кремниевой балки длиной 100 мкм, шириной 5 мкм, толщиной 1 мкм, с остаточными механическими напряжениями менее 10 МПа и начальным прогибом 1 мкм нелинейный элемент имеет пороговую чувствительность по перемещению порядка 10^{-12} м, что соответствует изменению его резонансной частоты на 4 Гц.

Акселерометр на основе нелинейных преобразователей

Акселерометр представляет собой инерционную массу, подвешенную на дифференциальной системе нелинейных преобразователей (рис 5). При измерении действующего ускорения по оси чувствительности один упругий элемент растягивается, другой сжимается, вследствие чего меняются их резонансная частота, у одного преобразователя, соответственно, она увеличивается на Δf , у другого уменьшается на ту же величину. Таким образом, с нелинейных преобразователей снимается дифференциальный сигнал, пропорциональный измеряемому ускорению. Раскачка упругого элемента и снятие полезного сигнала могут осуществляться электростатическим способом.

Наиболее интересными параметрами для оптимизации конструкции акселерометра с точки зрения практического применения датчика являются минимальное измеряемое ускорение, погрешность и частотный диапазон работы акселерометра.

Основным ограничением минимального измеряемого ускорения $A_{\min}$ в рассматриваемой конструкции является различимость резонансных пиков $\Delta f_{\text{ш}}$ амплитудно-частотной характеристики струнного преобразователя для близких резонансных частот:

$$\Delta f_{\text{ш}} = S_f A_{\min},$$

где $\Delta f_{\text{ш}}$ — предельно различимые сдвиги резонансной частоты; S_f — частотная чувствительность акселерометра.

Тепловым шумом в этом случае можно пренебречь, так как флуктуации ускорения, вызванные им, много меньше, чем разность значений ускорений, соответствующих предельно различимым частотным пикам (около 10^4 раз).

Важным параметром, который надо учитывать при разработке акселерометра на основе нелинейных преобразователей, является добротность. При малых добротностях происходит размытие резонансных пиков, что ведет к увеличению значения минимального измеряемого ускорения. Высоких значений добротности можно достичь путем вакуумирования микромеханического чувствительного элемента.

Добротность нелинейного преобразователя можно определить из соотношения:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f_{\text{ш}}},$$

где $\Delta f_{\text{ш}}$ — ширина частотной характеристики резонанса на уровне 3 дБ.

Вместе с тем, добротность можно оценить из параметров конструкции:

$$Q = \frac{k}{\omega_0 r},$$

где r — коэффициент демпфирования; k — жесткость конструкции; ω_0 — круговая резонансная частота струны. Приравнявая правые части равенств для добротности, получим

$$\frac{f_0}{\Delta f_{\text{ш}}} = [\Delta f_{\text{ш}} = S_f A_{\min}] = \frac{f_0}{S_f A_{\min}} = \frac{k}{\omega_0 r},$$

$$A_{\min} = \frac{f_0 \omega_0 r}{k S_f} = \frac{\omega_0^2 r}{2\pi k S_f}.$$

В итоге, значение минимального измеряемого ускорения $A_{\min}$ может быть оценено с помощью следующего выражения:

$$A_{\min} = \frac{32\pi r h^2}{M l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где ρ , h — плотность и толщина струны; M — инерционная масса преобразователя.

Из последнего выражения видно, что для уменьшения минимального измеряемого ускорения (пороговой чувствительности) необходимо:

- увеличивать инерционную массу преобразователя;
- использовать материал с меньшим модулем Юнга и большей плотностью;
- снижать демпфирование (вакуумировать чувствительный элемент);
- уменьшать жесткость струнного подвеса (уменьшать толщину и увеличивать длину струн).

Погрешность акселерометров струнного типа можно рассчитать как отношение минимального измеряемого ускорения $a_{\min}$ к номинальному $a_{\text{пот}}$.

$$\delta = \frac{a_{\min}}{a_{\text{ном}}} = \frac{\pi r l}{2 b y_0^2} \sqrt{\frac{1}{E \rho}} 100 \ \%.$$

В данном случае номинальное ускорение определяется ускорением, при котором начальный прогиб равен нулю. Дальнейшее увеличение ускорения приведет к прогибу упругого элемента в "обратную сторону". Это, в свою очередь, нежелательно, так как получаемые значения измеряемого ускорения не будут соответствовать действительности за счет того, что при прогибе в обратную сторону упругий элемент начнет снова натягиваться.

Для уменьшения погрешности необходимо:

- увеличивать начальный прогиб;
- уменьшать демпфирование;
- уменьшать длину струны.

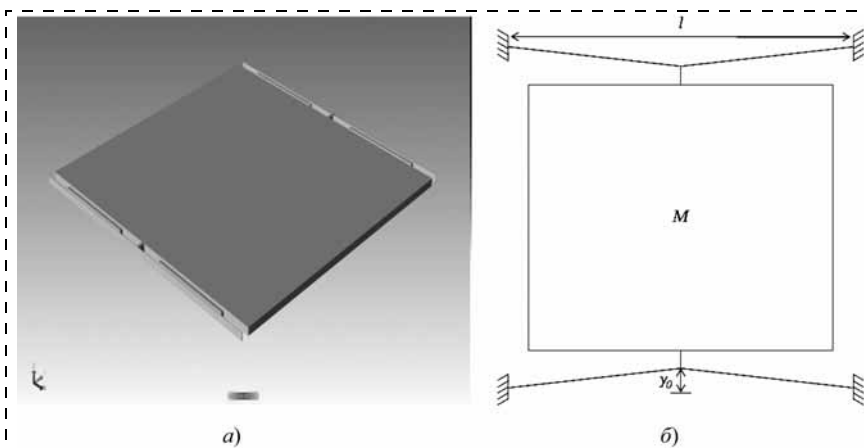


Рис. 5. Конструкция микромеханического акселерометра с нелинейными упругими подвесами:

a — трехмерное изображение; b — схематическое изображение

Сравнивая полученные равенства для минимального измеряемого ускорения и погрешности акселерометра, видим, что погрешность можно уменьшить, не влияя на значение минимального измеряемого ускорения, за счет увеличения начального прогиба y_0 . Но начальный прогиб должен быть примерно равен толщине упругого элемента. В этом случае получим максимальную чувствительность частотного преобразования. Также для нормальной работы акселерометра необходимо, чтобы основная резонансная частота акселерометра была много меньше резонансной частоты струнного подвеса.

При оптимизации конструкции струнного акселерометра по различным критериям с учетом конструктивно-технологических ограничений получены предельные значения минимального измеряемого ускорения $10^{-4} \dots 10^{-5} \text{ g}$, относительной приведенной погрешности $10^{-3} \%$, частотного диапазона работы акселерометра до 10 кГц. Стоит отметить, что частотный диапазон можно увеличить более 10 кГц за счет увеличения жесткости подвеса добавлением дополнительных балок и уменьшения инерционной массы, но при этом увеличится минимальное измеряемое ускорение.

Заключение

Определены параметры оптимизации конструкции нелинейных микромеханических преобразователей при частотно-резонансном методе измерения. Показано, что наибольшая чувствительность

изменения резонансной частоты к механическому воздействию достигается в конструкции упругого элемента с начальным прогибом, значение которого соответствует толщине упругого элемента.

Разработана конструкция микромеханического акселерометра на основе нелинейных струнных преобразователей, резонансная частота которых определяется измеряемым ускорением. Получены оптимальные характеристики предлагаемой конструкции при частотно-резонансном методе измерения сигнала.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации по теме "Физико-технологические основы формирования высокочувствительных нано- и микромембранных элементов", соглашение № 14.B37.21.0082, в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 годы, и Программы стратегического развития университета (СПбГЭТУ "ЛЭТИ") "Развитие междисциплинарных исследований и инструментально-технологической базы как основа непрерывного инженерного образования по приоритетным направлениям российской экономики" на 2012—2016 годы.

Список литературы

1. Лукьянов Д. П., Лучинин В. В., Скворцов В. Ю., Шелько М. М. Экспериментальное исследование макета микроакселерометра на поверхностных акустических волнах // Петербургский журнал электроники. 2001. № 4. С. 82—83.
2. Карцев Е. А., Коротков В. П. Унифицированные струнные преобразователи. М.: Машиностроение, 1982. 144 с.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

УДК 621.315.592

О. А. Александрова¹, канд. физ.-мат. наук, доц.,
А. И. Максимов¹, канд. физ.-мат. наук, доц.,
Е. В. Мараева¹, ассистент, e-mail: jenvmar@mail.ru,
Л. Б. Матюшкин¹, аспирант,
e-mail: leva.matyushkin@gmail.com,
В. А. Мошников¹, д-р физ.-мат. наук, проф.,
С. Ф. Мусихин^{1, 2}, канд. физ.-мат. наук, доц.,
С. А. Тарасов¹, канд. физ.-мат. наук, доц.

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

СИНТЕЗ И САМООРГАНИЗАЦИЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК СУЛЬФИДА СВИНЦА ДЛЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СТРУКТУР, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИСПАРЕНИЯ КОЛЛОИДНОГО РАСТВОРА

Поступила в редакцию 20.09.2012

Представлены результаты по получению наноматериалов, содержащих массивы (наносистемы) из коллоидных квантовых точек сульфида свинца. Методами атомно-силовой микроскопии и фотолюминесценции исследованы люминесцентные свойства квантово-размерных элементов, составляющих иерархическую наносистему. Определена возможная область применения массивов квантовых точек сульфида свинца в медицинской диагностике.

Ключевые слова: квантовые точки, коллоидный раствор, сульфид свинца, самоорганизация, фотолюминесценция, медицинская диагностика

Введение

Материалы на основе халькогенидов свинца вызывают устойчивый интерес в связи с возможностью их использования в различных областях оптоэлектроники, термоэлектричества и сенсорики [1, 2]. В методах получения поликристаллических слоев на основе халькогенидов свинца наметились две основные тенденции: вакуумное термическое нанесение [3—7] и химическое осаждение из растворов [8, 9]. Монокристаллические слои получают методом молекулярно-лучевой эпитаксии [10]. Полупроводниковые поликристаллические слои на основе соединений A^4B^6 , получаемые методом вакуумного термиче-

ского нанесения, широко используются для изготовления фотоприемников и источников ИК излучения, работающих при комнатной температуре. При этом свойства материалов зависят от отклонения от стехиометрии, а дефекты способны перераспределяться в ходе технологических операций [3, 5].

На основе поликристаллических наноструктурированных слоев селенида свинца и твердых растворов селенида свинца — селенида кадмия получены фотоприемные и люминесцентные устройства, работающие в ИК диапазоне 3...5 мкм [4, 5]. Исследования микроstructures таких материалов с использованием растровой электронной микроскопии (РЭМ) показывают, что после высокотемпературного отжига слоев зерна под оксидом связаны в цепочки и образуют сетку (рис. 1). Высокотемпературный отжиг характеризуется процессами вторичной рекристаллизации, в результате которой образуется сетка из зерен, углы между зернами составляют приблизительно 120°. Такая микроstructure характерна для слоев с высокой фотопроводимостью [3, 7].

В рассматриваемых структурах люминесценция чаще всего проявляется в определенных локальных областях, в ряде случаев ограниченных размерами 20 нм и менее. Это определяет большой интерес, проявляемый к синтезу и исследованию стабилизированных коллоидных квантовых точек на их основе [11, 12]. Из наиболее важных для нано- и микросистемной техники практических применений упорядоченных массивов коллоидных квантовых точек необходимо отметить возможность создания на их основе источников когерентного, монохроматического ИК излучения, имеющих важное значение для телекоммуникаций, биомедицинской диагностики и оптических сенсоров. Преимуществом применения коллоидных квантовых точек является независимость их свойств от типа подложки, а также возможность нанесения на любые поверхности. Метод испарения раствора, содержащего коллоидные квантовые точки, позволяет создавать как лазерные структуры [13], в том числе с пониженной чувствительностью эмиссии к влиянию темпе-

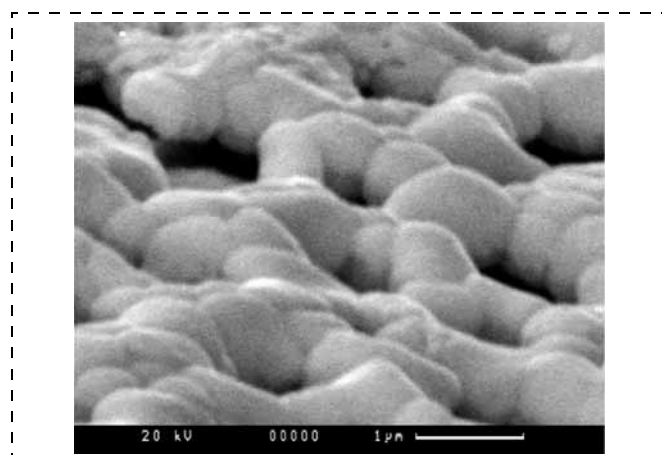


Рис. 1. РЭМ-изображение микроstructures слоя на основе твердого раствора селенида свинца — селенида кадмия, обладающего высокой фотопроводимостью

ратуры (0,03 нм/К) [14], так и полевые фототранзисторы [15], фотодетекторы [16] и электрооптические модуляторы [17].

К настоящему времени накоплен значительный экспериментальный материал по формированию квантовых точек халькогенидов свинца в стеклянных матрицах [18—20], причем матрица не должна разрушать кристаллическую структуру квантовых точек. Это накладывает определенные сложности при разработке технологических режимов.

Как правило, при подчеркивании технических преимуществ использования наноматериалов с квантовыми точками халькогенидов элементов IV группы по сравнению с наноматериалами на основе квантовых точек халькогенидов элементов II группы констатируется узкозонность халькогенидов свинца. Иными словами, при уменьшении размеров квантовой точки удастся пройти более широкий энергетический диапазон. Но не менее важной особенностью халькогенидов свинца является возможность достижения условия сильного размерного квантования.

По оценкам работы [21], боровский радиус дырки для этих соединений $A^{II}B^{VI}$ составляет единицы нанометров $R = 3$ нм (CdS), 5 нм (CdSe), 8 нм (CdTe), поэтому достижение эффекта сильного размерного квантования в классическом варианте в этих материалах представляется затруднительным. В квантовых точках PbSe радиусы электрона, дырки и экситона Бора равны 23, 23 и 46 нм соответственно. Такие значения радиусов позволяют достигать режима сильного размерного квантования на сравнительно больших частицах.

Актуальной задачей представляется разработка технологических режимов по получению квантовых точек халькогенидов свинца, стабилизации их размеров и обеспечению условий эффективной самосборки, в процессе которой формируется микро- или наносистемы с сохранением квантово-размерных свойств составных элементов.

Целью работы являлась разработка методик синтеза, совмещающих получение коллоидных квантовых точек в водных растворах с одновременной их организацией в упорядоченные массивы, предназначенные для создания светоизлучающих микроstructures при неинвазивной диагностике биологических тканей в спектральном диапазоне 0,9...1,7 мкм.

Решение задач проводилось с учетом представлений о термодинамике и кинетике процессов, протекающих при химическом осаждении в растворе [22, 23], а также модели образования иерархических структур, описанной в работе [24].

Метод синтеза

Синтез наночастиц PbS основан на реакции ионного обмена между ацетатом свинца $Pb(CH_3COO)_2$ и сероводородом H_2S . Водный раствор сероводорода добавляется к раствору ацетата свинца $Pb(CH_3COO)_2$ в 1 %-м растворе поливинилового спирта. Длинноцепочечные молекулы поливинилового спирта при этом выступают в каче-

стве стабилизатора коллоидного раствора. Далее полученный коллоидный раствор наносится на стеклянную подложку, и в течение 24 ч осуществляется сушка капельного образца при нормальных условиях, в результате которой происходит уменьшение объема капли и "потемнение" ее краев.

Изучение дисперсии размеров частиц методами оптической микроскопии

При изучении полученных образцов были обнаружены частицы диаметром микрометрового диапазона, размеры которых уменьшались от центра к краю капли (рис. 2).

Дисперсия размеров частиц была тщательно изучена средствами оптической микроскопии. На экране случайным образом выбирались изображения десяти частиц, измерялись их размеры. Операция повторялась при исследовании образца через каждые 0,5 мм в радиальном направлении от центра к краю.

Точки на рис. 3 отражают среднее значение размера частиц, вертикальные отрезки — минимальное и максимальное обнаруженные значения, которые также уменьшаются при приближении к краю образца. В области края образца максимального разрешения оптического микроскопа уже недостаточно для определения размеров частиц. Радиальная протяженность области темного обода составляет 150 мкм. Оценка перепада высот на краю капли методом расфокусировки микроскопа дает значение на уровне единиц микрометров.

Исследование материала методами атомно-силовой микроскопии

Для более точного определения структуры образца были использованы средства атомно-силовой микроскопии (АСМ) с применением полуконтактной колебательной методики на установке Ntegra Terma. На рис. 4 обозначены области, для которых были получены АСМ-изображения.

На АСМ-изображении, полученном в области темного ободка 1 (рис. 4), наблюдается наличие множества близких по размеру наночастиц (рис. 5). При переходе в область 2 (см. рис. 4) обнаруживается уменьшение концентрации частиц на единице поверхности (рис. 6). При переходе к области 3 (см. рис. 4) наблюдается образование структуры, подобной сетке. Вероятно, что в этой области небольшое число частиц PbS распределено в прочих продуктах реакции, имевшей место в исходном растворе, в том числе в остатках поливинилового спирта (рис. 7). Аналогичная морфология наблюдается и в центре образца 4 (рис. 8). В этой области невооруженным глазом видны кристаллиты белого цвета — остатки непрореагировавшего ацетата свинца $Pb(CH_3COO)_2$. Исследования с помощью

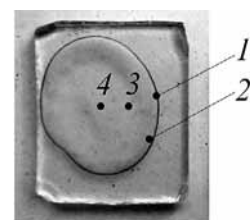


Рис. 4. Образец, полученный из раствора ацетата свинца в поливиниловом спирте и водном растворе сероводорода с обозначением областей АСМ-сканирования

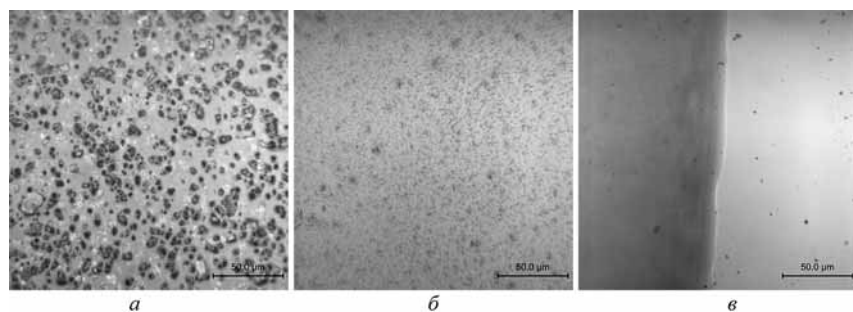


Рис. 2. Оптическая микроскопия для различных участков образца:

a — центр; *б* — между центром и краем; *в* — край капли. Масштабный отрезок соответствует 50 мкм

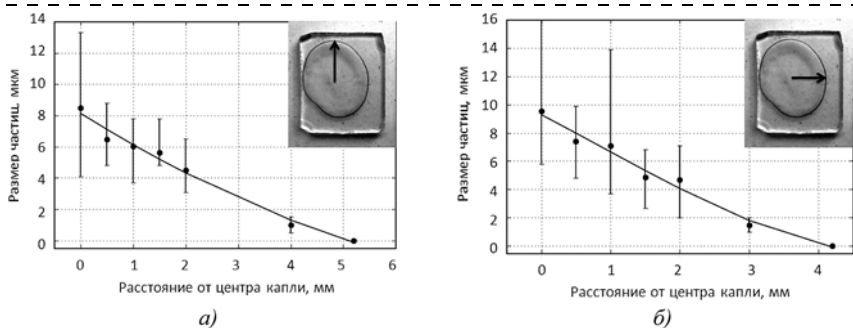


Рис. 3. Распределение размеров частиц в различных направлениях измерения: вдоль (*a*) и поперек (*б*) образца капли. На вставках приведены фотографии образца, стрелками указано направление смещения от центра капли

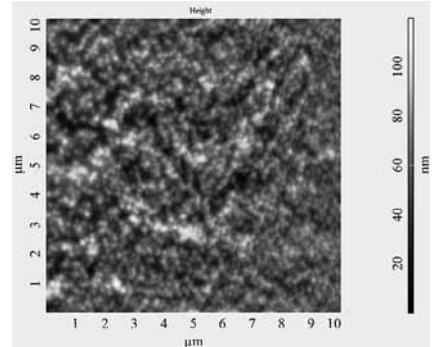


Рис. 5. АСМ-изображение, полученное при сканировании участка 1 (размер сканируемой области 10 × 10 мкм)

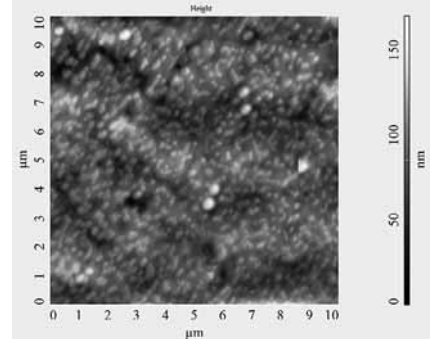


Рис. 6. АСМ-изображение, полученное при сканировании участка 2 (размер сканируемой области 10 × 10 мкм)

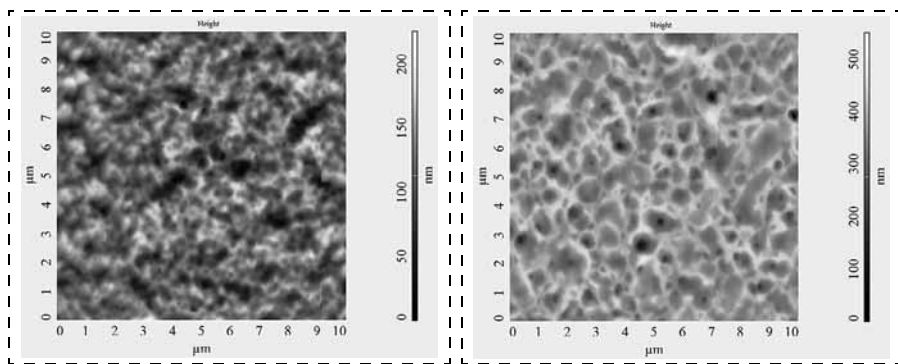


Рис. 7. АСМ-изображение, полученное при сканировании участка 3 (размер сканируемой области 10×10 мкм)

Рис. 8. АСМ-изображение, полученное при сканировании участка 4 (размер сканируемой области 10×10 мкм)

атомно-силового микроскопа (рис. 5–8) показывают также увеличение рельефа по мере приближения к центру капли. При этом рельеф изменяется от 100 нм (рис. 5) до 0,5 мкм (рис. 8).

Таким образом, исследование поверхности образцов методами оптической и атомно-силовой микроскопии показывает, что агломераты частиц наименьшего размера концентрируются на ободке капли, имеющем радиальную протяженность 150 мкм. Следует отметить, что наблюдаемые оптическими методами частицы могут являться результатом сборки более мелких наночастиц, ответственных за квантово-размерные эффекты. Прямое наблюдение квантовых точек методами оптической и атомно-силовой микроскопии не представляется возможным. Информацию о наличии квантовых точек сульфида свинца и их дисперсии по размерам дает исследование спектров люминесценции, представленное в следующем разделе.

Измерение спектров фотолюминесценции

В соответствии с высказанными предположениями о распределении частиц был проведен эксперимент по исследованию фотолюминесценции полученных образцов с применением установки, созданной на основе дифракционного монохрома-

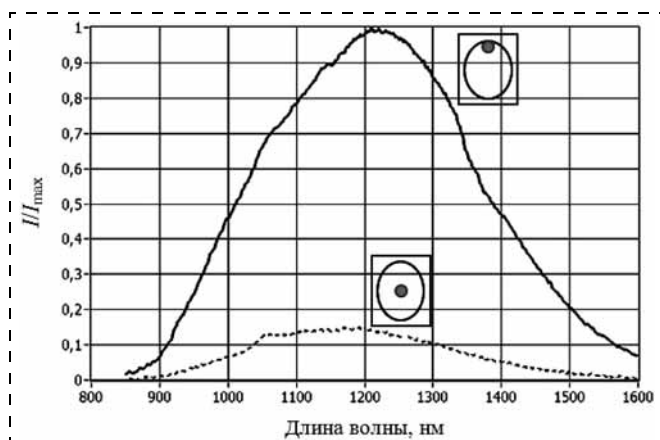


Рис. 9. Сравнение спектра фотолюминесценции для различных областей образца — центра и края высохшей капли. Схематически изображено положение пятна лазера относительно образца

тора высокого разрешения [25]. В качестве источника стимулирующего излучения использовался твердотельный лазер на основе $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ с диодной накачкой и удвоением частоты ($\lambda = 532$ нм). Было проведено сравнение спектров фотолюминесценции при различном положении пятна излучения лазера относительно образца — в центре и на краю высохшей капли (рис. 9). Интенсивность сигнала на краю капли оказалась в 8 раз выше, чем в центре образца. Положение максимума и полуширина линии остались неизменными.

Этот факт говорит о том, что квантовые точки во всей капле характеризуются приблизительно одинаковой дисперсией по размерам и присутствуют во всем образце, в том числе и в его центре. Однако в ходе высыхания капли произошло перераспределение частиц образца, обнаруженное при исследовании методами АСМ. Сравнение интенсивностей люминесценции на краю капли и в центре образца указывает на то, что наиболее благоприятные условия для формирования массивов коллоидных квантовых точек были созданы вблизи тонкого краевого слоя.

Близость размеров полученных квантовых точек между собой находится в согласии с общими теоретическими представлениями, согласно которым на начальных этапах роста наблюдаются кластеры, содержащие "магические числа" атомов. Чаще всего за граничное значение возникновения поверхности принимается случай, когда число атомов в объеме становится равным числу атомов на поверхности. При этом, развиваясь в неравновесных условиях, поверхность испытывает флуктуации, и, как принято считать в настоящее время, устойчивые размеры частиц возникают в тех случаях, когда реализовано целочисленное число периодов флуктуаций. Это и обуславливает "калиброванные" размеры наночастиц на различных стадиях синтеза.

Одной из реальных задач для развития нанотехнологий в рассматриваемой области является установление особенностей синтеза, обеспечивающих управление надмолекулярными силами при формировании люминесцентных слоев. Метод получения массивов квантовых точек прост в реализации, но в настоящее время отсутствуют модельные представления, позволяющие получить удовлетворительное количественное согласие с экспериментом. Из качественных моделей можно выделить работу [26]. В отмеченной работе рассмотрены физико-химические особенности процессов, протекающих в капле жидкости, содержащей полупроводниковые наночастицы, при нанесении ее на твердую поверхность.

Полученный спектр фотолюминесценции синтезированного нанокпозиционного материала также подтверждает, что в работе решены задачи

материаловедения микро- и наносистем по созданию материалов, пригодных для реализации устройств, работающих в диапазоне длин волн, востребованных в современном медицинском приборостроении. Полученные материалы, содержащие массивы квантовых точек, планируется использовать для создания микроустройств оптической томографии биологических тканей.

Заключение

Реализован синтез наноматериала, содержащего наночастицы из квантовых точек сульфида свинца. Установлено, что данный материал обладает эффективной фотолюминесценцией в ближней ИК области. Проведенное исследование синтезированных массивов квантовых точек сульфида свинца, полученных методом растворной химии, позволило выявить закономерности в самоорганизации частиц при эволюции капли коллоидного раствора на стеклянной подложке в процессе удаления растворителя. На основании исследования спектров люминесценции в ИК области установлена связь между эффективностью люминесценции массивов квантовых точек и процессом их структурной организации.

Данная работа выполнялась в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 гг. "Поддержка научных исследований, проводимых научными группами под руководством докторов наук по научному направлению "Индустрия наносистем", ГК № 14.B37.21.1089 и "Получение и обработка функциональных наноматериалов", ГК № 14.B37.21.0134.

Список литературы

1. Абрикосов Ю. Н., Шелимова Л. Е. Полупроводниковые материалы на основе соединений A^4B^6 . М.: Наука, 1975. 195 с.
2. Зломанов В. П., Новоселова А. В. Р-Т-Х-диаграммы состояния систем металл—халькоген. М.: Наука, 1987. 208 с.
3. Александрова О. А., Максимов А. И., Мошников В. А., Чеснокова Д. Б. Халькогениды и оксиды элементов IV группы. Получение, исследование, применение / Под ред. В. А. Мошникова. СПб.: ООО "Технолит", Изд-во "Технолит", 240 с.
4. Alexandrova O. A., Kamchatka M. I., Miropolsky M. S., Passynkov V. V. Diffusion of Native Defects in PbSnTe during Liquid Phase Epitaxy // *Physica Status Solidi (a)*. 1986. N 94. P. 139—143.
5. Александрова О. А., Ахмеджанов А. Т., Бондюков Р. Ц., Мошников В. А., Саунин И. В., Таиров Ю. М., Штанов В. П., Яшина Л. В. Исследование барьерных структур In/PbTe с промежуточным тонким диэлектрическим слоем // *Физика и техника полупроводников*. 2000. Т. 34. С. 1420—1425.
6. Chesnokova D. B., Moshnikov V. A., Gamarts A. E., Maeva E. V., Alexandrova O. A., Kuznetsov V. V. Structural characteristics and photoluminescence of nano structured $Pb_{1-x}Cd_xSe$ ($x = 0-0,20$) layers // *Journal of Non-crystalline Solids*. 2010. V. 356. P. 2010—2014.
7. Мошников В. А., Гамарц А. Е., Чеснокова Д. Б., Маева Е. В. Получение и свойства наноструктурированных слоев на основе твердых растворов $Pb_{1-x}Cd_xSe$ ($x = 0-0,20$) // *Неорганические материалы*. 2011. Т. 47. № 1. С. 18—22.
8. Марков В. Ф., Маскаева Л. Н. Особенности формирования пленок сульфидов металлов из водных растворов // *Бутлеровские сообщения*. 2011. Т. 24. № 2. С. 42—50.
9. Лукашин А. В., Елисеев А. А. Синтез полупроводниковых наночастиц сульфида свинца и сульфида кадмия. М.: МГУ, 2011.
10. Канагаева Ю. М., Мошников В. А. Arnold M., Zogg H., Felder F., Rahim M. Электрофизические свойства фотодиодов на основе эпитаксиальных слоев для среднего ИК диапазона // *Вакуумная техника и технология*. 2008. Т. 18. № 1. С. 3—8.
11. Мусихин С. Ф., Ильин В. И. Гибридные полимер-полупроводниковые наноструктуры, технология, приборы // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2007. № 4—1. С. 105—112.
12. Мусихин С. Ф., Ильин В. И. Методы нанотехнологии в биологии и медицине // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2008. № 3. С. 183—190.
13. Sukhovatkin V., Musikhin S., Gorelikov I., Cauchi S., Bakueva L., Kumacheva E., Sargent E. H. Room-temperature amplified spontaneous emission at 1300 nm in solution-processed PbS quantum-dot films // *Optics Letters*. 2005. V. 30. N 2.
14. Hoogland S., Sukhovatkin V., Howard I., Cauchi S., Levina L., Sargent E. H. A solution-processed 1,53 μm quantum dot laser with temperature-invariant emission wavelength // *Optics Express*. 2006. V. 14. N 8. P. 3273—3281.
15. Ghosh S., Hoogland S., Sukhovatkin V., Levina L., Sargent E. H. A tunable colloidal quantum dot photo field-effect transistor // *Applied Physics Letters*. 2011. N 99. P. 101102.
16. Deng Z., Cao D., He J., Lin S., Lindsay S. M., Liu Y. Solution Synthesis of Ultrathin Single-Crystalline SnS Nanoribbons for Photodetectors via Phase Transition and Surface Processing // *Acsnano*. 2012. V. 6. N 7. P. 6197—6207.
17. Hoogland S., Sukhovatkin V., Shukla H., Clifford J., Levina L., Sargent E. H. Megahertz-frequency large-area optical modulators at 1,55 μm based on solution-cast colloidal quantum dots // *Optics Express*. 2008. V. 16. N 9. P. 6683—6691.
18. Lipovskii A., Kolobkova E., Petrikov V. et al. Synthesis and characterization of PbSe quantum dots in phosphate glass // *Applied Physics Letters*. 1997. V. 71. N 23. P. 3406—3408.
19. Колобкова Е. В., Липовский А. А., Петриков В. Д., Мелехин В. Г. Фторфосфатные стекла с квантовыми точками на основе сульфида свинца // *Физика и химия стекла*. 2002. Т. 28, № 4. С. 207—214.
20. Гапоненко М. С., Юмашев К. В., Онущенко А. А. Люминесценция нанокристаллов сульфида свинца в матрице из силикатного стекла // *Журнал прикладной спектроскопии*. 2010. Т. 77. № 5. С. 720—724.
21. Колобкова Е. В. Фторфосфатные стекла с полупроводниковыми нанокристаллами A^4B^6 // *Изв. Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2011. № 12 (38). С. 3—7.
22. Маскаева Л. Н., Иванов П. Н., Марков В. Ф. Получение твердых растворов замещения $Cu_{1-x}Pb_xS$ из водных сред // *Неорганические материалы*. 2002. Т. 38, № 9. С. 1037.
23. Марков В. Ф., Маскаева Л. Н., Китаев Г. А. Кинетика химического осаждения PbS в присутствии галогенидов аммония, микроструктура и электрофизические свойства пленок // *Журнал прикладной химии*. 2000. Т. 73. № 8. С. 1256.
24. Мошников В. А., Грачева И. Е., Аньчиков М. Г. Исследование наноматериалов с иерархической структурой, полученных золь-гель методом // *Физика и химия стекла*. 2011. Т. 37. № 5. С. 672—684.
25. Тарасов С. А., Грачева И. Е., Гареев К. Г., Гордюшенков О. Е., Ламкин И. А., Менькович Е. А., Мошников В. А., Преснякова А. В. Атомно-силовая микроскопия и фотолюминесцентный анализ пористых материалов на основе оксидов металлов // *Изв. вузов. Электроника*. 2012. № 2 (94). С. 21—26.
26. Maenosono S., Dushkin C. D., Saita S., and Yamaguchi Y. Growth of a Semiconductor Nanoparticle Ring during the Drying of a Suspension Droplet // *Langmuir*. 1999. V. 15. N 4. P. 957—965.

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

КОНТРОЛЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Поступила в редакцию 20.09.2012

Представлена методика измерения и расчета сжимающих и растягивающих внутренних механических напряжений и модуля Юнга в однослойных и композиционных мембранных структурах на основе тонких пленок различных материалов. Приведены результаты измерения механических напряжений и модуля Юнга пленок различных материалов.

Ключевые слова: внутренние напряжения, тонкие пленки, свойства тонких пленок, способы измерения механических напряжений, модуль Юнга, мембраны

Введение

Внутренние механические напряжения — неотъемлемый фактор процесса осаждения тонких пленок. В структурах тонкая пленка—подложка с вогнутой поверхностью пленка находится под сжимающим напряжением. Такие напряжения принято определять как отрицательные. В структурах тонкая пленка—подложка с выпуклой поверхностью пленка находится под растягивающим напряжением. Такие напряжения называют положительными [1].

В пленках различных материалов механические напряжения могут быть растягивающими (хром, нитрид кремния) или сжимающими (карбид кремния, нитрид алюминия, никель, титан, оксиды различных материалов). Значения и знак механических напряжений также зависят от толщины пленки и параметров технологического процесса осаждения.

Внутренние механические напряжения, возникающая в процессе осаждения тонких пленок, могут приводить к изменению ширины запрещенной зоны (в полупроводниках), влиять на магнитные свойства (в магнитных материалах), являться причиной растрескивания или отслаивания пленок от подложек, вызывать деформацию подложки (при высоком уровне напряжений), а также приводить к снижению чувствительности и работоспособности микросистем, сформированных на основе тонких пленок.

Методы измерения механических напряжений в тонких пленках

Развитие методов измерения механических напряжений обусловлено необходимостью контролировать значения механических напряжений в пленках различных материалов, являющихся основой различных микроструктур.

Выбор метода измерения механических напряжений определяется типом решаемой задачи (эксперимент будет проводиться в процессе получения пленки или по его окончании), типом пленки и материалом подложки.

Существующие методы измерения внутренних механических напряжений можно так подразделить в зависимости от используемого физического явления: дифракционные методы (рентгеновская дифракция или дифракция электронов); механические методы — измерение деформации подложки (метод кантилевера в комбинации с различными системами изгиба балок и тонких пластин); электрические методы (измерение проводимости, емкости и других параметров системы, содержащей структуру тонкая пленка—подложка).

Широко применяют метод рентгеновской дифракции [2, 3], основанный на определении разницы данных о положении, ширине и интенсивности дифракционных пиков от деформированных и недеформированных решеток [1].

Самым распространенным является метод измерения самопроизвольного изгиба подложки под действием напряжений пленки. Но такой метод применим только для пленок, напряжения в которых настолько велики, что изгиб подложки может быть зафиксирован и измерен. Это одна из разновидностей механического метода. Регистрация деформации может осуществляться как оптическими интерференционными методами, так и электрическими — емкостными или индукционными.

В технологии поверхностной микромеханики применяется метод измерения самопроизвольной деформации пленки, закрепленной с двух концов. Регистрацию этой деформации осуществляют в основном интерферометрическими способами. В частных случаях, например, когда на подложке создается плоский резонатор, на свободно подвешенный челнок в форме гребенки действует электростатическая сила со стороны приводной гребенки, контроль ее движения осуществляется по изменению емкости, а механические напряжения могут быть определены через резонансную частоту [4].

В объемной микромеханике следует применять методы, основанные на вынужденной деформации пленки под действием внешних сил — давления или электрического воздействия. В таких случаях тонкая пленка жестко закреплена по контуру.

Внутренние механические напряжения могут быть определены путем измерения прогиба пленки при вытравливании в подложке отверстия небольшого диаметра до поверхности пленки [5]. В настоящее время такой метод актуален в связи с использованием мембранных структур различных форм, толщин и материалов с различными свойствами в микромеханических устройствах. В данной работе представлена методика измерения и использования механических параметров тонкопленочных мембран, пригодная для расчета в широком диапазоне механических напряжений. Эта методика реализована в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете.

Методика измерения внутренних механических напряжений в тонкопленочных мембранах

Для определения значений внутренних механических напряжений в тонкопленочных мембранных элементах (рис. 1, а), входящих в состав миниатюрных преобразователей сигнала, была разработана методика измерения и расчета.

Мембрана представляет собой тонкую пленку, жестко закрепленную по контуру. Формируются такие мембраны методами анизотропного травления кремниевой подложки до поверхности пленки.

Если пленка находится под сжимающими механическими напряжениями, то при вытравливании подложки мембрана деформируется с образованием самопроизвольных гофров. Если пленка находится под растягивающими напряжениями, мембрана остается плоской, а для описания прогиба такой структуры под действием подаваемого на нее давления применимо приближенное уравнение для прогиба мембраны [6]:

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

где a — радиус круглой мембраны или половина стороны квадратной мембраны; W — прогиб центра мембраны; h — толщина мембраны; P — приложенное давление; σ_0 — механическое напряжение мембраны; E — модуль Юнга материала мембраны; μ — коэффициент Пуассона; C_0, C_1, C_2 — расчетные коэффициенты, зависящие от формы мембраны [6].

При оценке внутренних механических напряжений первое слагаемое уравнения (1) не учитывается, поскольку экспериментальные оценки показали, что для мембран толщиной менее 1 мкм определяющую роль в эффективной жесткости мембраны играет второе слагаемое уравнения (1).

Методика измерения механических напряжений основана на оптическом способе определения прогиба сверхтонких мембран в зависимости от приложенного к ним статического давления. Для проведения исследования собрана экспериментальная установка, которая включает в себя датчик интерферометрического типа, чувствительный механический элемент и воздушную систему с устройством задания давления.

Разность давления по обе стороны соответствует действующему давлению P , а деформацию в центре мембраны можно охарактеризовать ее прогибом W (рис. 1, б).

Регистрация прогиба мембраны осуществляется с помощью волоконно-оптического датчика на основе интерферометра Фабри—Перо (рис. 2), образованного частично отражающим торцом волокна

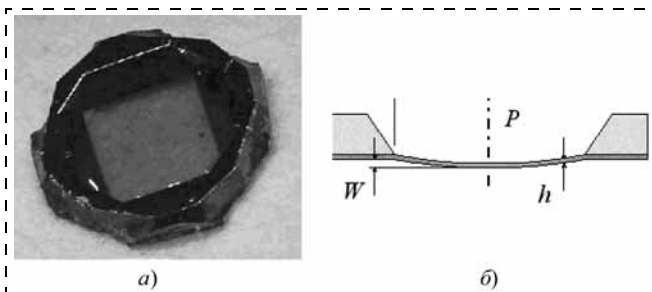


Рис. 1. Плоская мембрана:

а — фотография; б — схематическое изображение

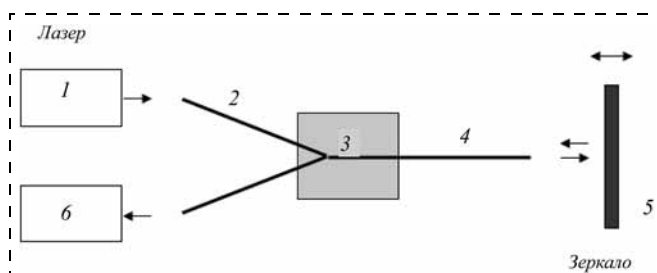


Рис. 2. Структурная схема волоконно-оптического интерферометра

и отражающей поверхностью мембраны, расстояние между которыми изменяется в соответствии с прогибом под действием подаваемого давления.

Излучение лазерного диода 1 вводится в оптическое волокно 2 и через ответвитель 3 передается на оптическое волокно 4. При этом часть излучения отражается от торца оптоволокон 4, а другая его часть высвечивается в воздух, отражается от зеркала (мембрана) 5 и возвращается обратно в оптоволокон 4.

Излучение, отраженное от торца оптоволокон, интерферирует с излучением, отраженным от зеркала, и на фотоприемнике 6 регистрируется интенсивность излучения, которая изменяется в зависимости от расстояния d между торцом волокна и зеркалом [7]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\gamma \sqrt{I_1 I_2} \cos\left(4\pi \frac{d}{\lambda}\right),$$

где I_1 и I_2 — интенсивности излучений, отраженного от торца волокна и возвращенного в волокно после отражения от зеркала соответственно; γ — степень когерентности излучений I_1 и I_2 ; λ — длина волны излучения лазера, равная 1,55 мкм.

Задание давления осуществляется с помощью системы подачи сжатого воздуха.

Плавное изменение давления (в диапазоне 0...10⁵ Па) в системе реализуется с помощью газового натека. Регистрация давления происходит с помощью эталонного датчика, предел измерения которого 0...0,1 МПа. В случаях, когда мембраны имеют повышенную чувствительность, измерения проводят на низких давлениях. Для задания низких давлений необходимо использовать более прецизионную систему, реализованную на принципе изменения давления в системе водяного столба.

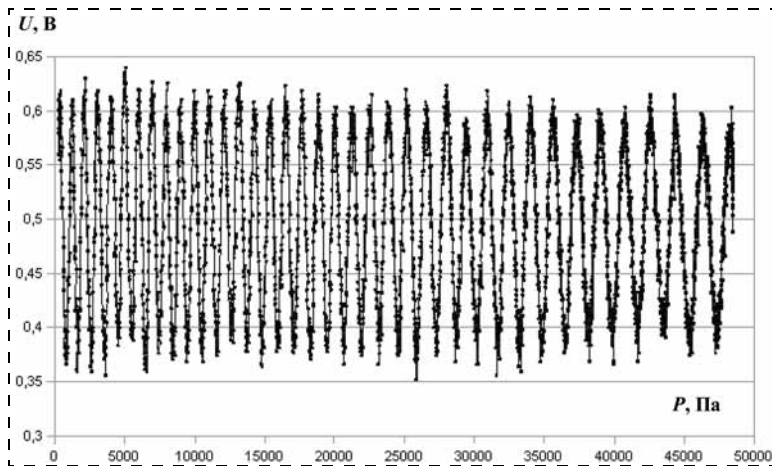


Рис. 3. Зависимость сигнала с фотоприемника от сигнала с датчика давления для плоской однослойной мембраны (Si_3N_4)

Съем сигнала осуществляется одновременно с датчика давления и с оптического датчика, регистрирующего изменение прогиба мембраны (рис. 3).

Получаемый сигнал носит аperiодический характер, что связано с нелинейным характером уравнения (1).

Методика расчета внутренних механических напряжений в тонких пленках

Для расчета внутренних механических напряжений в пленках по полученным экспериментальным значениям строят зависимость прогиба мембраны от приложенного к ней давления, используя данные о периоде интерференции при конкретных значениях давления (рис. 4).

Каждый период интерференции соответствует изменению прогиба мембраны ΔW или половине длины волны используемого излучения.

Для исследуемой мембраны входным сигналом является подаваемое на нее давление, а выходным сигналом — прогиб мембраны. Таким образом, можно вычислить дифференциальную чувствительность за один период интерференции:

$$S = \frac{\Delta W}{\Delta P} = \left(\frac{1}{2} \lambda \right) \frac{1}{\Delta P}, \quad (2)$$

где ΔP — изменение давления в пределах периода интерференции.

Чувствительность определяют для каждого периода интерференции на линейном участке зависимости (рис. 4), после чего находят среднее значение чувствительности мембраны к давлению.

Внутренние механические напряжения определяются по второму слагаемому уравнения (1) с учетом дифференциальной чувствительности:

$$\sigma_0 = \frac{a^2}{C_1 h S}.$$

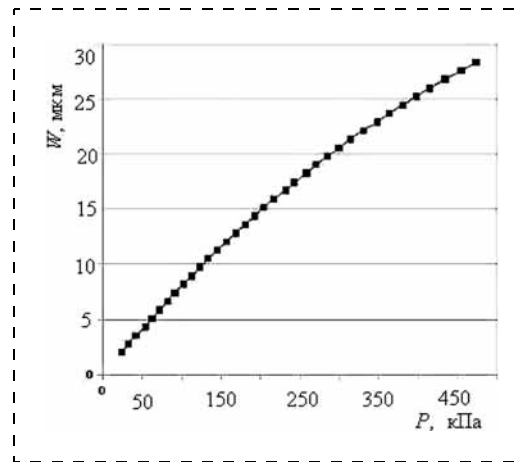


Рис. 4. Зависимость прогиба мембраны W от подаваемого на нее давления P

На высоких давлениях зависимость прогиба тонкой мембраны от давления нелинейна, поэтому на этом участке зависимости можно определить значение модуля Юнга:

$$E = \frac{Pa^4(1 - \mu^2) - C_1 \sigma_0 h W a^2(1 - \mu^2)}{(C_2 h W^3)}. \quad (3)$$

Предложенная методика позволяет вычислять значения напряжений не только для однослойных мембран, но и для композиционных структур.

Методика расчета внутренних механических напряжений бислойной тонкопленочной мембраны

Для композиционной мембраны, состоящей из двух слоев, суммарное значение внутреннего напряжения определяется из соотношения

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

где σ_Σ — эффективное значение внутреннего напряжения композиционной мембраны; $\sigma_1, h_1, \sigma_2, h_2$ — значения внутреннего механического напряжения и толщины первого и второго слоев соответственно.

Такая методика основана на предварительном определении внутренних механических напряжений в первом слое композиционной мембраны.

Аналогичное выражение существует и для определения модуля Юнга:

$$E_\Sigma = \frac{E_1 h_1 + E_2 h_2}{h_1 + h_2},$$

где E_Σ — суммарное значение модуля Юнга композиционной мембраны; E_1, h_1, E_2, h_2 — значения модуля Юнга и толщины первого и второго слоев соответственно.

Погрешность измерений определяется по методике для косвенных измерений. В этом случае наибольший вклад вносит погрешность определения толщины пленки, поэтому точности определения толщины следует уделять особенное внимание.

Расчет модуля Юнга высокочувствительных мембран

В случае высокочувствительных мембран и композиционных структур, напряжения в которых близки к нулю, увеличивается число периодов на зависимости сигнала с фотоприемника от подаваемого давления (см. рис. 3), поэтому измерения целесообразно проводить в диапазоне давлений до 10^3 Па. При этом расчет механических напряжений осуществляют по той же методике.

У таких мембран зависимость прогиба центра мембраны от подаваемого давления носит ярко выраженный нелинейный характер (рис. 5), а определение абсолютного значения прогиба мембраны затруднено. Поэтому при определении модуля Юнга в качестве значения прогиба следует использовать расчетное значение, выраженное через дифференциальную чувствительность:

$$W = \frac{3P}{\left(\frac{\Delta P}{\Delta W} + C_1 2 \frac{\sigma_0 h}{a^2}\right)}.$$

Таким образом, исключается систематическая ошибка, связанная с неточностью определения абсолютного значения прогиба мембраны.

За счет совокупности этих методик можно определить модуль Юнга и механические напряжения в тонкопленочных мембранах. Однако при оценке следует учитывать некоторые ограничения применимости методики. В случае сжимающих механических напряжений применение методики затруднено вследствие деформации мембраны под действием внутренних сил. Но при использовании комбинации слоев с напряжениями различных знаков сжимающие напряжения одного из слоев могут быть компенсированы и измерены по методике, разработанной для композиционных мембран.

Методика применима к структурам, в которых жесткость определяется преимущественно внутренними механическими напряжениями. Как правило, это мембраны толщиной до 1 мкм.

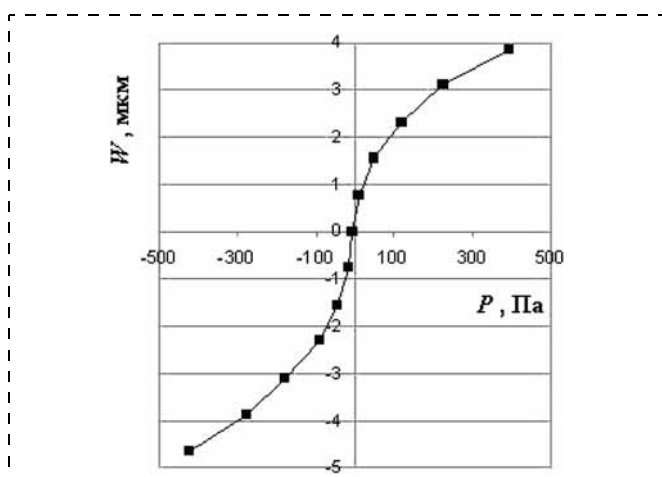


Рис. 5. Зависимость прогиба тонкопленочной мембраны от давления при $\sigma_{\Sigma} \approx 0$

Оценка критических механических напряжений тонкопленочных мембран

Рассмотренную методику можно использовать для оценки прочностных характеристик тонкопленочных мембран. Разрыв мембран, как правило, происходит при давлениях, когда определяющую роль играют нелинейные деформации. Критические механические напряжения тонкопленочных мембран могут быть оценены из уравнения (1) с учетом линейных и нелинейных деформаций:

$$\sigma_{кр} = \frac{P_{кр} a^2}{C_1 h W_{кр}},$$

где $P_{кр}$ — критическое давление, при котором происходит разрыв мембраны; $W_{кр}$ — прогиб центра мембраны, соответствующий критическому давлению.

Сжимающие механические напряжения в тонких пленках

Пленки с высокими сжимающими напряжениями под действием внутренних сил локально отслаиваются от подложки, что в случае недостаточной адгезии приводит к образованию "пузырей" (рис. 6, а). С течением времени или под действием механических, химических воздействий на пленку в ходе дальнейшего технологического процесса формирования устройства такие "пузыри" разрушаются, что приводит к отслаиванию пленки и в случае композиции из нескольких слоев к скручиванию ее в трубки (рис. 6, б).

Поскольку каждый пузырь представляет собой пленку, закрепленную по краям, структуру в данной локальной области можно рассматривать как мембрану, прогнувшуюся только под действием сжимающих напряжений, без влияния внешнего давления. Эти напряжения можно оценить по уравнению (1):

$$\sigma_0 = -\frac{C_2 W^2 E}{C_1 (1 - \mu^2) a^2}. \quad (4)$$

Полученное выражение позволяет оценить значения сжимающих механических напряжений в области "пузыря". Например, тонкие пленки тита-

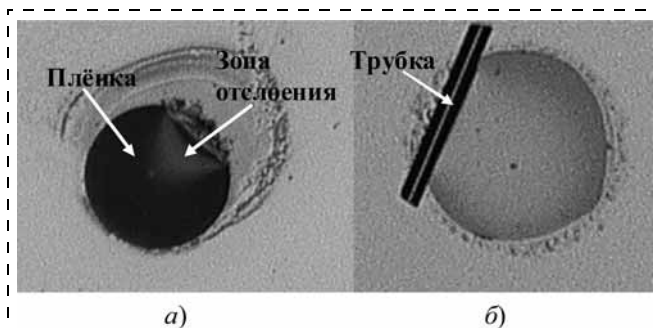


Рис. 6. Сжимающие механические напряжения в тонких пленках: а — образование "пузырей" в тонкой пленке; б — микротрубка, сформированная за счет скручивания тонкой пленки

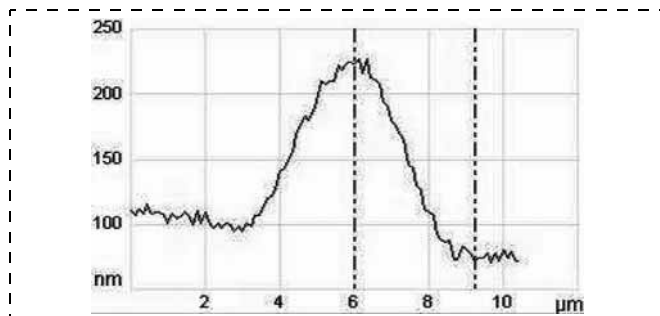


Рис. 7. Определение радиуса "пузыря" и прогиба пленки с помощью атомно-силового микроскопа

на (Ti), отслоившиеся от подложки с образованием таких "пузырей", были исследованы с помощью атомно-силового микроскопа (рис. 7). Был определен радиус "пузыря" a и локальный прогиб W .

Использование уравнения (4) позволило определить сжимающие механические напряжения в тонкой пленке титана. Результаты представлены в таблице.

Оценка сжимающих механических напряжений в тонкопленочных мембранах

Мембраны на основе тонких пленок со сжимающими напряжениями формируются деформированными (рис. 8), с образованием самопроизвольных гофров, количество и глубина которых зависят от значения сжимающих механических напряжений мембраны.

Задача определения механических напряжений в таких структурах сводится к определению удлинения деформированной мембраны по сравнению с плоской.

Реальные профили мембраны в основном носят сложный характер, поэтому относительное удлинение целесообразно определять следующим образом:

$$\Delta L = \sum_n \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} - L,$$

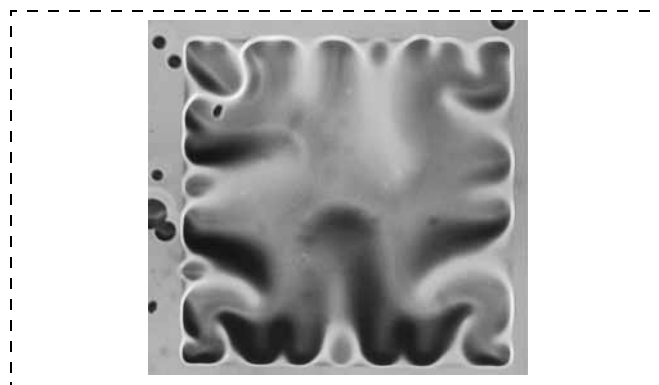


Рис. 8. Мембрана, деформированная под действием сжимающих напряжений

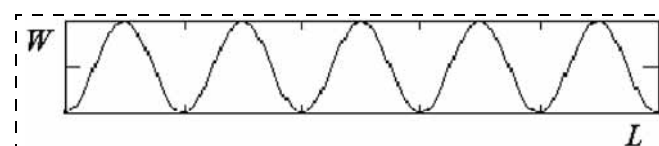


Рис. 9. Функция, описывающая профиль прогиба мембраны под действием сжимающих напряжений

где L — длина линии сканирования по оси X вдоль стороны мембраны; а x_i и y_i — координаты точек на кривой прогиба мембраны.

Однако для упрощения методики определения напряжений профиль прогиба мембраны можно представить в виде функции:

$$y(x) = \frac{W}{2} \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi nx}{L}\right) \right),$$

где n — число периодов прогиба по длине сканирования L .

Общий вид такой функции представлен на рис. 9, где по оси X — длина линии сканирования L , а по Y — локальный прогиб мембраны W .

Внутренние механические напряжения могут быть определены из увеличения длин профиля искривлен-

Результаты исследования внутренних механических напряжений пленок различных материалов

Материал	Метод осаждения пленки	Способ определения напряжений	Толщина пленки, нм	Знак напряжений	Напряжения, МПа	Модуль Юнга $\times 10^{12}$ Па
SiC	Магнетронное осаждение, давление рабочего газа 0,13 Па	Для композиционных мембран	260	"—"	—100	0,5
Cr	Магнетронное осаждение, давление рабочего газа 0,95 Па, температура 100 °C	Для композиционных мембран	100	"+"	650	0,2
Ti	Магнетронное осаждение, давление рабочего газа 0,1 Па	По "пузырю"	100	"—"	—200	—
Si ₃ N ₄	Химическое осаждение из газовой фазы	Для монослойных мембран	240	"+"	650	0,18
Полиимид (ДФ-бензидин)	Метод Ленгмюра—Блоджетт	Для композиционных мембран	9	"—"	—1230	—

ной мембраны по отношению к плоской мембране в соответствии с приведенным выражением

$$\sigma_0 = \frac{\pi^2 n^2 W^2}{4L^2} E,$$

где L — длина линии сканирования по оси X вдоль стороны мембраны; n — число периодов на линии сканирования L ; E — справочное значение модуля Юнга материала мембраны.

Такая методика позволяет оценить сжимающие напряжения в тонкопленочных структурах с искривленной мембраной.

Примеры применения методики для определения механических напряжений и модуля Юнга

С помощью описанной выше методики исследовали однослойные и композиционные мембранные структуры на основе тонких пленок различных материалов, полученных разными методами и имеющих напряжения разных знаков. Результаты измерений для пленок различных материалов представлены в таблице.

Заключение

Определение внутренних механических напряжений является важной задачей в тонкопленочной технологии и в микромеханике, поскольку информация о значениях механических напряжений позволяет корректировать параметры технологического процесса осаждения пленок, а также конструкцию изделий, включающих в себя тонкопленочные элементы.

Методика, разработанная для тонкопленочных мембран, позволяет определять:

- растягивающие внутренние механические напряжения в монослойных и композиционных мембранах;
- сжимающие механические напряжения;
- критические напряжения мембраны;
- модуль Юнга тонких пленок.

По разработанной методике определены значения внутренних механических напряжений и модуля Юнга материалов различной химико-физической природы.

Работа выполнена при поддержке грантов Министерства образования и науки Российской Федерации по теме "Физико-технологические основы формирования высокочувствительных нано- и микромембранных элементов", соглашение № 14.B37.21.0082, и по теме "Физико-технологические основы управления механическими напряжениями в микро- и наноструктурах для создания высокочувствительных микромеханических систем", соглашение № 14.132.21.1691, в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 годы и Программы стратегического развития университета (СПбГЭТУ "ЛЭТИ") "Развитие междисциплинарных исследований и инструментально-технологической базы как основа непрерывного инженерного образования по приоритетным направлениям российской экономики" на 2012—2016 годы.

Список литературы

1. Tamulevičius S. Stress and strain in the vacuum deposited thin films // Vacuum. 1998. V. 51, N 2. P. 127—139.
2. Gottfried K., Kriz J., Werninghaus T., Thumer M., Kaufmann Ch., Zahn D. R. T., Gressner T. Film stress measurement for high temperature micromechanical and microelectrical application based on SiC // Material Science and engineering. 1997. B46. P. 171—175.
3. Vink T. J., Walrave W., Daams J. L. C., Dirks A. G., Somers M. A. J., van den Aker K. J. A. Stress, strain, and microstructure in thin tungsten films // J. Appl. Phys. July 1993. V. 74 (2), N 15. P. 988—995.
4. Madow M. Fundamentals of Microfabrication. London, New York, Washington D. C.: CRC Press, Boca Raton, 1997. 589 p.
5. Механические напряжения в тонких пленках. Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1981. Вып. 8 (798).
6. Корляков А. В. Сверхтонкие мембраны в микросистемной технике // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 8 (85). С. 17—26.
7. Ветров А. А., Комиссаров С. С., Корляков А. В., Сергушичев А. Н. Волоконно-оптический вибродатчик на основе микрооптомеханического преобразователя // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 8 (85). С. 8—13.

УДК 621.382

А. В. Афанасьев¹, канд. техн. наук, доц.,
Ю. А. Демин¹, ст. науч. сотр.,
Б. В. Иванов¹, канд. техн. наук, доц.,
В. А. Ильин¹, канд. техн. наук, доц.,
А. Ф. Кардо-Сысоев², д-р физ.-мат. наук,
гл. науч. сотр.,
В. В. Лучинин¹, д-р техн. наук, проф.,
А. А. Смирнов¹, аспирант,
e-mail: smirnov.cmid@mail.ru, ilyincmid@gmail.com,
bvivanov@yandex.ru

¹ Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет "ЛЭТИ"

² Физико-технический университет
им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук,
г. Санкт-Петербург

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ МИНИАТЮРНЫЙ КАРБИДОКРЕМНИЕВЫЙ ИСТОЧНИК НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКОГО И МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЙ

Поступила в редакцию 20.09.2012

Представлены результаты разработки, создания и экспериментальных исследований компонента полупроводниковых генераторов высоковольтных наносекундных импульсов для генерации рентгеновского и микроволнового излучений. Базовым компонентом системы генерации импульсов электромагнитного излучения является разработанный дрейфовый диод с резким восстановлением свойств нового поколения, реализованный на многослойной эпитаксиальной карбидокремниевой структуре, что позволяет в схеме генератора обеспечить скорость нарастания напряжения на уровне единиц вольт на пикосекунду и амплитуды импульсов до 2 кВ.

Ключевые слова: системы генерации, рентгеновское и микроволновое излучения, дрейфовый диод с резким восстановлением, генератор наносекундных импульсов, карбид кремния

Введение

Развитие технологий, связанных с созданием эффективных автоэмиссионных микро- и наноразмерных источников электронов на основе упорядоченных массивов углеродных нанотрубок, микроострий и нитевидных кристаллов на поверхности полупроводников (алмаза, карбида кремния и др.) [1, 2], сти-

мулировало значительный рост исследований, направленных на разработку микросистем, включающих твердотельные вакуумные микроприборы — источники излучения рентгеновского, миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Создание таких источников предполагает необходимость разработки компактных полупроводниковых высоковольтных генераторов сверхкоротких импульсов (СКИ) наносекундной и субнаносекундной длительности, способных работать в частотном режиме.

Известны два основных подхода к генерированию мощных импульсов нано- и субнаносекундной длительности: в первом из них энергия накапливается в емкостных накопителях с последующей передачей через размыкающий ключ в нагрузку, а во втором — накопленная энергия в магнитном поле индуктивных элементов коммутируется в нагрузку через размыкающий ключ. Перспективным методом формирования импульсов высокого напряжения наносекундной длительности является использование дрейфовых диодов с резким восстановлением запирающих свойств (ДДРВ) в качестве полупроводникового размыкающего ключа в схеме генератора с индуктивным накопительным элементом. Впервые возможность формирования наносекундных импульсов с помощью кремниевого ДДРВ была продемонстрирована в работе [3].

Недостатком ДДРВ на основе Si является, с одной стороны, относительно невысокое быстродействие, связанное с ограничениями, определяемыми значениями критической напряженности поля лавинного пробоя в кремнии ($E_c = 2,5 \cdot 10^5$ В/см) и скоростью насыщенного дрейфа носителей заряда в этом материале ($V_{sat} = 1,0 \cdot 10^7$ см/с), с другой — ограничениями по предельной плотности коммутируемого тока через структуру дрейфового диода. Так, для реализации высоковольтного режима работы кремниевого переключателя с напряжением 1500 В на одну диодную структуру уровень донорной примеси N_d в n -базе диода не может превышать 10^{14} см⁻³, что на стадии обрыва тока соответствует максимальной плотности тока $j = 160$ А/см² при дрейфовом выносе носителей из базовой области со скоростью насыщенного дрейфа $V_{sat} = 1 \cdot 10^7$ см/с. Отмеченные недостатки обусловлены фундаментальными ограничениями, определяемыми электрофизическими свойствами кремния, используемого для создания описанных выше диодов.

Дальнейшее улучшение функциональных параметров генераторов СКИ связано с применением новых полупроводниковых материалов для ключевых элементов — размыкателей тока. Эффект сверхбыстрого обрыва тока наблюдался ранее на диодных структурах арсенид-галлиевых [4] и карбид-кремниевых [5] ДДРВ. По-видимому, именно карбид кремния на данном этапе является наиболее перспективным материалом для создания элементной базы высоковольтных мощных генераторов СКИ для микросистем. Действительно, ширина запрещенной зоны у политипа 4H-SiC равна 3,24 эВ, т. е. значительно больше, чем у кремния (1,12 эВ), и поэтому предельная рабочая температура (~500 °C) у 4H-SiC-диодов, ограничиваемая скоростью тепловой генерации носителей заряда, у SiC-диодов примерно в три раза выше, чем у кремниевых аналогов. Скорость восстановления напряжения в фазе обрыва тока dU/dt является главным параметром ДДРВ:

$$(dU/dt)_{\max} = E_{br} v_{sat}$$

где E_{br} — пробивная напряженность электрического поля; v_{sat} — скорость насыщенного дрейфа носителей [6]. Напряженность поля пробоя SiC почти в девять раз больше напряженности поля пробоя в кремнии, а скорость насыщенного дрейфа носителей заряда больше в два раза, поэтому, на основании упрощенной оценки, полупроводниковые ключи на основе карбида кремния должны переключаться в ~18 раз быстрее кремниевых. Более высокая, чем у кремния, теплопроводность SiC, наряду с высокой рабочей температурой, должны обеспечить увеличение частоты следования импульсов в генераторах СКИ на основе 4H-SiC ДДРВ. Перечисленные преимущества SiC-диодов дают возможность исключить из схем генераторов СКИ используемые в настоящее время наиболее нестабильные элементы — лавинные обострители: диодные (SAS — Silicon Avalanche Shapers) или динисторы с быстрой ионизацией (FID — Fast Ionization Dynistor). В данной работе исследуются характеристики переключения 4H-SiC-диодов с резким восстановлением в схеме генератора наносекундных импульсов с субнаносекундным передним фронтом.

Результаты эксперимента

Исследуемые образцы ДДРВ представляли собой структуры n^+-p-p^+ -типа с толщиной p -базы 15 мкм и уровнем легирования $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Толщина сильнолегированного p^+ -слоя составляла 5 мкм с концентрацией $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Оптимизация структуры диода проводилась с помощью пакета TCAD Synopsys. При моделировании учитывались эффекты неполной ионизации, сильной инжекции, сильного легирования, лавинной генерации.

Одним из важнейших параметров диода, предназначенного для работы в качестве быстродейст-

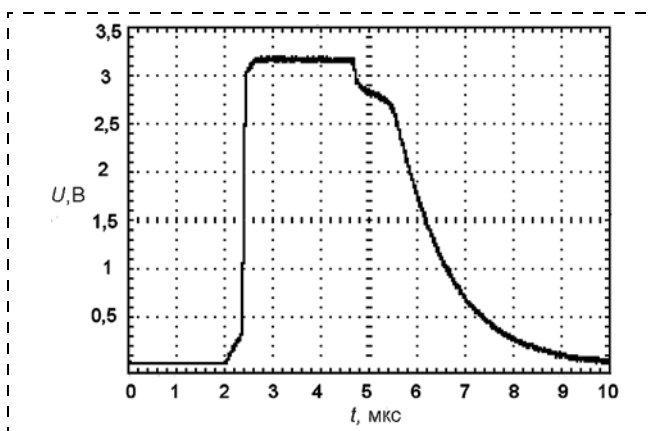


Рис. 1. Осциллограмма напряжения на 4H-SiC-диоде

вующего ключа, является время жизни τ неравновесных носителей заряда в базе диода. Время жизни инжектированных носителей должно быть достаточным для того, чтобы при короткой импульсной двухсторонней инжекции в диоде носители не успевали бы рекомбинировать до момента их выведения из базы при переключении. Измерение времени жизни проводилось по методу затухания постинжекционной ЭДС [7]. На рис. 1 представлена осциллограмма напряжения на одной из диодных структур при пропускании импульса прямого тока.

Падение напряжения на диоде составило 3,2 В. Характерным на осциллограмме является линейный спад постинжекционной ЭДС за счет рекомбинации неосновных носителей в базе. На линейном участке скорость спада ($\Delta V/\Delta t$) обратно пропорциональна времени жизни носителей в базе:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -\frac{2kT}{q} \frac{1}{\tau},$$

где kT — тепловая энергия; q — элементарный заряд. При комнатной температуре измеренное время жизни τ для исследованных структур лежит в пределах 0,2...0,3 мкс. Эти параметры позволили сформулировать требования к длительностям импульсов токовой накачки диода.

Измеренные вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные характеристики ДДРВ-диодов соответствуют классическим характеристикам 4H-SiC $p-n$ -перехода. В области малых токов прямой ветви ВАХ коэффициент неидеальности равен 2. Диоды открываются при напряжении 2,6...2,7 В.

На рис. 2 представлена схема генератора наносекундных импульсов с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым размыкающим ключом. В первоначальном состоянии конденсатор C_1 заряжен до напряжения источника питания V_{cc} . Когда происходит замыкание ключа, заряд, накопленный в конденсаторе C_1 , частично разряжается и происходит накачка диода D_1 прямым током. На второй стадии ключ размыкается и в цепи происходит перезарядка с периодом колебаний, определяемым индуктивностью L_2 и паразитной емкостью.

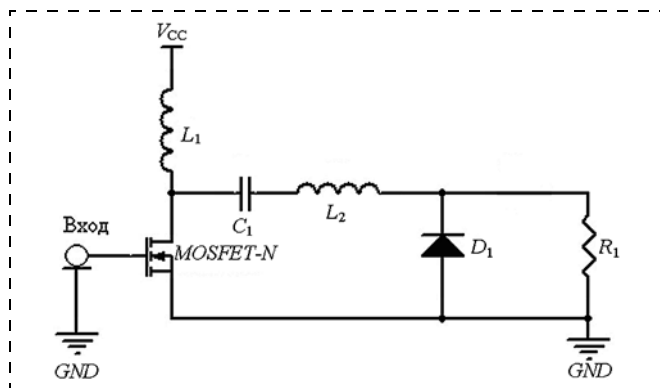


Рис. 2. Схема генератора с 4H-SiC ДДРВ в качестве размыкающего ключа

стью транзисторного ключа C_{stray} . При этом катушка индуктивности L_2 накапливает протекающий заряд, и при достижении максимального тока разряда диода D_1 происходит восстановление его обратного сопротивления и энергия, накопленная в L_2 , переходит в нагрузку, на которой формируется импульс напряжения. Амплитудные и временные параметры выходного импульса на нагрузке определяются контуром накачки и характеристиками используемого диода.

Измерения характеристик переключения проводились на специализированном стенде. Выходные импульсы на нагрузке 50 Ом регистрировались цифровым стробоскопическим осциллографом Tektronix DSA8300 с полосой пропускания 20 ГГц. Для ослабления сигнала до нужного уровня перед его подачей на осциллограф использовался высоковольтный СВЧ аттенуатор с коэффициентом передачи -86 дБ.

В качестве иллюстрации на рис. 3 приведена экспериментальная осциллограмма выходного импульса генератора СКИ, полученная при настройках, обеспечивающих амплитуду импульса, на ~ 400 В меньшую, чем напряжение пробоя структуры. Из рис. 3 видно, что полная амплитуда выходного импульса составляет 1650 В. Длительность переднего фронта составляет 700 пс при перепаде напряжения 1100 В. Таким образом, скорость переключения ДДРВ составила $\sim 1,5$ В/пс.

Заключение

Экспериментальное исследование карбидокремниевых дрейфовых диодов с резким восстановлением, разработанного и созданного на основе многослойной эпитаксиальной структуры, показало возможность получения высоковольтных импульсов напряжения наносекундной длительности на стандартной нагрузке 50 Ом. Миниатюрный генератор может использоваться в системах импульсного

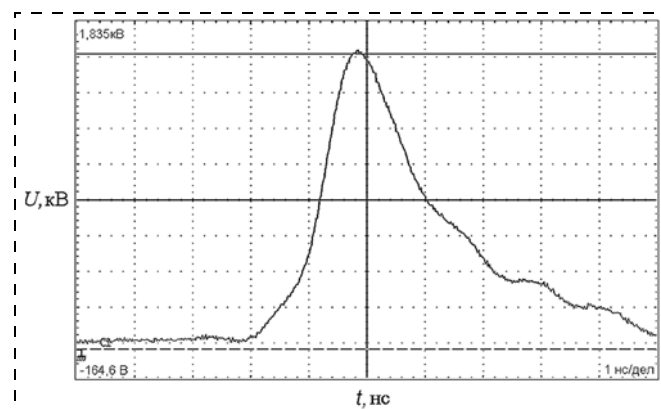


Рис. 3. Осциллограмма напряжения на нагрузке 50 Ом: по оси абсцисс 1 нс/дел, по оси ординат 200 В/дел

питания источников рентгеновского и микроволнового излучений. Дальнейшее улучшение параметров генератора импульсов заключается в увеличении максимальной амплитуды сигнала на нагрузке путем последовательной коммутации отдельных ДДРВ в модули и оптимизации структуры генератора в целях сокращения времени их переключения.

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

Список литературы

1. Вартепов С., Ильичев Э., Набиев Р. и др. Оборудование и технология получения функциональных наноразмерных структур эмиссионной электроники // Успехи нанотехнологии: электроника, материалы, структуры / Под ред. Дж. Дэвиса, М. Томпсона. М.: Техносфера, 2011. С. 406–432.
2. Fang X., Bando Y., Gautam U. K., Ye C. Inorganic semiconductor nanostructures and their field-emission application // J. Mater. Chem. 2008. N 18. P. 509–522.
3. Грехов И. В., Ефанов В. М., Кардо-Сысоев А. Ф. Формирование высоковольтных наносекундных перепадов напряжения на полупроводниковых диодах // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. Вып. 7. С. 435.
4. Корольков В. И., Рожков А. В., Петропавловская Л. А. Высоковольтные арсенидгаллиевые диоды с субнаносекундными временами восстановления блокирующего напряжения // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 17. С. 46–50.
5. Грехов И. В., Иванов П. А., Константинов А. О. О возможности создания диода со сверхрезким восстановлением запирающих свойств на основе карбида кремния // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 13. С. 24–29.
6. Kardo-Sysoev A. F., Bryleysky V. I., Lelikov Y. S., Smirnova I. A., Zazulin S. V. Generation and Radiation of Powerful Nanosecond and Subnanosecond Pulses at High Pulse Repetition Rate for UWB System // Inter. Conf. Euroem 2000, Edinburg, Scotland, UK, 30 May – 2 June, 2000.
7. Gossick B. R. On the transient Behavior of Semiconductor Rectifiers // J. Appl. Phys. 1956. V. 27. P. 905.

УДК 621.382; 621.3.032

А. В. Корляков, д-р техн. наук, проф.,
Е. М. Устинов, инженер ЦМИД,
 e-mail: e.ustinov@mail.ru,
 Санкт-Петербургский государственный
 электротехнический университет "ЛЭТИ"
 им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)

КРИТЕРИИ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОДАТЧИКОВ

Поступила в редакцию 28.09.2012

Рассматриваются способы одновременного расширения диапазона частот и повышения чувствительности вибродатчиков, содержащих в своей конструкции механические преобразователи (трансформаторы). Рассмотрены варианты применения механических преобразователей, отмечены их преимущества и недостатки. Указаны критерии оптимизации, которые следует учитывать при разработке подобных устройств.

Ключевые слова: вибродатчики, критерий оптимизации, механический трансформатор, эквивалентная электрическая схема

Введение

При проектировании акселерометров, имеющих высокую чувствительность, разработчик наталкивается на противоречие: повышение чувствительности сопровождается снижением прочности чувствительного элемента, а расширение рабочего диапазона частот накладывает ограничения на жесткость и массу его конструкции. Данные параметры взаимосвязаны и не могут быть улучшены по отдельности. Использование в схеме датчика контура отрицательной обратной связи (ООС) за счет возрастания жесткости механической системы позволяет измерять ускорения в более широком частотном диапазоне, но при этом снижается чувствительность датчика в измеряемом диапазоне частот [1].

Критерий оптимизации вибропреобразователя с механическим трансформатором

Рассмотрим взаимосвязь чувствительности вибродатчика и его резонансной частоты, применив уравнение движения для колебательной системы с одной степенью свободы [2]. Смещение x инерционной массы m под действием силы $F = ma$ определяется по уравнению

$$m\ddot{x} + \lambda\dot{x} + kx = F, \quad (1)$$

где k — коэффициент упругости пружины; λ — коэффициент трения.

При измерении смещения x в качестве выходного сигнального параметра чувствительность вибропреобразователя определяется как отношение x к измеряемому ускорению a :

$$s = x/a. \quad (2)$$

Смещение маятника в диапазоне частот до первого резонанса определяется как

$$x = \frac{F}{k} = \frac{ma}{k}. \quad (3)$$

Резонансная частота маятника ω_0 при малых значениях параметра λ будет

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (4)$$

Из приведенных выражений определяется взаимосвязь параметров чувствительности и резонансной частоты:

$$s\omega_0^2 = 1. \quad (5)$$

Полученное выражение определяет физическое ограничение на повышение чувствительности вибродатчика при заданном диапазоне рабочих частот. Повысить чувствительность можно лишь при уменьшении резонансной частоты и, следовательно, рабочего диапазона частот преобразователя.

Подобное ограничение можно попытаться устранить, если использовать в конструкции датчика элементы со свойством механического усиления, например рычажные элементы, которые позволили бы преобразовывать малое перемещение первого звена конструкции в заметно большее перемещение элемента, с которого снимается выходной сигнал. По свойствам такие элементы следует приближать к свойствам идеального рычага: они не должны иметь значительную массу и должны быть довольно жесткими.

Основная роль данного преобразовательного элемента — обеспечить в механической системе изменение сил и перемещений без накопления или потерь энергии в самом преобразовательном элементе. Свойства рычага (рис. 1) аналогичны свойствам электрического трансформатора, в свя-

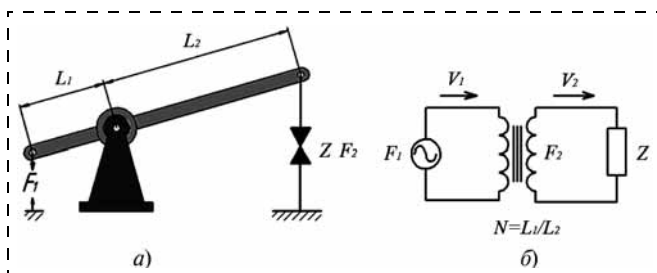


Рис. 1. Конструкция механического рычага (а) и его эквивалентная электрическая схема (б)

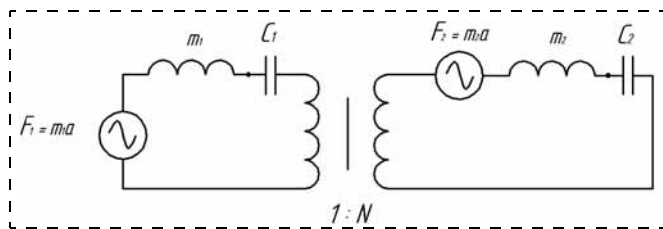


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема механического трансформатора с простыми колебательными системами на его участках:

F_1, F_2 — силы инерции, действующие на массы; m_1, m_2 — массы элементов, закрепленных на концах рычага; C_1, C_2 — гибкости подвесов элементов

зи с чем рычаг называют механическим трансформатором [3]. Подобные свойства имеют и механо-акустические преобразователи.

Для разрабатываемой конструкции критерием оптимизации может служить выражение (5) — произведение квадрата резонансной частоты ω_0^2 на чувствительность s вибродатчика, которое для простого вибродатчика (маятник на пружине) равно единице. Повышение критерия $s\omega_0^2$ может указывать на эффективность применяемой конструкции трансформатора.

Эквивалентная электрическая схема механического трансформатора, в цепи которого включены индуктивности и емкости, эквивалентные массам и гибкостям подвижных элементов на концах рычага, показана на рис. 2.

После приведения [4] эквивалентной схемы (рис. 2) к вторичному плечу преобразователя получим (рис. 3):

$$F_1^* = F_1 N; C_1^* = C_1 / N^2; m_1^* = m_1 N^2, \quad (6)$$

где m_1 — масса груза на первичном плече преобразователя.

Резльтирующие масса и жесткость такой схемы:

$$m_\Sigma = m_1 N^2 + m_2; k_\Sigma = k_1 N^2 + k_2, \quad (7)$$

где k_1, k_2 — жесткости (величины, обратные C_1, C_2).

Чувствительность к ускорению, измеряемому во вторичной цепи преобразователя,

$$s = \frac{x}{a} = \frac{F_\Sigma}{k_\Sigma a} = \frac{m_1 N + m_2}{k_1 N^2 + k_2}. \quad (8)$$

Резонансная частота

$$\omega_0 = \sqrt{k_\Sigma / m_\Sigma}. \quad (9)$$

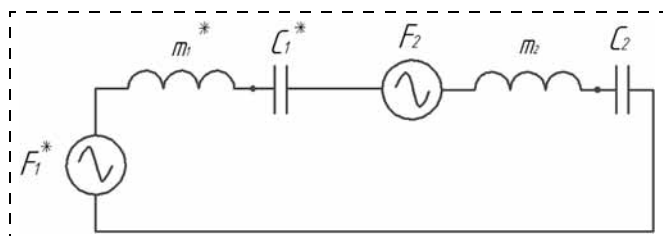


Рис. 3. Приведенная электрическая схема механического трансформатора с инерционными элементами

Критерий оптимизации $s\omega_0^2$ системы с механическим трансформатором

$$s\omega_0^2 = \frac{m_1 N + m_2}{m_1 N^2 + m_2}. \quad (10)$$

Выражение (10) показывает, что при коэффициенте трансформации N , меньшем единицы, критерий $s\omega_0^2 \approx 1/N$ в N^{-1} раз может превосходить тот же критерий для простой колебательной системы, не имеющей в составе механический трансформатор. Необходимый результат достигается при условии, что

$$m_1 N^2 \gg m_2. \quad (11)$$

При $m_1 N^2 \ll m_2$ получим $s\omega_0^2 \approx 1$ и отсутствие эффекта от применения подобной конструкции.

Выражение (11) показывает, что приведенная масса с первичной стороны трансформатора должна во много раз (с учетом коэффициента трансформации N^2) превосходить массу, содержащуюся во вторичной цепи.

Рассмотрим примеры преобразователей, в которых учитываются изложенные критерии.

Вибропреобразователь с гидромеханическим трансформатором

Гидромеханический трансформатор (рис. 4) позволяет осуществить преобразование смещения инерционной массы первичной мембраны в перемещение вторичной мембраны, с которой снимается выходной сигнал.

Коэффициент трансформации N можно просто определить при условии несжимаемости жидкости в промежутке между мембранами гидромеханического трансформатора:

$$N = \frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}. \quad (12)$$

Использование несжимаемой жидкости, заполняющей промежуточный объем, позволяет без потерь осуществлять трансформацию сил и перемещений.

Упрощенная эквивалентная схема вибропреобразователя с использованием гидромеханического трансформатора показана на рис. 5.

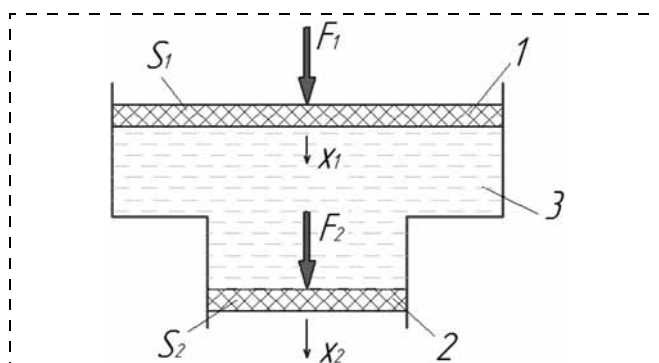


Рис. 4. Гидромеханический трансформатор:

1 — поршень с площадью S_1 ; 2 — поршень с площадью S_2 ; 3 — промежуточный объем

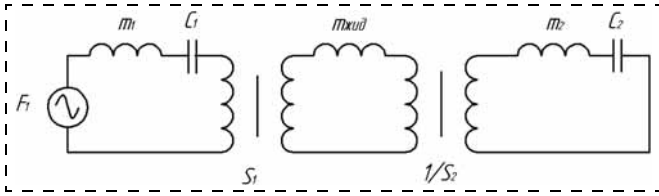


Рис. 5. Эквивалентная схема вибропреобразователя с гидромеханическим трансформатором:

F_1 — действующая сила; m_1, m_2 — массы мембран; C_1, C_2 — гибкости подвесов поршней

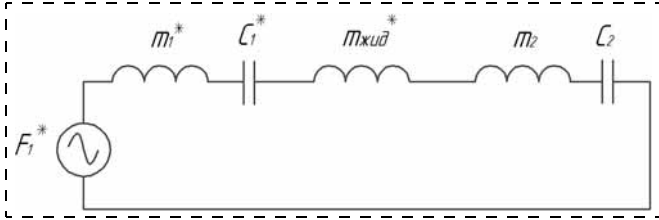


Рис. 6. Приведенная эквивалентная схема вибропреобразователя с гидромеханическим трансформатором

После приведения [4] эквивалентной схемы (рис. 5) к вторичному плечу получим эквивалентную схему (рис. 6) с приведенными параметрами:

$$\begin{aligned} F_1^* &= F_1 S_2 / S_1; \quad C_1^* = C_1 (S_1 / S_2)^2; \\ m_1^* &= m_1 (S_2 / S_1)^2; \quad m_{\text{жид}}^* = m_{\text{жид}}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $m_{\text{жид}}$ — масса жидкости во вторичном канале гидромеханического трансформатора.

Оптимизация работы схемы (рис. 6) преобразования сигнала сводится к получению максимального смещения x_2 второй мембраны, с которой снимается сигнал при заданном внешнем эквивалентном воздействии F_1^* .

Критерий оптимизации $s\omega_0^2$ для данной конструкции в соответствии с выражением (10):

$$s\omega_0^2 = \frac{m_1 N + m_2 + m_{\text{жид}}^*}{m_1 N^2 + m_2 + m_{\text{жид}}^*}. \quad (14)$$

При выполнении условия (11) для данной системы

$$m_1 \frac{S_2^2}{S_1^2} \gg m_2 + m_{\text{жид}}^* \quad (15)$$

можно добиться повышения критерия $s\omega_0^2$ до идеального соотношения

$$s\omega_0^2 = \frac{1}{N} = \frac{S_1}{S_2}. \quad (16)$$

В сравнении с аналогичным выражением (5) для простого вибродатчика мы имеем возможность получить выигрыш в чувствительности в S_1/S_2 раз при фиксированном значении резонансной частоты. Для этого целесообразно увеличивать отношение площадей первичной и вторичной мембран (S_1/S_2). Также

важна, в соответствии с выражением (15), оптимизация значений эффективных масс в первичном и вторичном контурах преобразователя. Такое требование выполняется при значительной инерционной массе в первичной цепи преобразователя, минимальных массах вторичной мембраны и жидкости между мембранами.

Использование жидкости, заполняющей промежуточный объем, призвано минимизировать потери при трансформации сигнала. Однако значительно уменьшить массу жидкости между мембранами конструктивно сложно. Такого недостатка лишен акустомеханический трансформатор, мембраны которого разделены воздушным промежутком.

Вибропреобразователь с акустомеханическим трансформатором

Эквивалентная схема преобразователя с акустомеханическим трансформатором представлена на рис. 7 с учетом упругости воздушного промежутка между мембранами и упругости самих мембран. Упругость воздушного промежутка задается параметром $C_{\text{воз}}$ — сжимаемость воздушного объема между акустомеханическими мембранными преобразователями:

$$C_{\text{воз}} = V / \gamma P,$$

где V — объем воздушного промежутка; P — давление воздуха; $\gamma = 1,4$.

В результате приведения параметров элементов схемы (рис. 7) к механической части второй мембраны получим эквивалентную схему (рис. 8) и приведенные параметры преобразователя:

$$\begin{aligned} F_1^* &= F_1 S_2 / S_1; \quad C_1^* = C_1 (S_1 / S_2)^2; \\ m_1^* &= m_1 (S_2 / S_1)^2; \quad C_{\text{воз}}^* = C_{\text{воз}} (1 / S_2)^2. \end{aligned} \quad (17)$$

Оптимизация работы схемы (рис. 8) преобразования сигнала сводится к получению максималь-

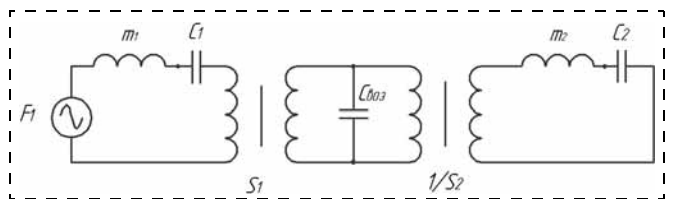


Рис. 7. Эквивалентная схема вибропреобразователя с акустомеханическим трансформатором с учетом упругости воздушного промежутка между мембранами

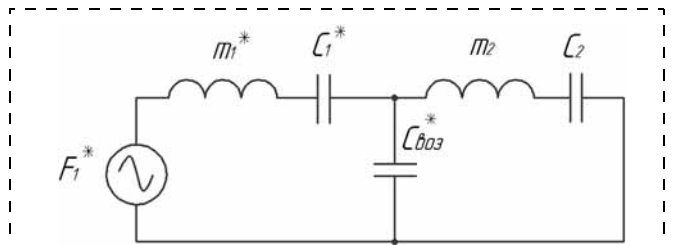


Рис. 8. Приведенная эквивалентная схема вибропреобразователя с акустомеханическим трансформатором

ного смещения x_2 во вторичной цепи преобразователя при заданном внешнем эквивалентном воздействии F_1^* .

Учитывая, что смещение x_2 есть эквивалентный "заряд" на емкости C_2 , необходимо получить максимальное падение "напряжения" (силы) на данной реактивной нагрузке. Для этого необходимо минимизировать все последовательные активные и реактивные сопротивления в цепи (рис. 8), а все параллельно соединенные комплексные сопротивления сделать как можно больше. При этом должно выполняться

$$C_{\text{воз}}^* \ll C_2 \ll C_1^*. \quad (18)$$

При выполнении этих условий, а также пренебрегая эквивалентной массой вторичной мембраны ($m_2 \ll m_1^*$), смещение x_2 в квазистатическом режиме (до основной резонансной частоты) будет

$$x_2 = C_2 F_1^* = C_2 m_1 a S_2 / S_1.$$

Статическая чувствительность s , измеряемая во вторичной цепи преобразователя, с учетом выражений (8) и (19) имеет следующий вид:

$$s = \frac{x_2}{a} = C_2 m_1 S_2 / S_1.$$

Основная резонансная частота при этом определяется по формуле

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_2 m_1^*}} = \frac{1}{\sqrt{C_2 m_1}} \frac{S_1}{S_2}.$$

Таким образом, при выполнении условий (18) получим идеальный критерий оптимизации $s \omega_0^2 = S_1 / S_2$, аналогичный выражению (16).

Для получения наилучшего значения критерия $s \omega_0^2$ необходимо увеличивать отношение площадей мембран S_1 / S_2 , также важно, чтобы вся эффективная масса была сосредоточена в первичном участке цепи преобразователя, а эквивалентная упругость воздушного промежутка, с учетом преобразования (17), была больше упругости второй мембраны:

$$\frac{V}{\gamma P S_2^2} \ll C_2.$$

В соответствии с данным выражением следует минимизировать объем воздушного промежутка между мембранами.

Рассмотренные подходы к оптимизации конструкции вибропреобразователей могут быть использованы и для других типов трансформаторов механического перемещения, так как используют обобщенный принцип описания конструкции и формальные правила преобразования параметров в идеальных трансформаторах.

Заключение

Для оптимизации конструкции вибропреобразователей в отношении таких параметров, как чувствительность s по смещению и верхняя граница рабочего частотного диапазона, определяемая резонансной частотой ω_0 , получен комплексный критерий оптимизации $s \omega_0^2$, равный произведению чувствительности преобразователя на квадрат его основной резонансной частоты.

Проанализированы конструкции вибропреобразователей с трансформаторами механического перемещения по критерию оптимизации $s \omega_0^2$. Показано, что оптимизация конструкции в соответствии с данным критерием определяется отношением площадей сечения на входе и выходе гидро- и акустомеханического трансформатора (коэффициентом трансформации) при условии локализации эффективной массы в первичном контуре вибропреобразователя и повышения жесткости шунтирующих элементов трансформатора.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации по теме "Физико-технологические основы формирования высокочувствительных нано- и микромембранных элементов", соглашение № 14.B37.21.0082, в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 годы, и Программы стратегического развития университета (СПбГЭТУ "ЛЭТИ") "Развитие междисциплинарных исследований и инструментально-технологической базы как основа непрерывного инженерного образования по приоритетным направлениям российской экономики" на 2012—2016 годы.

Список литературы

1. Джонс М. Х. Электроника — практический курс. М.: Постмаркет, 1999. 528 с.
2. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. М.: Мир, 1971. 560 с.
3. Акустика: учебник для вузов / Ш. Я. Вахитов, Ю. А. Ковалгин, А. А. Фадеев, Ю. П. Щевьев; под ред. Ю. А. Ковалгина. — М.: Горячая линия—Телеком, 2009. 660 с.
4. Акустика: справочник / А. П. Ефимов, А. В. Никонов, М. А. Сапожков. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1989. 386 с.

Н. И. Горемыкин, нач. лаборатории,
e-mail: zig51@yandex.ru,
А. С. Койгеров, канд. техн. наук, инженер,
e-mail: koigerojarvi@yahoo.com,
И. Н. Смелов, аспирант, инженер,
e-mail: insmelov@mail.ru,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет "ЛЭТИ"

МИНИАТЮРНЫЕ РАДИОИДЕНТИФИКАТОРЫ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Поступила в редакцию 20.09.2012

Рассмотрены радиоидентификаторы на поверхностных акустических волнах. Приведен анализ конструктивно-функциональных особенностей радиоидентификаторов. Представлены сигнально-кодовые конструкции радиоидентификаторов для последовательного и корреляционного приема. Рассмотрены представители класса проволочных антенн в диэлектрике, являющиеся перспективными с точки зрения уменьшения габаритных размеров радиоидентификаторов. Приведены результаты экспериментальных исследований разработанных образцов.

Ключевые слова: радиоидентификатор на поверхностных акустических волнах, сигнально-кодовая конструкция, проволочная антенна, пространственная винтообразная антенна, диэлектрическое заполнение

Введение

Одним из основных направлений современной радиоэлектроники является создание технических комплексов, устойчивых к экстремальным воздействиям, таким как повышенный уровень радиации, электромагнитные и температурные воздействия в широком диапазоне. Последние события в освоении космического пространства показали, что неустойчивость работы радиоэлектронной аппаратуры на борту космических объектов может приводить не только к параметрическим отказам, но и к потере объекта. Поэтому создание новых систем, устойчивых к экстремальным воздействиям, и модернизация уже существующих являются приоритетным направлением деятельности многих коллективов, занимающихся разработкой и созданием нано- и микрокомпонентной радиоаппаратуры. В СПбГЭТУ ведутся интенсивные разработки по созданию сложных технических комплексов, одним из которых является комплекс радиочастотной идентификации (РЧИД) на поверхностных акустических волнах (ПАВ), решающий ряд задач по беспроводному съему информации с объектов.

Радиоидентификаторы на ПАВ обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с любыми другими аналогами. К основным преимуществам можно отнести их высокую надежность, долговечность, дальность действия, высокую устойчивость к

внешним воздействующим факторам (температуре, давлению, радиации (более 10 МР) и др.) Радиочастотные идентификаторы на ПАВ являются весьма компактными и легкими устройствами.

Целью данной работы является системное изложение конструктивно-функциональных особенностей миниатюрных радиочастотных идентификаторов на ПАВ, отличающихся повышенной надежностью процесса идентификации и не требующих встроенных источников питания.

Принцип работы радиоидентификатора в составе комплекса радиочастотной идентификации

В последнее время устройства на ПАВ используются как идентификаторы и датчики, не требующие источников питания и работающие по радиоканалу.

Комплекс РЧИД на ПАВ (рис. 1) состоит из считывателя (передатчик/приемник), антенны считывателя и радиоидентификатора на ПАВ. Импульс опроса, периодически генерируемый считывателем, излучается антенной считывателя. Если радиоидентификатор расположен в зоне опроса считывателя, то он формирует ответный сигнал в виде последовательности электромагнитных импульсов, которые переизлучаются антенной радиоидентификатора в сторону считывателя. Принимаемый считывателем сигнал радиоидентификатора обрабатывается и представляется в удобном для оператора виде (например, на экране ПК).

Разработку радиочастотных систем, так же как и радиолокационных систем (РЛС), следует начинать с исследования ограничений, накладываемых уравнением дальности. Для РЛС оно имеет вид

$$R_{\max} = 4 \sqrt{\frac{P_0 G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{\min}}},$$

где $R_{\max}$ — максимальная дальность; P_0 — передаваемая мощность; G — коэффициент усиления передающей и приемной антенн; λ — длина волны излучаемого сигнала; σ — эффективная площадь рассеяния (ЭПР) объекта; $P_{\min}$ — минимальный обнаруживаемый сигнал.

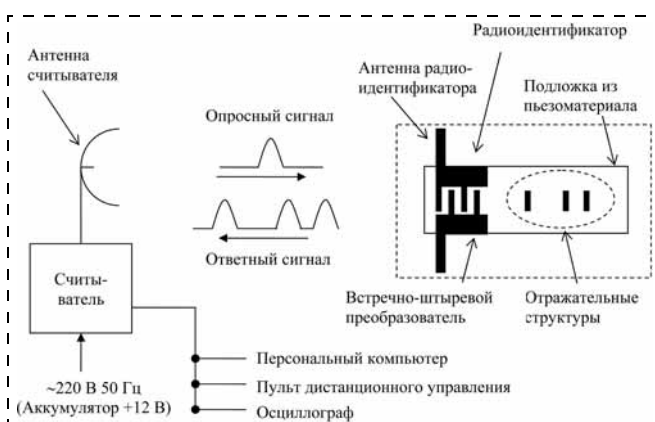


Рис. 1. Принцип работы комплекса РЧИД на ПАВ

Параметры σ и $P_{\min}$ можно заменить в соответствии с особенностями системы РЧИД на ПАВ. Тогда для ЭРП запишем:

$$\sigma = \frac{G_2^2 \lambda^2}{G_3 4\pi},$$

где G_2 — коэффициент усиления антенны радиоидентификатора; G_3 — коэффициент потерь в радиоидентификаторе.

Чувствительность представим как

$$P_{\min} = kTK_{\text{ш}}(C/\text{Ш})\Delta f,$$

где kT — энергия шума приемной антенны; $K_{\text{ш}}$ — коэффициент шума приемника; Δf — полоса приемника; $(C/\text{Ш})$ — отношение сигнал/шум.

Дальность действия системы РЧИД на ПАВ определяется соотношением

$$R_{\max} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_0 G_1^2 G_2^2}{kTK_{\text{ш}}\Delta f G_3 (C/\text{Ш})}},$$

где G_1 — коэффициент усиления антенны считывателя [2].

В результате проведенных в рамках ОКР исследований дальность действия системы составила не менее 10 м, причем она может быть значительно увеличена за счет дополнительной обработки сигналов в комплексе. Для этого в процессе работы апробированы следующие подходы:

- режим накопления когерентных откликов;
- режим корреляционной обработки импульсов с частотной или фазовой модуляцией.

Выбранное направление исследований обеспечило значительный задел для будущей модернизации комплекса.

Конструкция и принцип действия радиоидентификатора на ПАВ

В основе работы радиоидентификатора на ПАВ лежит эффект распространения акустической волны по поверхности пьезоэлектрического кристалла.

Для возбуждения и детектирования ПАВ служат металлизированные встречно-штыревые преобразователи (ВШП). Достоинством ВШП является возможность в широких пределах изменять параметры возбуждаемых ПАВ. Это легко достигается изменением геометрических размеров ВШП и проявляется в виде изменения формы импульсного отклика и частотной характеристики.

Встречая механическую или электрическую неоднородность на поверхности, часть ПАВ отражается. Поверхностная волна, входящая обратно в ВШП, в результате прямого пьезоэффекта генерирует на его шинах электрический сигнал. Именно это свойство используется в системах РЧИД на ПАВ.

Для создания неоднородностей, отражающих ПАВ, на пьезоэлектрической подложке создаются системы металлизированных полосок или кана-

вок, которые формируют путем травления поверхности звукопровода. Такие искусственно созданные отражающие элементы называются рефлекторами. Рефлекторы располагают на поверхности подложки из пьезоматериала таким образом, чтобы кодировать данные радиоидентификатора, используя задержку во времени, амплитуду и/или фазу.

Радиоидентификаторы на ПАВ относятся к классу "только чтение" и работают только на считывание информации. Следует отметить, что дальность считывания системы идентификации на ПАВ зависит от нескольких факторов. Один из них — это потери непосредственно в радиоидентификаторе, достигающие 30...50 дБ. Поскольку радиоидентификатор на ПАВ — это прототип многоотводной линии задержки, то с увеличением числа этих отводов возрастают потери, связанные с распределением энергии между ними. В свою очередь, число отводов определяет число знаков кода, а значит, число возможных кодовых комбинаций.

Существенное преимущество радиоидентификаторов на ПАВ заключается в том, что они являются пассивными устройствами, имеющими индивидуальный код с возможностью идентификации на расстояниях более 1 м. Одним из ограничений в применении данного класса радиоидентификаторов является наличие проблемы коллизии, т. е. ситуации затрудненного приема сигнала, когда в зоне идентификации одновременно оказывается значительное число радиоидентификаторов.

Радиоидентификатор на ПАВ — это устройство, состоящее либо из двух ВШП, один из которых является кодирующим, либо из ВШП и ряда групп отражателей, которые могут быть созданы с помощью плоских электродов или канавок на пьезоэлектрических подложках. Радиоидентификатор, представленный на рис. 2, состоит из антенны и устройства на ПАВ, где используется конструкция, содержащая два ВШП.

Достоинством конструкции радиоидентификатора (рис. 2) является ее технологичность при изготовлении.

К недостаткам можно отнести следующее:

- наличие переотражений между преобразователями;
- существенный спад амплитуды кодовых импульсов;
- трудность согласования с антенной вследствие изрезанности амплитудно-частотной характеристики.

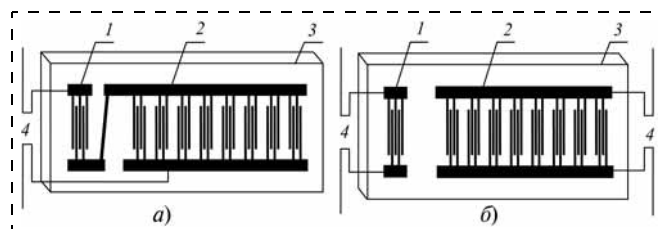


Рис. 2. Конструкция радиоидентификатора на ПАВ с кодирующим ВШП:

1 — ВШП-1; 2 — ВШП-2; 3 — пьезоподложка; 4 — антенна; а — одна антенна; б — две антенны

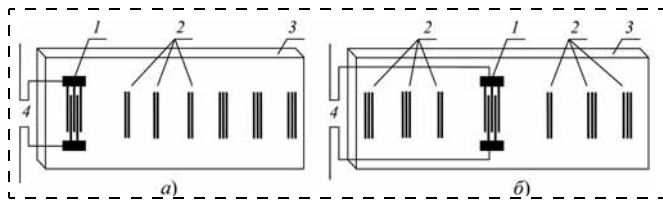


Рис. 3. Конструкция радиоидентификатора на ПАВ с ОС:

1 — ВШП; 2 — ОС; 3 — пьезоподложка; 4 — антенна; а — традиционная схема; б — схема с использованием двунаправленности ВШП

ки, существенный разброс электрических параметров радиоидентификатора в зависимости от кода;

- большая длина подложки по сравнению с конструкцией с отражательными структурами на канавках.

В конструкции радиоидентификатора, приведенной на рис. 3, ВШП используется для преобразования электрического сигнала, поступающего от антенны в устройство на ПАВ и обратно. Отражательные структуры (ОС) в виде групп канавок располагаются на поверхности пьезоподложки таким образом, чтобы после отражения ПАВ от каждой ОС и ее обратного преобразования на ВШП в антенну радиоидентификатора поступила кодовая последовательность импульсов.

Достоинствами конструкции радиоидентификатора с ОС являются:

- регулируемый коэффициент отражения от каждого отражателя (с помощью изменения глубины канавок) и, как следствие, возможность выбрать его оптимальное значение;
- небольшая изрезанность амплитудно-частотной характеристики, не чувствительная к коду, что обеспечивает отсутствие разброса электрических параметров радиоидентификатора в зависимости от заданного кода.

К недостаткам можно отнести следующее:

- большее число технологических операций при изготовлении по сравнению с радиоидентификатором на ВШП;
- необходимость хорошей расчетной теории для учета переотражений акустических волн внутри ОС и других вторичных эффектов.

Сигнально-кодовые конструкции радиоидентификаторов на ПАВ

Основной задачей системы РЧИД является быстрое и надежное считывание данных радиоидентификатора с максимальной точностью. Выбор сигнально-кодовой конструкции определяют следующие аспекты:

- методы кодирования данных в радиоидентификаторах на ПАВ отличаются от существующих международных стандартов, таких как ISO, EPCglobal (Generation 1 и Generation 2) [2], разработанных для чиповых меток;

- кроме помех на системы РЧИД могут предприниматься "атаки" по неавторизованному считыванию информации с радиоидентификатора;
- температурные свойства кристалла. Изменение температуры приводит к изменению скорости ПАВ в кристалле, что, в свою очередь, приводит к изменению времени распространения волны, т. е. структура кода, определяемая "отводами линии задержки", будет изменяться. Таким образом, необходимо ввести температурную компенсацию. Способ термокомпенсации выбирается исходя из способа приема ВЧ сигналов;
- проблема коллизии (одновременно распознавать несколько различных объектов, находящихся в зоне действия считывателя). Для решения проблемы коллизии используются различные антиколлизционные механизмы, в основе которых лежит пространственное, частотное, временное или кодовое разделение ответных сигналов.

Пространственное разделение требует разработки сложных антенных систем зондирующего радара (приемопередатчика), что не всегда приемлемо. При применении частотного разделения также значительно усложняются приемопередатчик и система в целом, хотя в ряде случаев достигается значительный положительный эффект.

Временное разделение было реализовано сотрудниками Центра микротехнологии и диагностики СПбГЭТУ "ЛЭТИ" в 2011 г. при выполнении работы по созданию системы дальней идентификации с применением пассивных радиоидентификаторов на ПАВ. Созданные комплексы на рабочей частоте порядка 900 МГц обеспечивали одновременное устойчивое распознавание пяти радиоидентификаторов (в пределах для данной частоты — до 10), удаленных от приемопередатчика на открытом пространстве на расстояние до 5...7 м, а за бетонной или кирпичной преградой толщиной от 250 мм до 0,5 м.

Для дальнейшего увеличения числа распознаваемых объектов (до десятков или даже сотен) авторами данной статьи анализировались подходы к кодовому разделению сигналов. Были исследованы различные ансамбли кодов и метод корреляционной обработки, при этом ставилось условие, согласно которому ансамбль кодов должен был иметь хорошие автокорреляционные функции (АКФ), имеющие выраженный корреляционный пик, а взаимокорреляционные функции (ВКФ) в выбранной группе кодов должны были иметь низкий уровень максимального значения пиков.

Первые ПАВ-радиоидентификаторы несли информацию с помощью амплитудной манипуляции (АМ, *Amplitude Shift Keying* — ASK) [3]. Дальнейшее развитие концепции ASK совместно со способом временного позиционирования и фазовой манипуляции (ФМ) реализовано компанией RFSAW (США) [4]. В работе [5] предложен способ формирования кода посредством частотной манипуляции (ЧМ, FSK — *Frequency Shift Keying*), где код радиоидентификатора формируется из семи ортогональных

Примеры сигнально-кодовых конструкций для последовательного приема

Ансамбль	Длина	Объем	Тип модуляции	Корректирующие свойства
Код Боуза—Чоудхури—Хоквингема (БЧХ)	$N = 2^m - 1$ 7, 15, 31, 63, 127	Для (15, 7) = 2^8 , для (31, 6) = 2^{25} и т. д.	АМ, ФМ, ЧМ	Определяются на стадии выбора структуры кода, подробнее [6, 7]
Код циклического контроля (CRC — <i>Cyclic redundancy check</i>)	$N = (N - K) + K$, K — степень порождающего полинома	Для (15, 5) = 2^{10} , для (31, 6) = 2^{25} и т. д.	АМ, ФМ, ЧМ	Определяются на стадии выбора CRC-полинома кода, подробнее [2, 6, 7]
Коды Рида—Соломона	$N = q - 1$, $q > 2$ — степень простого числа, $q = 16$, $N = 15$; $q = 32$, $N = 31$	Для (15, 11) = 16^4	M -ичная АМ, M -ичная ФМ, M -ичная ЧМ	Определяются на стадии выбора полинома, подробнее [6, 7]. Возможно применение для корреляционного приема
Коды с постоянным весом	15, 31, 63	Для (7/8) — 6435; для (15/16) — 300 540 195	АМ, ФМ, ЧМ	Все ошибки нечетной кратности и часть ошибок четной кратности

частот, в качестве опросного импульса используется линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) сигнал.

При исследовании радиосигналов, перспективных для применения в бесконтактных устройствах радиочастотной идентификации на ПАВ, следует учитывать некоторые ограничения возможностей устройств на ПАВ, их особенности и специфику построения приемных устройств (считывателей), а именно способы приема и декодирования ВЧ сигналов.

Учитывая специфику ПАВ-отклика радиоидентификатора, рассмотрим два типа сигнально-кодо-

вых конструкций для последовательного ("побитового") (табл. 1) и корреляционного приема ("в целом") ВЧ сигналов (табл. 2).

Анализ представленных сигнально-кодовых конструкций для радиоидентификаторов на ПАВ показал, что в зависимости от задач и специфических требований Заказчика можно выбрать один из возможных вариантов реализации кодовой структуры. Так, для последовательного приема — двоичные БЧХ-коды, CRC-коды с АМ или ФМ либо

Таблица 2

Примеры сигнально-кодовых конструкций для приема "в целом"

Ансамбль	Длина	Объем	Тип модуляции	Корректирующие свойства
Сигналы Уолша [8], коды Рида—Мюллера [9]	16, 32, 64	16, 32, 64	Двоичная ФМ	Ортогональность в точке, применение рекомендовано только для синхронных систем
М-последовательности [8, 10]	$N = 2^m - 1$ 7, 15, 31, 63, 127	2, 2, 6, 7, 18	Двоичная ФМ	«Хорошие» свойства по периодической АКФ (уровень БЛ АКФ $R(\tau) \approx -1/N$)
Коды Голда [10]	7, 31, 63, 127	$L = N + 2$, N — длина кода	Двоичная ФМ	Квадрат максимума корреляции $\rho_{\max}^2 \approx 4/N$
Коды Касами [10]	$N = 2^m - 1$, m — четное 15, 63, 255	$L = \sqrt{N+1}$, N — длина кода	Двоичная ФМ	Квадрат максимума корреляции $\rho_{\max}^2 \approx 1/N$
Модифицированные последовательности максимальной вероятности [11]	N — длина кода произвольная	$L = \frac{M_0!}{k_{\max} \prod_{k=1}^{k_0} y_k!}$ $k_{\max}$ — длина максимального блока, $k_{\max} = N - \sum_{k=1}^{k_0} k y_k$ M_0 — оптимальное число блоков, y_k — число блоков длины k	Двоичная ФМ	Несколько ансамблей с заданными корреляционными свойствами внутри ансамбля по пикам ВКФ не выше –6 дБ

коды Рида—Соломона с M -ичной АМ, M -ичной ФМ и комбинированной M -ичной АМ-ФМ.

Для приема "в целом" любую бифазную дискретно-кодированную последовательность можно определить на основании выражения

$$X = \{a_n\}_{1,N}, a_n = \exp(j\varphi_n), n = 0, 1, \dots, N-1,$$

где значение фазы φ_n на каждом n -м кодовом интервале может принимать лишь одно из двух значений $\{0, \pi\}$, модуль каждого кодового элемента $|a_n| = 1$, N — число кодовых элементов в последовательности; j — мнимая единица.

Для корреляционного приема следует принимать во внимание то, что одновременно в зоне считывания может находиться лишь строго определенное число радиоидентификаторов.

Представим, что данные k -го радиоидентификатора образуют последовательность X_k . Данная последовательность моделирует сигнал k -го радиоидентификатора $S_k(t)$. Распространяясь по каналу, каждый из этих сигналов приобретает свои амплитуду A_k и запаздывание τ_k и после суммирования с сигналами других радиоидентификаторов входит в общий или групповой сигнал, поступающий на приемник считывателя:

$$S_\Sigma(t) = \sum_{k=1}^K A_k S_k(t - \tau_k),$$

где K — число радиоидентификаторов в зоне.

Групповой сигнал с учетом канального шума $n(t)$ определяется выражением

$$y(t) = S_\Sigma(t) + n(t) = \sum_{k=1}^K A_k S_k(t - \tau_k) + n(t).$$

Приемник должен выделить данные радиоидентификатора из сигнала $y(t)$. Среди возможных сигналов одинаковой энергии принятым считается тот, который имеет наибольшую корреляцию с сигналом $y(t)$. Таким образом, предпочтение отдается тому сигналу, который наиболее похож на $y(t)$ в сравнении с остальными, причем мерой сходства служит величина корреляции [8]

$$z_k = \int_0^T y(t) S_k(t - \tau_k) dt.$$

При построении РЧИД на ПАВ с корреляционным приемом интерес представляют как функция автокорреляции, так и функция взаимной корреляции кодовых последовательностей.

Автокорреляционную функцию (АКФ) в общем виде можно определить как меру подобия сигнала на "самого себя":

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_1(t) S_1(t - \tau) dt.$$

Нормированная автокорреляционная функция таких дискретно-кодированных последовательностей на основании [8] может быть записана в виде

$$R_n(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=\tau+1}^N a_n a_{n-\tau}^*, \tau = 0, 1, \dots, N-1,$$

где a_n^* — комплексно сопряженный кодовый элемент дискретной последовательности X , для ФМ сигналов с двумя значениями фазы $a_n^* = a_n$ [8]. АКФ — четная функция, $R(-\tau) = R(\tau)$.

Функция взаимной корреляции (ВКФ) представляет интерес при использовании кодовых последовательностей в таких системах, как системы со свободным доступом и системы с кодовым разделением сигналов (или же любая кодово-адресная система) [8]. ВКФ является мерой соответствия $\eta(\tau)$ двух различных кодовых последовательностей. В общем виде

$$\eta(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_1(t) S_2(t - \tau) dt.$$

Нормированную взаимную корреляционную функцию двух фазоманипулированных последовательностей $X^{(j)} = \{a_n^{(j)}\}_{1,N}$ и $X^{(k)} = \{a_n^{(k)}\}_{1,N}$ определим на основании выражения [8]:

$$\eta_{jk}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=n_1}^{n_2} a_n^{(j)} (a_{n-\tau}^{(k)})^*,$$

где $*$ — комплексно сопряженное значение; j, k — индекс последовательности.

Для приема "в целом" большое число кодовых последовательностей с заданными корреляционными свойствами обеспечат модифицированные последовательности максимальной вероятности с M -ичной АМ-ФМ.

Возможность ЧМ не рассматривается ввиду того, что, как правило, ширина рабочей полосы жестко регламентирована, а для набора ортогональных частот может потребоваться шаг в десятки мегагерц.

Для M -ичной ФМ — характерно ограничение ФМ четырьмя значениями ввиду трудности реализации топологий устройств на ПАВ.

Способ термокомпенсации выбирается исходя из способа приема ВЧ сигналов. При последовательном приеме достаточно к выбранной структуре кода добавить стартовый и стоповый "биты", по разности времени задержки между ними корректировать температуру. В случае корреляционного приема — использовать набор согласованных фильтров для каждого значения температуры с определенным шагом, например в 2°C .

В дополнение по последовательному приему можно сказать, что для выбранных сигнально-кодовых конструкций хорошо известны алгоритмы кодирования и декодирования. Считывателю нет необходимости хранить в памяти весь массив используемых кодов. К тому же эти коды являются по-

мехоустойчивыми с возможностью исправления ошибок. К недостаткам можно отнести наличие неразрешенной в данном случае проблемы коллизии.

Проблема коллизии может быть решена за счет корреляционного приема (приема "в целом"), но ограничением является то, что считыватель должен знать весь набор разрешенных кодовых комбинаций, чтобы принимать то или иное решение. Как вариант — набор N согласованных фильтров.

Антенны для радиоидентификаторов на ПАВ

Для передачи и приема сигналов по радиоканалу необходимы антенны. Правильный выбор антенны считывателя и радиоидентификатора (см. рис. 1) является важным условием эффективной работы системы. Многие разработчики систем РЧИД заостряют внимание на исследовании и изготовлении самих устройств на ПАВ, а антенны для них предпочитают заказывать за рубежом либо заимствовать уже известные решения, разработанные для других целей, получая при этом недостаточно эффективные результаты.

Выполненный нами анализ показал, что в основе большинства антенн радиоидентификатора лежат различные укороченные варианты планарных излучателей, такие как меандр, "укороченный шлейф", спиральная антенна, чиповая антенна, "щель", "петля" и др. [1] (рис. 4), поскольку одним из основных требований, предъявляемых к радиоидентификатору, является его компактность.

В табл. 3 приведены основные характеристики приведенных выше антенн радиоидентификаторов.

Антенны, выполненные по печатной технологии, позволяют предельно сократить толщину радиоидентификатора, однако это требуется не всегда. Нередки ситуации, когда нужно добиться компромисса между всеми тремя характерными размерами радиоидентификатора — длиной, шириной и высотой (толщиной). В этом случае целесообразно применять объемные конструкции антенн, например проволочные антенны.

В отличие от печатных антенн проволочный излучатель обладает гибкостью в широком смысле этого слова: он прост в изготовлении, легко под-

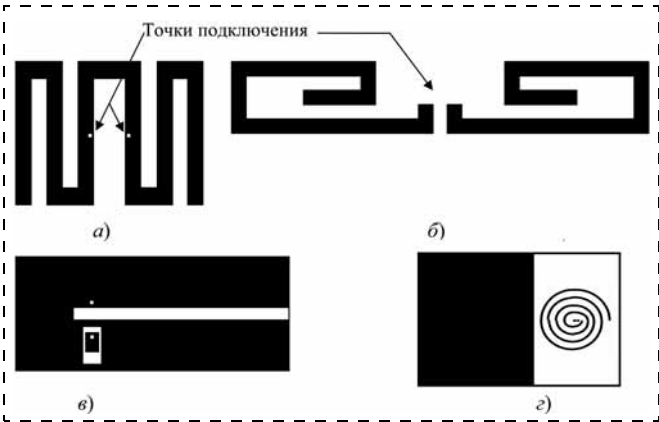


Рис. 4. Распространенные типы антенн радиоидентификаторов:
 а — меандр; б — модифицированный диполь; в — щелевая антенна; г — спиральная антенна

дается манипуляциям с формой, длиной (существует возможность удаления части проводника) и расположением. Благодаря этому антенна радиоидентификатора на ПАВ может быть вручную подстроена не только по форме, но и практически по всем основным радиотехническим параметрам, включая рабочую частоту, диаграмму направленности и входное сопротивление. При этом антенна обладает достаточной жесткостью, чтобы не деформироваться под действием внутренних механических напряжений.

Габаритные размеры проволочной антенны определяются рабочей длиной волны системы и не могут быть существенно уменьшены без сдвига по частоте. В то же время известно, что при помещении антенны в среду, отличную от вакуума, для поддержания согласования на прежней частоте необходимо сократить ее габаритные размеры в $\sqrt{\epsilon}$ раз. Поэтому дополнительным конструктивным элементом радиоидентификатора на ПАВ с проволочной антенной может служить диэлектрический материал, позволяющий уменьшить габаритные размеры системы, снизив эффективную длину проводника, а также дополнительно механически ее стабилизировать и защитить от нежелательных внешних воздействий. На рис. 5 представлены примеры радиоидентификаторов с разными типами проволочных антенн в диэлектрике [12].

Таблица 3

Основные характеристики укороченных планарных излучателей

Тип антенны	Диаграмма направленности	Поляризация	Коэффициент усиления G при $f \approx 1$ ГГц	Комментарий
Меандр	Тороидальная	Линейная	Характеристики аналогичны характеристикам эквивалентного полуволнового вибратора при меньших габаритных размерах	
Модифицированный диполь	Тороидальная	Линейная		
Щелевая антенна	В плоскости щели — всенаправленная	Линейная	–4,5...–6 дБ	Длина щели зависит от материала диэлектрика
Спиральная антенна	В осевом направлении — всенаправленная, в плоскости спирали — слабые минимумы	Линейная	–3...–7 дБ (в зависимости от площади экрана)	Сильно подвержена влиянию рук

Формулы для расчета длины излучателя

Характер диэлектрического заполнения	Расчетное соотношение
Однокомпонентный диэлектрик [14]	$L = N_0 \sqrt{t_k^2 + D^2} \left(a + \frac{b}{\sqrt{\epsilon}} \right)$
Многокомпонентный диэлектрик	$L = N_0 \sqrt{t_k^2 + D^2} \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} d\epsilon$
Градиентный диэлектрик ($\epsilon = \nabla H$)	$L = \sqrt{t_k^2 + D^2} \left(a_0 + \sum_{i=1 \dots n} \frac{a_i}{\sqrt{\epsilon_i}} \right)$
Примечание. N_0 — начальное число витков антенны в свободном пространстве; H — высота антенны; t_k — шаг намотки витков; D — диаметр образующей окружности антенны; a, b — долевые линейные коэффициенты; ϵ — диэлектрическая проницаемость среды; n — число компонентов с разными ϵ в многокомпонентном диэлектрике	

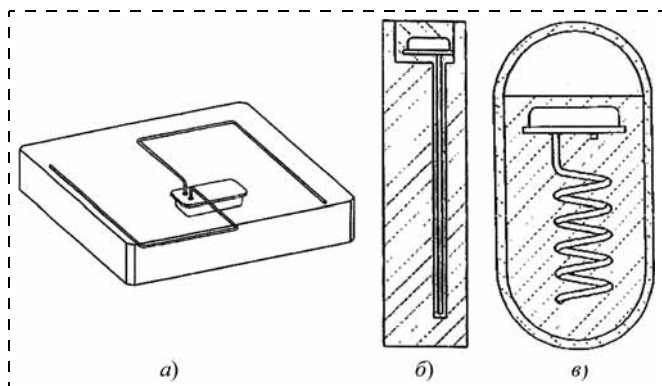


Рис. 5. Радиоидентификаторы с разными типами проволочных антенн в диэлектрике:

а — проволочная модифицированная дипольная антенна; б — проволочная штыревая антенна; в — пространственная винтообразная антенна

Характеристики проволочных излучателей во многом аналогичны характеристикам эквивалентных им полуволновых и четвертьволновых вибраторов, коими они, по сути, и являются.

Проведенные исследования показали, что наиболее перспективной с точки зрения уменьшения габаритных размеров радиоидентификатора конструкцией излучателя является пространственная винтообразная антенна с поперечным излучением (NMH-антенна) [13]. Являясь несимметричным вибратором, NMH-антенна для своей работы требует наличия заземляющей поверхности (экрана). При работе в составе радиоидентификатора в ряде случаев существует возможность отказаться от использования экрана, перенеся его функции на металлическую крышку корпуса, что дает дополнительный выигрыш по габаритным размерам.

Экспериментальные исследования и моделирование в среде CST Microwave Studio показали, что на частотах около 1 ГГц благодаря использованию диэлектрика с проницаемостью $\epsilon = 3,4$ (при $f = 10^6$ Гц) можно добиться уменьшения размеров радиоидентификатора до габаритов цилиндра по-

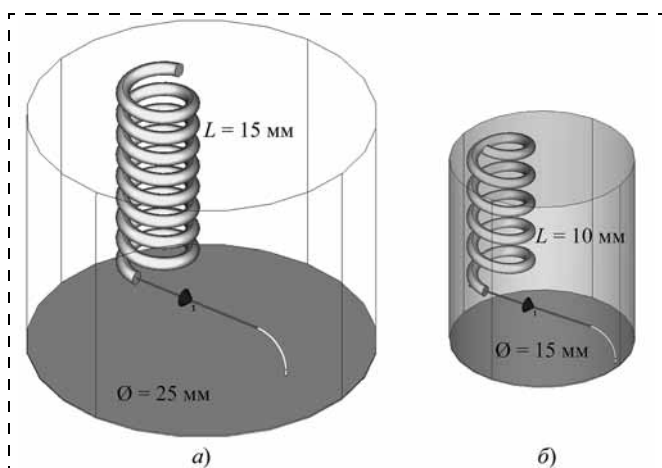


Рис. 6. Сравнение габаритных размеров NMH-антенны:

а — в свободном пространстве; б — в среде, заполненной диэлектриком

рядка 10×15 мм (рис. 6). При этом коэффициент усиления NMH-антенны отличается от коэффициента усиления обыкновенного четвертьволнового вибратора не более чем на 0,5 дБ [13].

Для расчета длины излучателя NMH-антенны с учетом диэлектрической среды авторами предложены соотношения, приведенные в табл. 4.

Благодаря использованию проволочных антенн в качестве излучающих элементов для радиоидентификатора на ПАВ решена задача уменьшения габаритных размеров радиоидентификатора в объеме, а также реализована возможность гибкого контроля радиотехнических и геометрических параметров излучателей на всех этапах изготовления. В то же время следует отметить, что выбор типа антенны, будь то проволочная антенна или планарная конструкция, зависит от поставленных инженерных задач, поэтому авторы статьи не отказываются от применения планарных топологий в тех случаях, когда этого требуют обстоятельства.

Некоторые характеристики экспериментальных образцов систем РЧИД на ПАВ

За последние годы в ЦМИД СПбГЭТУ "ЛЭТИ" выполнен комплекс работ по созданию и исследованию систем РЧИД на ПАВ в диапазоне частот до 1 ГГц. Применение NMH-антенн, рассмотренных ранее, позволило уменьшить габаритные размеры радиоидентификаторов, создаваемых в рамках проводимых работ, до размеров цилиндра 10×15 мм при длине волны электромагнитного сигнала порядка 35 см.

Созданные радиоидентификаторы представляют собой корпусированный звукопровод из ниобата лития с размерами рабочего поля: ширина 2...4 мм, длина 6...20 мм, сопряженный с антенной. Расстояние между алюминиевыми электродами ВШП в созданных ПАВ-структурах не превышает 1,2 мкм. При уровне излучаемой средней мощности считы-

вателя не более 10 мВт радиус действия таких систем составляет порядка 15 м в свободном пространстве. При идентификации за различными преградами дальность уменьшается в зависимости от толщины преграды и ее свойств. Ниже приведены результаты натурных испытаний радиоидентификаторов с одним из видов планарных антенн.

На рис. 7 представлена зависимость абсолютного уровня сигнала на оконечном каскаде считывателя.

Вид электродной структуры ВШП устройства на ПАВ с рабочей частотой около 1 ГГц представлен на рис. 8. При изготовлении ПАВ-устройства использовались: пьезоматериал — ниобат лития, материал ВШП — алюминий с подслоем титана

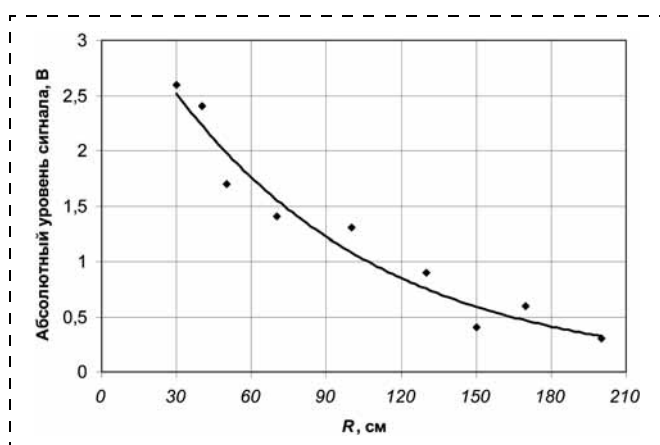


Рис. 7. Зависимость абсолютного уровня сигнала на оконечном каскаде считывателя при средней мощности передатчика 10 мВт от дальности действия системы при уровне потерь в тракте 20 дБ

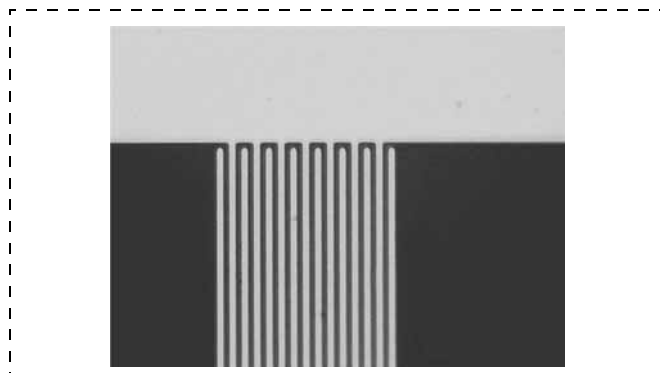


Рис. 8. Вид электродной структуры ВШП

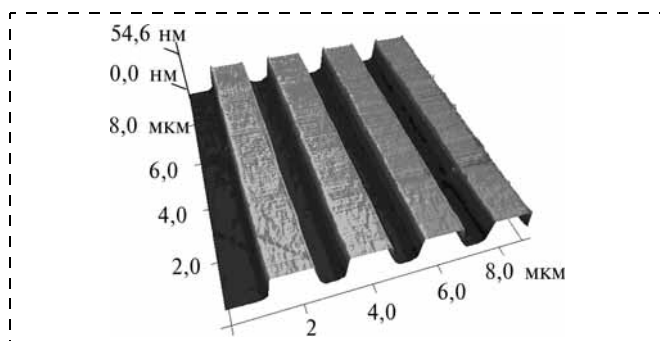


Рис. 9. 3D-изображение морфологии поверхности отражающей структуры

или ванадия. Структура формировалась методом взрывной фотолитографии.

На рис. 9 приведена профилограмма ПАВ-структуры с отражательными элементами. При исследовании профилей по поверхности структур с удаленной металлизацией применялся атомно-силовой микроскоп Dimension 3100.

Радиоидентификаторы, в свою очередь, входят в состав идентификационной системы, в которой был реализован механизм антиколлизии, что позволяет одновременно распознавать до пяти радиоидентификаторов в зоне опроса.

Заключение

Рост интереса к системам радиочастотной идентификации на ПАВ обуславливается, с одной стороны, успехами в области технологии и конструирования акустоэлектронных устройств, с другой — прогрессом в области проектирования систем идентификации, диктующим новые, более жесткие, требования к радиоидентификаторам.

Представленный анализ конструктивных особенностей пассивных радиоидентификаторов на ПАВ и результаты практической реализации миниатюрных энергонезависимых идентификаторов, работающих в диапазоне до 1 ГГц, показали, что комплекс РЧИД на ПАВ способен решать ряд задач по беспроводному съему информации при средней мощности излучения, не превышающей 10 мВт.

За рамками данной публикации осталось рассмотрение таких составных частей РЧИД-системы, как устройство считывателя и его антенна. Основное направление работ в данной области частотного диапазона связано с цифровой обработкой опросного и ответного сигналов, а при разработке антенн считывателя исследуются новые перспективные материалы, что позволяет значительно улучшить массогабаритные и электродинамические характеристики. Намечаются еще большие перспективы по улучшению характеристик РЧИД-системы в целом, при условии оптимизации технологического процесса изготовления ПАВ-структур в целях достижения линейности импульсного отклика ответного сигнала, вариативности импедансов.

Достигнутые результаты позволяют рассматривать возможность применения этих систем в значительно более широких областях, чем планировалось изначально. Так, в отличие от чиповых идентификаторов, весьма неустойчивых к воздействию радиации и мощных электромагнитных импульсов, радиоидентификаторы на ПАВ выдерживают воздействие радиации более 10^5 Гр. Применение антенн с круговой поляризацией совместно с топологическими решениями для конструкций радиоидентификаторов обеспечивает возможность дистанционного контроля нескольких динамических объектов независимо от их пространственного положения, т. е. при произвольной ориентации радиоидентификатора. Переход в диапазон 2,45 ГГц делает систему РЧИД еще более привлекательной за

счет минимизации габаритных размеров радиоидентификаторов и всего комплекса в целом.

Список литературы

1. Горемыкин Н. И., Койгеров А. С., Смелов И. Н. Энергонезависимые миниатюрные радиоэлектронные идентификаторы на поверхностных акустических волнах // Биотехносфера. 2011. № 1—2 (13—14). С. 94—98.
2. Дшхунян В. Л., Шаньгин В. Ф. Электронная идентификация. Бесконтактные электронные идентификаторы и смарт-карты. М.: АСТ, 2004. 695 с.
3. Reindl L., Ruile W. Programmable reflectors for SAW-ID-tags // IEEE Ultrason. Symp. 1993. Vol. 1. P. 125—130.
4. Hartmann C. S. A global SAW ID tag with large data capacity // Proc. of IEEE Ultrasonics Symposium, Munich, Germany, October 2002. P. 65—69.
5. Puccio D., Malocha C., Saldanha N. etc. Orthogonal frequency coding for SAW tagging and sensors // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Contr. 2006. Vol. 53, N 2. P. 377—384.
6. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М.: Техносфера, 2005. 320 с.

7. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки. М.: Мир. 1976. 593 с.
8. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
9. Сандерс Р. В. Система связи "Диджиклок" // Передача цифровой информации / Под. ред. С. И. Самойленко. М.: Изд-во иностр. лит. 1963. С. 187—202.
10. Ипатов В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. М.: Техносфера, 2007. 488 с.
11. Койгеров А. С., Забузов С. А., Дмитриев В. Ф. Исследование корреляционного метода для решения задачи антиколлизии для систем радиочастотной идентификации на ПАВ // Информационно-управляющие системы. 2009. Вып. 5. С. 48—55.
12. Fachberger R., Bruckner G. Saw transponder having a wire antenna. Pat. USA EP1752916 (A1), 2007.
13. Смелов И. Н., Лучинин В. В. Использование винтообразных антенн с поперечным излучением для уменьшения габаритов идентификационных радиомаркеров // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2011. Вып. 5. С. 18—21.
14. Смелов И. Н., Койгеров А. С., Горемыкин Н. И., Лучинин В. В. Винтообразная антенна с поперечным излучением для миниатюрных радиоидентификаторов на поверхностных акустических волнах // Матер. X научно-техн. конф. "Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА Пульсар-2011". Дубна. 2011. С. 52—54.

УДК 621.382; 681.586

А. П. Бройко, канд. техн. наук, доц., ст. науч. сотр., e-mail: broyko@mail.ru,
О. С. Ленчук, инженер, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)

АНАЛИЗ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ МИКРОСЕНСОРА, СОЗДАННОГО НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Поступила в редакцию 20.09.2012

Представлен анализ теплового состояния микросенсора, изготовленного на основе тонкопленочных технологий. Рассмотрены модельные задачи о стационарном нагреве тонкой мембраны, нестационарном охлаждении тонкой мембраны, минимальной площади сенсора, связанной с флуктуационным пределом. Определено, что для воздуха, если тепловой сенсор работает на максимальных скоростях регистрации (т. е. порядка времени тепловой релаксации), его площадь не может быть меньше 400 нм².

Ключевые слова: тепловое состояние, микросенсор, флуктуационный предел

Введение

Волоконно-оптические микрофоны (ВОМ), датчики потока, термоанемометры, ИК-датчики, изготовленные на основе тонкопленочных технологий, получили широкое распространение [1] в связи с их малым энергопотреблением, невысокой

стоимостью и возможностью интегрировать их в макроприборы. Тепловое состояние чувствительного элемента датчика — микросенсора необходимо определять при анализе стабильности, надежности и выбора режимов работы. На первоначальном этапе проектирования результаты вычисления температурного поля с помощью конечно-объемных или конечно-элементных пакетов неудобны для анализа, поэтому оценочные расчеты очень важны. Основные вопросы, которые возникают у разработчика, следующие.

1. До какой температуры нагревается микроэлемент и как ее регулировать?

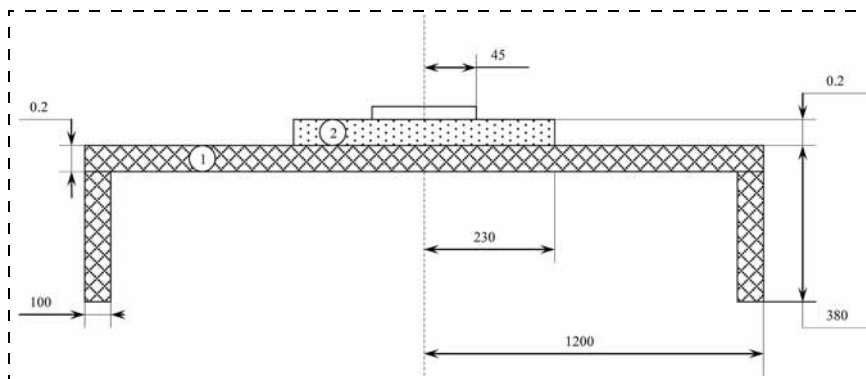
2. Какова тепловая инерционность и как ее уменьшить?

3. Существуют ли принципиальные физические ограничения на размеры и форму сенсора?

На эти вопросы можно приближенно ответить, рассмотрев следующие модельные задачи: стационарную задачу о нагреве тонкой мембраны, нестационарную задачу об охлаждении тонкой мембраны и задачу о минимальной площади сенсора, связанную с флуктуационным пределом.

1. Модель чувствительного элемента. Объект исследования

Достаточно репрезентативной моделью выпечечисленных тепловых микросенсоров является модель мембраны ВОМ. Рассмотрим типичную модель мембраны ВОМ со следующими параметрами: мощность теплового потока, воздействующего на мембрану, 0,5...4 мВт, диаметр мембраны 2400 мкм, диаметр пятна хрома составляет 90 мкм, температура среды 300 К. Материалы — никель и нитрид кремния. Упругая геометрия представлена на рисунке.



Упрощенная схема ВОМ. Материалы: 1 — никель; 2 — нитрид кремния

2. Стационарная задача о локальном нагреве тонкой мембраны

Для стационарного случая, если пренебречь теплопередачей через боковые поверхности, задача сводится к рассмотрению теплообмена в бесконечной пластине. Перепад температуры при этих условиях определяется простым соотношением [2]:

$$\Delta T = RRq, \quad (1)$$

где q — плотность теплового потока, Вт/м²; RR — тепловое сопротивление системы, м² · К/Вт.

В данном случае RR определяется так [2]:

$$RR = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \sum \frac{h_i}{\lambda_i}, \quad (2)$$

где α_1 — коэффициент теплоотдачи с одной стороны стенки, Вт/(м² · К); α_2 — коэффициент теплоотдачи с другой стороны стенки, Вт/(м² · К); h_i — толщина i -го слоя, м; λ_i — теплопроводность i -го слоя, Вт/(м · К); RR — тепловое сопротивление системы, м² · К/Вт.

Исследование теплового сопротивления системы RR , определяемого формулой (2), дает ответ на вопрос: какие факторы влияют на температуру микроэлемента. Рассмотрим и проанализируем подробно члены, входящие в выражение (2). Для этого перепишем его в виде:

$$RR = RR_M + RR_B, \quad (3)$$

где RR_M — тепловое сопротивление многослойной мембраны, м² · К/Вт; RR_B — тепловое сопротивление окружающей газовой среды, м² · К/Вт.

Вычислим порядок величин входящих в выражение (3) слагаемых: значение h находится в диапазоне 0,1...1 мкм, типичные значения теплопроводности материалов мембраны λ варьируются в пределах от 10 до 100 Вт/(м · К). Тогда значения h/λ лежат в пределах от 10^{-7} до 10^{-9} м² · К/Вт, т. е. тепловое сопротивление пленок имеет порядок 10^{-7} ... 10^{-9} м² · К/Вт.

Оценим теперь тепловое сопротивление среды RR_B :

$$RR_B = \frac{1}{\alpha_K} + \frac{1}{\alpha_{изл}},$$

где индекс K относится к конвекции, изл — к излучению.

Одной из основных проблем расчета является корректное определение коэффициента теплоотдачи α_K . Исследованию теплообмена в микро- и наносистемах в последнее десятилетие посвящено большое число статей, и этот вопрос так до конца и не исследован [3]. Это связано с различными сложностями — высоким влиянием поверхностных сил в наносистемах и сложностью описания этого взаимодействия, сложностью описания и обобщения самих данных, получающихся в теплофизическом эксперименте. Однако

в случае естественной конвекции оценить порядок величины и диапазон значений коэффициента теплоотдачи вполне возможно. Теплообмен при естественной конвекции определяется безразмерным комплексом — числом Рэлея: $Ra = Gr \cdot Pr$, где $Gr = g\beta\Delta T X^3/\mu^2$ — число Грасгофа, $Pr = \mu c_p/\lambda$ — число Прандтля.

При $Ra < 500$ можно использовать два предельных случая. В работе [4] указано, что минимальное значение числа Нуссельта $Nu \approx 1/2$. Этому значению соответствует минимальное расчетное (нижняя граница) значение коэффициента теплоотдачи α :

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda_T} = \frac{1}{2}, \text{ отсюда } \alpha_{\min} = \frac{1}{2} \frac{\lambda_T}{d},$$

где λ_T — теплопроводность газа, в нашем случае для воздуха $\lambda_T = 0,026$ Вт/(м · К) [2]; $\alpha_{\min} \approx 8$ Вт/(м² · К).

Для чисел $Ra < 500$ в работе [2] рекомендуют оценивать верхнюю границу числа Nu формулой Михеева:

$$Nu = 1,18(Gr \cdot Pr)^{1/8}. \quad (4)$$

Расчеты по этой формуле дают следующие значения: $Nu \approx 2$ и, соответственно, $\alpha \approx 26$ Вт/(м² · К).

В литературе [5] для макросистем рекомендуют ряд формул для расчета естественной конвекции вида:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n, \quad (5)$$

для горизонтальной плоскости (теплоотдающая поверхность снизу)

$$Nu = 0,27(Gr \cdot Pr)^{1/4}; \quad (5.1)$$

для горизонтальной плоскости (теплоотдающая поверхность сверху)

$$Nu = 0,54(Gr \cdot Pr)^{1/4}. \quad (5.2)$$

В работе [4] приведены следующие формулы:

$$Nu = 0,96 \cdot Ra^{1/6} \text{ для } Ra < 200; \quad (6)$$

$$Nu = 0,54 \cdot Ra^{1/4} \text{ для } 200 < Ra < 8 \cdot 10^6. \quad (7)$$

При $Ra > 200$ формулы (7) и (5.2) одинаковы ($Ra \equiv Gr \cdot Pr$).

Расчет по формуле $Nu = 0,27(Gr \cdot Pr)^{1/4}$ дает значения числа Нуссельта $Nu \approx 0,78$ и, соответственно, $\alpha \approx 10$ Вт/(м² · К), по (5.2) $Nu \approx 1,9$ и, соответственно, $\alpha \approx 25$ Вт/(м² · К).

При нормальных условиях с естественной конвекцией мембраны с воздухом коэффициент теплоотдачи лежит в диапазоне $8...26 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, соответственно, $RR_k = \frac{1}{\alpha_k}$ принимает значения от $\frac{1}{8}$ до $\frac{1}{26} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ (т. е. от 0,16 до 0,04 $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$).

При соотнесении значений теплового сопротивления конвективной составляющей можно сказать, что $RR_M \ll RR_k$ (RR_M имеет значение $10^{-7}...10^{-9} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$), т. е. в общем тепловом сопротивлении системы $RR = RR_M + RR_B$ можно пренебречь составляющей RR_M . Это означает, что в условиях стационарного теплообмена среднеинтегральная температура сенсора определяется конвекцией газовой среды, а не свойствами материала сенсора.

Рассмотрим еще один член, входящий в определение общего теплового сопротивления системы RR , отвечающий за радиационный теплообмен. Оценить его можно исходя из простого соотношения [4]:

$$\alpha_{\text{изл}} = \varepsilon \sigma \left(\frac{T_{\text{ст}}^4 - T_0^4}{T_{\text{ст}} - T_0} \right). \quad (8)$$

Коэффициент теплоотдачи излучением при $T_{\text{ст}} = 400 \text{ К}$, $T_0 = 300 \text{ К}$ принимает значения $\alpha_{\text{изл}} = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, при $T_{\text{ст}} \approx 320 \text{ К}$ — значение $\alpha_{\text{изл}} \approx 6,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и возрастает до $\alpha_{\text{изл}} \approx 80 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при $T_{\text{ст}} \approx 1000 \text{ К}$.

Оценка значений α говорит о том, что при нагревах чувствительного элемента до 100°С имеет смысл учитывать радиационную составляющую, поскольку она сопоставима по значениям с конвективной составляющей, а при более высоких значениях температуры — 500°С ($\alpha_{\text{изл}} \approx 30 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$) и выше, это будет основной вид теплообмена мембраны с окружающим воздухом.

3. Нестационарная задача об охлаждении тонкой мембраны

Динамические характеристики (быстродействие, частотные характеристики) чувствительных элементов сенсоров можно оценить, рассмотрев следующую задачу, — охлаждение тонкой мембраны. Охлаждение системы, градиентом температуры внутри которой можно пренебречь, определяется достаточно простым уравнением:

$$cm \frac{dT}{dt} = \alpha_p S (T - T_0), \quad (9)$$

где c — удельная теплоемкость сенсора; m — масса сенсора; S — площадь теплообмена сенсора с ок-

ружающей средой; α_p — эффективный коэффициент теплоотдачи.

Решение уравнения (9) хорошо известно:

$$\frac{T - T_0}{T^* - T_0} = \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (10)$$

где T^* — температура системы в момент времени $t = 0$; T_0 — температура жидкости (газа); $\tau = \frac{\rho V c}{\alpha S}$ — постоянная времени; ρ — плотность сенсора; V — объем; S — площадь теплообменной поверхности; c — теплоемкость.

Анализ влияния размерных факторов на постоянную времени позволяет говорить о тепловой инерционности системы, т. е. как и какие факторы влияют на быстродействие:

$$\tau = \frac{\rho V c}{\alpha S}. \quad (11)$$

Из соотношения (11) видно, что уменьшение τ можно осуществить за счет подбора материала с минимальной объемной теплоемкостью, уменьшения толщины, увеличения коэффициента теплоотдачи.

Следует заметить, что при преобладающем радиационном теплообмене уравнение (9) преобразуется в форму

$$\rho c v \frac{dT}{dt} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) S. \quad (12)$$

Это уравнение также имеет аналитическое решение, поскольку

$$\begin{aligned} \int A \frac{1}{(T^4 - T_0^4)} dT = \ln & \left[\frac{4T - 4T_0^4 \sqrt{\frac{A^2}{16T_0^6}}}{A} \right] \sqrt{\frac{A^2}{16T_0^6}} - \\ & - \ln \left[\frac{4T_0^4 \sqrt{\frac{A^2}{16T_0^6}} + AT}{A} \right] \sqrt{\frac{A^2}{16T_0^6}} - \\ & - \frac{A \ln(T + T_0)}{4T_0^3} + \frac{A \ln(T - T_0)}{4T_0^3}. \end{aligned} \quad (13)$$

Однако анализ решения, которое можно получить из (13), не так удобен в силу громоздкости, поэтому радиационный теплообмен разумней учитывать в коэффициенте теплоотдачи, если α_p оп-

ределить как $\alpha_p = \varepsilon \sigma \left(\frac{T^4 - T_0^4}{T - T_0} \right)$, то можно использовать решение (10) для анализа в случае радиационного переноса (т. е. для высоких температур, например для ИК-датчика).

4. Задача о минимальной площади сенсора, связанная с флуктуационным пределом

Рассмотренные ранее модели, описывающие стационарный и нестационарный теплообмен при работе теплового сенсора, основаны на континуальной теории, которая действует в предположении о возможности пренебрежения молекулярной структурой вещества.

Из рассмотренных ранее задач мы выяснили, что повышение быстродействия сенсора датчика можно технически осуществлять за счет уменьшения размеров [1]. Однако если принципы работы сенсора основаны на измерении макроскопических свойств, таких как плотность, вязкость, теплопроводность и т. д., то следует учитывать, что значения этих величин фактически определяются молекулами внутри небольшого объема элемента, охватывающего объем сенсора. Этот объем содержит N молекул, и макроскопические свойства среды подвержены статистическим флуктуациям около средних значений. Анализ числа молекул, необходимых для того, чтобы флуктуации были на уровне одного процента, проведен в работе [6]. Порядок отклонений $\delta = \Delta f/f$, где f — значение макроскопического параметра, определяется величиной $\frac{1}{\sqrt{N}}$ и должен быть на уровне одного процента, соответственно $N \approx 10^4$ молекул. **Чтобы статистические флуктуации не были существенными в определении величины, необходимо, чтобы сенсор усреднил значения не менее 10^4 молекул, т. е.**

$$N \geq 10^4. \quad (14)$$

Среднее число ударов молекул о стенку в единицу времени можно определить [6] как $z = \frac{1}{4} n \bar{v}$, где n — концентрация молекул в единице объема; $\bar{v}$ — средняя скорость молекул, тогда N — число ударов о сенсор будет равно

$$N = zSt,$$

где S — площадь сенсора; t — время измерения.

Условие (14) тогда можно записать в форме неравенства:

$$zSt \geq 10^4. \quad (15)$$

Используем следующее выражение для $\bar{v}$ — наиболее вероятной скорости:

$$\bar{v} = \sqrt{2 \frac{R}{\mu} T},$$

где R — газовая постоянная; T — температура; μ — молекулярный вес среды.

Неравенство (15) с учетом выражения для наиболее вероятной скорости примет вид:

$$St \geq \frac{10^4}{\frac{1}{4} n \sqrt{2 \frac{R}{\mu} T}}. \quad (16)$$

Для воздуха при нормальных условиях выражение (16) примет следующий вид:

$$St \geq 4 \cdot 10^3 \text{ нм}^2 \cdot \text{нс}, \quad (17)$$

где S — площадь сенсора, t — время измерения,

Таким образом, из (17) следует, что при нормальных условиях для воздушной среды, если сенсор работает на максимальных скоростях определения (порядка времени тепловой релаксации около 0,1 нс), его площадь не может быть меньше 400 нм^2 .

Заключение

1. Минимальная площадь сенсора датчика, работающего по принципу измерения, определения или зависимости от макровеличин газа (давления, вязкости, температуры и т. д.), определяется соотношением (16).

2. Параметры тепловой инерционности зависят от общей теплоемкости материала сенсора и обратно пропорциональны коэффициенту теплоотдачи, соответственно, уменьшение размеров системы прямо пропорционально уменьшению тепловой инерционности.

3. При стационарном теплообмене в условиях, близких к стандартным (давление 1 атм и температура около 298,15 К), значение среднеинтегральной температуры сенсора определяется конвекцией газовой среды, а при нагревах чувствительного элемента до 100°C следует учитывать радиационную составляющую, поскольку она сопоставима по значениям с конвективной составляющей.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации по теме "Физико-технологические основы формирования высокочувствительных нано- и микромембранных элементов", соглашение № 14.B37.21.0082, в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 годы и Программы стратегического развития университета (СПбГЭТУ "ЛЭТИ") "Развитие междисциплинарных исследований и инструментально-технологической базы как основа непрерывного инженерного образования по приоритетным направлениям российской экономики" на 2012—2016 годы.

Список литературы

1. Корляков А. В. Сверхтонкие мембраны в микросистемной технике // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 8. С. 17—26.
2. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача: учебник для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. — М.: Энергия, 1975. — 488 с.
3. Morini G. L. Single-phase convective heat transfer in microchannels: a review of experimental results // International Journal of Thermal Science. 2004. N 43. P. 631—651.
4. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
5. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: пер. с англ. / Справочник. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.
6. Кириченко Н. А. Термодинамика, статистическая и молекулярная физика. М.: Физматкнига, 2005. 176 с.

А. Н. Аскерко, аспирант,
О. С. Бохов, канд. техн. наук, нач. лаб.,
В. В. Лучинин, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,
 Санкт-Петербургский государственный
 электротехнический университет "ЛЭТИ"
 им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ),
 e-mail: askerko@est-test.ru

ИСПЫТАНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ И СИСТЕМ НА ИХ ОСНОВЕ

Поступила в редакцию 20.09.2012

Рассмотрены современное состояние рынка микро-системной техники, особенности комплектования аппаратуры МСТ-компонентов, метрологическое обеспечение и стандартизация. Обобщены вопросы испытаний, определения характеристик надежности электронной компьютерной базы микросистемной техники.

Ключевые слова: микросистемная техника, микро-электромеханические системы, испытания МЭМС

Введение

Начало нового столетия характеризуется ростом интенсивности разработок междисциплинарного характера, что связано с острой потребностью в миниатюрных автономных интегрированных системах с ранее недостижимыми функциональными параметрами, массогабаритными и энергетическими характеристиками [1].

Микросистемная техника (МСТ) в настоящее время наиболее полно отражает возможность интеграции механики, электроники, оптики, теплофизики, химии и биологии. Определяющими факторами успешного продвижения МСТ-компонентов являются:

- функциональное многообразие решаемых задач;
- малые размеры и энергопотребление по отношению к традиционным конструктивно-техническим решениям при обеспечении аналогичных функций;
- относительная простота интеграции с традиционной электронной компонентной базой для преобразования сигналов хранения и передачи информации;
- высокая воспроизводимость параметров, минимизирующая временные затраты на этапе разработки и особенно настройки в составе системы;
- стойкость к внешним воздействиям за счет интегральных или интегрированных конструктивно-технологических решений;
- требуемые показатели качества изделия при доступной сопоставимой цене.

Следует констатировать тот факт, что на настоящем этапе аппаратное и методическое обеспечение стадий контроля и испытательной электронной компонентной базы (ЭКБ) микросистемной техники находится на этапе становления.

Цель данной работы — системное изложение методических вопросов обеспечения разработки, тестирования, квалификации и сертификации изделий микросистемной техники.

В основу предоставленных материалов положен комплекс работ, проводимых совместно:

— Центром микротехнологии и диагностики СПбГЭТУ "ЛЭТИ" (проектирование, разработка технологии и изготовление компонентов МСТ);

— Испытательной лабораторией ЗАО "НПЦ ЭлТест" (сертифицированные, квалификационные, отбраковочные испытания и поставка ЭКБ);

— ЗАО "Нева Электроника" (поставка типовой и специализированной заказной ЭКБ МСТ).

Данные работы были направлены на разработку и создание следующих опытных образцов:

- миниатюрных навигационно-ориентировочных интегрированных модулей на основе микроэлектромеханических систем;
- низкоэнергопотребляющих радиотехнических модулей (фазовращателей) на основе микромеханических ключей;
- сверхвысокочувствительных виброакустических микрооптомеханических систем с волоконно-оптическим съемом информации.

Современное состояние ЭКБ микросистемной техники

Отличительной особенностью современного этапа развития микросистемной техники является интеграция в сверхмалом объеме твердого тела или на его поверхности чувствительных, исполнительных, энергообеспечивающих элементов, в основе функционирования которых лежит активное использование принципов механики, электротехники, оптики, теплотехники, химии и биологии.

Анализируя внутреннюю структуру изделий микросистемной техники, следует отметить интеграцию совокупности разнородных базовых функциональных элементов: сенсоров, актюаторов, процессоров, генераторов и рекуператоров энергии, информационно-телекоммуникационных модулей (рис. 1).

Наряду с этим в изделиях МСТ реализуется целая совокупность разнообразных связей: механических, электрических, оптических, жидкостных.

В случае микроэлектромеханических систем (МЭМС) как базовых компонентов МСТ наличие в их составе движущихся механических частей, используемые методы проектирования и изготовления, а также заложенные в изделия принципы функционирования, безусловно, определяют и специфические, отличные от микроэлектронной техники, механизмы отказов. Этим определяется необходимость разработки специальных методов испытаний и определения показателей надежности для изделий МСТ.

Развитие направления контроля изделий МСТ невозможно без стандартизации в области микросистем

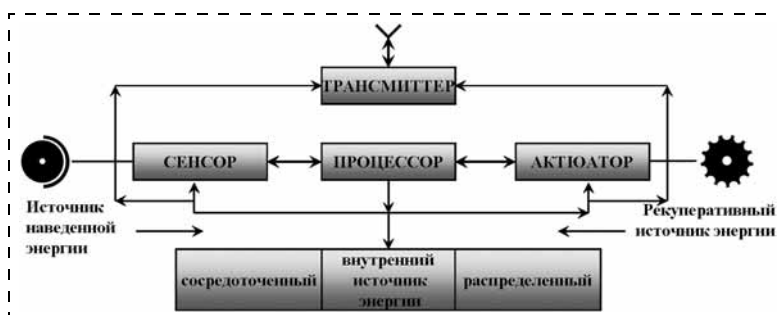


Рис. 1. Обобщенная схема компонента микросистемной техники

и метрологического обеспечения всех стадий их создания. Определенные трудности при проведении общей стандартизации микросистем фактически привели к выделению направления стандартизации МСТ. Окончательно приняты только стандарты, определяющие терминологию и классификацию. Общие технические условия разработаны и находятся на стадии согласования только для двух видов изделий МСТ — акселерометров и гироскопов.

Стандарты, относящиеся к специализированным испытаниям, для изделий микросистемной техники отсутствуют.

Отечественные стандарты в области МСТ

Принятые стандарты:

- ГОСТ РВ 0159-002—2008. Микросистемная техника военного назначения. Термины и определения.
- ГОСТ РВ 0159-003—2008. Микросистемная техника военного назначения. Термины, определения и буквенные обозначения параметров.
- ГОСТ РВ 5962-003—2009. Микросистемная техника. Классификация и система условных обозначений.

Стандарты на этапе согласования:

- ГОСТ РВ 5962... Микросистемная техника. Преобразователи линейного ускорения микроэлектромеханические. Общие технические условия.
- ГОСТ РВ 5962 — Микросистемная техника. Преобразователи угловой скорости микроэлектромеханические. Общие технические условия.

Особого внимания заслуживает принятая классификация МСТ (рис. 2, см. вторую сторону обложки), указывающая на чрезвычайно широкое многообразие изделий по принципам действия, входным и выходным сигналам, что значительно усложняет аппаратно-методическое обеспечение испытаний изделий МСТ.

Международный электротехнический комитет (МЭК-IEC) выпустил специальный международный стандарт IEC 62047:2005. "Полупроводниковые приборы. Микроэлектромеханические приборы". К настоящему времени опубликовано пять стандартов группы, регламентирующих стадии производства, измерений и испытаний МЭМС.

Стандарты МЭК (IEC), ориентированные на МСТ

- IEC 62047—1:2005. Полупроводниковые приборы. Микроэлектромеханические приборы. Часть 1. Термины и определения.
- IEC 62047—2:2006. Полупроводниковые приборы. Микроэлектромеханические приборы. Часть 2. Метод испытания на растяжение тонких пленочных материалов.
- IEC 62047—3:2006. Полупроводниковые приборы. Микроэлектромеханические приборы. Часть 3. Стандартный образец тонкой пленки для испытаний на растяжение.
- IEC 62047—4:2008. Полупроводниковые приборы. Микроэлектромеханические приборы. Часть 4. Общие технические условия на микроэлектромеханические системы.
- IEC 62047—6:2009. Полупроводниковые приборы. Микроэлектромеханические приборы. Часть 6.

Методы испытаний на усталость тонких пленочных материалов при осевой нагрузке.

Аналогичные принципы заложены в группе стандартов для стандартизации МСТ, разработанных Международной ассоциацией производителей оборудования и материалов для полупроводниковой промышленности SEMI (Semiconductor Equipment and Material International): Semi PR11-1105 "Terminology for MEMS".

Стандарты, принятые SEMI в области МСТ

SEMI MS 1-0307 — Guide to Specifying Wafer-Wafer Bonding Alignment Targets

SEMI MS2-1109 — Test Method for Step Height Measurements of Thin Films

SEMI MS3-0307 — Terminology for MEMS Technology

SEMI MS4-1109 — Standard Test Method for Young's Modulus Measurements of Thin, Reflecting Films Based on the Frequency of Beams in Resonance

SEMI MS5-1107 — Test Method for Wafer Bond Strength Measurements Using Micro-Chevron Test Structures

SEMI MS6-0308 — Guide for Design and Materials for Interfacing Microfluidic Systems

SEMI MS7-0708 — Specification for Microfluidic Interfaces to Electronic Device Packages

SEMI MS8-0309 — Guide to Evaluating Hermeticity of MEMS Packages

Важность метрологического обеспечения всех стадий создания изделий МСТ очевидна так же, как и международная кооперация, обеспечивающая единство терминологии [6].

В заключение этого раздела отметим, что на данном этапе в Российской Федерации введен в действие следующий основополагающий стандарт ГОСТ РВ 0159-002—2008, в рамках которого **изделие микросистемной техники (микросистема) определено как совокупность микроэлектронных управляющих и функциональных исполнительных элементов и компонентов в едином конструктивном исполнении, принцип действия которых основан на электрофизических, электромеханических, электрохимических, электронно-оптических, фотохимических процессах и явлениях с учетом эффектов масштабирования при переходе от макро- к микро- и наноразмерным уровням.**

Особенности комплектования аппаратуры электронной компонентной базой МСТ

Определяющими успеха МСТ компонентов на рынке стали малые размеры и энергопотребление, воспроизводимость параметров, стойкость к внешним воздействиям, интеграция с микроэлектронным обрамлением, требуемые показатели качества изделия при доступной цене.

Неоспоримые достоинства МЭМС-компонентов определяют оправданность и необходимость их применения в современной высоконадежной аппаратуре, в том числе космического и специального назначения. Первейшей задачей становится определение заявленных эксплуатационных характеристик и показателей надежности.

Существуют два подхода к проблеме комплектования аппаратуры высокотехнологичными изделиями микросистемной техники.

Первый подход основан на отборе изделий с необходимыми характеристиками и последующей их закупкой, к сожалению, как правило, у иностранных про-

изготовителей (рис. 3, см. вторую сторону обложки) и последующей сертификацией. Закупленные изделия должны подвергаться комплексу испытаний и измерений для подтверждения заявленных характеристик эксплуатационной модели и определения показателей надежности. Анализ востребованности ЭКБ МСТ на российском рынке, выполненный ЗАО "Нева Электроника", специализирующимся на поставке МСТ-компонентов, определил следующие группы приоритетных МСТ-компонентов иностранного производства: микроакселерометры и гироскопы, МЭМС-генераторы частоты и резонаторы, СВЧ-МЭМС-ключи, микрозеркала.

Однако специализированные МЭМС-компоненты часто попадают под контроль со стороны экспортных комиссий стран-изготовителей (оформление *end user*-форм — соглашений конечного пользователя — и экспортных лицензий). Данная процедура занимает до 12 месяцев и в ряде случаев может закончиться отказом на поставку изделий. Производство МЭМС на фабриках по собственной технической документации обеспечивает повышение вероятности получения необходимой продукции и частично снимает ограничения на поставку.

Второй подход предполагает проектирование ЭКБ МСТ в российском дизайн-центре (*fables*-компания), не имеющем собственного полупроводникового производства. Изготовление изделий по разработанной технической документации осуществляется на фабрике (*foundries*), специализирующейся в области микро- и нанотехнологии. При проектировании и конструировании изделий МСТ наиболее значимыми задачами являются: определение адекватных (реальных) характеристик используемых материалов, тестовые измерения образцов, контроль характеристик элементов конструкции и изделия в целом.

Определенный опыт разработки и изготовления заказных МЭМС-компонентов накоплен в Центре микротехнологии и диагностики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ).

Контроль и испытания ЭКБ МСТ

Специфичность задач контроля и испытания компонентов МСТ, сложность предварительной оценки характеристик используемых материалов и конструктивных элементов определяет необходимость создания комплексного аппаратно-методического обеспечения при формировании Центра по испытаниям и тестированию ЭКБ МСТ.

Фактически необходимо организовать входной контроль, сертификационные (квалификационные) и отбраковочные испытания ЭКБ МСТ. В качестве решаемых задач можно выделить следующие:

- квалификация (определение эксплуатационных характеристик);
- анализ качества изготовления;
- оценка качества соответствия конструктивно-технологическим требованиям;
- оценка конструктивно-технологических запасов микросистем;
- физико-техническая экспертиза, в том числе анализ отказов и дефектов;
- оценка показателей надежности;
- тестирование изделий;
- определение характеристик материалов МЭМС.

Приведем составные элементы контроля и испытания ЭКБ МСТ.

1. Входной контроль (оценка параметров ЭКБ, выявление бракованных изделий).

Является единственным элементом системы обеспечения качества и надежности, который применяется по отношению ко всем изделиям путем осмотра и испытаний каждой выборки и позволяет предварительно оценить качество партии.

2. Отбраковочные (дополнительные) испытания. Выявление потенциально ненадежных ЭКБ.

Цель отбраковки МЭМС — обнаружение и удаление дефектных изделий и снижение интенсивности отказов при приработке. Процесс отбраковки дает первичную оценку надежности.

3. Сертификационные (квалификационные) испытания. Проверка на соответствие модели ВВФ и/или области применения.

Многообразие составных элементов изделий МСТ, принципов их функционирования и используемых материалов и технологий, особенностей проектирования, изготовления и эксплуатации определяют достаточно сложную, отличную от традиционной ЭКБ модель отказов (рис. 4, см. вторую сторону обложки).

Анализируя зарубежный опыт тестирования ЭКБ МСТ, следует отметить, что, учитывая разнообразие компонентной базы, ее первоначально разделяют на классы (табл. 1) исходя из особенностей конструкции движущихся частей.

Далее устанавливается оптимальный состав квалификационных испытаний для каждого вида изделий из класса. Примеры рекомендуемой номенклатуры квалификационных испытаний для микроакселерометров (класс I) и микрозеркал (класс IV) представлены в табл. 2 и 3 соответственно.

В настоящее время СПбГЭТУ "ЛЭТИ" и ЗАО "НПЦ ЭлТест" интегрировали усилия по созданию комплексной испытательной базы МЭМС-компонентов и систем на их основе. Фактически уже сейчас сформирована уникальная испытательная и аналитическая база для проведения тестирования, сертификации и квалификации МЭМС-компонентов. На рис. 5 (см. вторую сторону обложки) представлено распределение функций между партнерами.

Таблица 1

Классификация МЭМС по характеристикам (Министерство обороны США)

Класс	Характеристики	Пример
Class I	Нет движущихся частей	Акселерометры Датчики давления
Class II	Движущиеся части Нет соприкасающихся поверхностей	Гироскопы Резонаторы Фильтры
Class III	Движущиеся части Соприкасающиеся поверхности	Реле Вентили Помпы
Class IV	Движущиеся части Соприкасающиеся и трущиеся поверхности	Оптические переключатели Сканеры Детекторы
Class V	Движущиеся части Взаимодействие с взрывчатыми веществами, топливом и т.п.	

Таблица 2

Квалификационные испытания акселерометров

Испытание	Метод	Объем выборки
Воздействие повышенной рабочей температуры среды	Mil-Std-883 Method 1005 Condition C	135
Термоудар	Mil-Std-883 Method 1011 Condition C	135
Термоциклирование	Mil-Std-883 Method 1010 Condition C	135
Повышенная температура при хранении	Mil-Std-883 Method 1008 Condition C	405
Пакет испытаний по группе D, подгруппа 4 Ударопрочность Вибропрочность Ускорение Герметичность Электрическое тестирование	Mil-Std-883 Method 5005	135
Одиночный удар	0,3 m X, Y, Z	135
Множественный удар	10 ударов	405

Таблица 3

Квалификационные испытания микрозеркал

Испытание	Описание	Часы/циклы (минимум)
Хранение холод/тепло	–55/100 °C, без питания	1000 ч
Термоциклирование	–55/125 °C, воздух—воздух с проверкой герметичности	1000 циклов
Термоудар	–55/125 °C, жидкость—жидкость	200 циклов
Группа испытаний 1	1500 g, одиночные удары по оси Y Вибрация 20 g, 20–2000 Гц Ускорение 10 000 g	
Группа испытаний 2	Термоудар, –55/125 °C Термоциклы, –55/125 °C Влага	15 циклов 100 циклов 10 дней

Испытательная база ЭКБ МСТ

Комплекс для контроля топологии, геометрии и состава. Анализ причин отказов и конструктивно-технологических характеристик изделий аналогов [7] осуществляется на микроскопическом комплексе, интегрирующем все виды классической и зондовой микроскопии (рис. 6, см. третью сторону обложки). Пример топологического анализа кристалла акселерометра приведен на рис. 7 (см. третью сторону обложки).

Для измерения зависимости прогиба мембран от механического воздействия в Центре микротехнологии и диагностики был создан специализированный

стенд, внешний вид и структурная схема которого представлены на рис. 8 (см. третью сторону обложки).

Измерение прогиба мембраны проводили с применением волоконно-оптического интерферометра Фабри—Перро. Мембрана приклеена на основание, которое присоединено к управляемому источнику повышенного давления и наконечнику волоконно-оптического интерферометра. Изменения давления фиксировались с помощью датчика давления и вместе с сигналом от фотоприемника интерферометра регистрировались на аналоговом входе платы ввода-вывода. После аналого-цифрового преобразования сигнал сохранялся в памяти компьютера и в дальнейшем использовался для расчета зависимости прогиба мембраны от давления.

В качестве примера приведем совместный проект по проведению входного контроля и сертификационных испытаний (табл. 4) с целью определения возможности применения в заданных условиях эксплуатации аппаратуры.

Испытаниям были подвергнуты два типонаминала микромеханических генераторов:

- SiT8103AI-22-33S-25.00000,
- SiT9102AI-242N33E180.00000 Ж.

SiT8103 представляет собой генератор прямоугольных импульсов с частотой 25 МГц; выход — однополярный. SiT9102 — генератор прямоугольных импульсов с частотой 180 МГц и дифференциальным выходом (LVDS). Заявленная производителем стабильность частоты составляет ± 25 ppm, напряжение питания 3,3 В, диапазон рабочих температур от –30 до +80 °C.

Тестирование микромеханических генераторов.

Измерение электрических параметров и функциональный контроль МЭМС-генераторов включает контроль всех основных электрических параметров изделий при комнатной температуре, контроль параметров на краях рабочего температурного диапазона (–30 °C и +80 °C), при входном контроле и после каждого испытания на воздействие внешних воздействующих факторов.

Специально для проведения испытаний был разработан и изготовлен набор тестового оборудования, содержащий следующие устройства:

- стенд № 1 для измерения параметров МЭМС-генераторов при комнатной температуре (рис. 9, см. четвертую сторону обложки);
- стенд № 2 для измерения параметров МЭМС-генераторов в термостате (при повышенной и пониженной температуре) и проведения электротермотренировки (рис. 10, см. четвертую сторону обложки);
- устройство сбора данных для совместной работы со стендом № 2 (рис. 11, см. четвертую сторону обложки).

В табл. 5 приведены значения контролируемых параметров, заявленные производителем, и обобщенный результат измерений для всей партии образцов.

В ходе проведения испытаний была исследована партия МЭМС-генераторов SiT8103 с выходной частотой 25 МГц и МЭМС-генераторов SiT9102 с выходной частотой 180 МГц.

Тестирование на этапе входного контроля включало измерение всех основных электрических параметров образцов при комнатной температуре и на краях рабочего диапазона температур: при –30 °C и +80 °C, а также электротермотренировку в течение 24 ч при температуре +80 °C.

Программа проведения сертификационных испытаний

№	Пункт программы	Метод, значение воздействующего фактора
1	Проведение параметрического и функционального контроля изделия при нормальных климатических условиях	$T = 25 \pm 10^\circ\text{C}$; $\varphi = 45...75\%$; $P = 645...795$ мм рт. ст.
2	Проведение параметрического и функционального контроля при повышенной температуре	$T_B = 80^\circ\text{C}$; $t = 30$ мин
3	Проведение параметрического и функционального контроля при пониженной рабочей температуре	$T_H = 30^\circ\text{C}$; $t = 30$ мин
4	Определение собственной резонансной частоты конструкции изделий	ГОСТ РВ 20.57.416—98, метод 100-1.1, диапазон частот 10...20 000 Гц
5	Испытание на воздействие синусоидальной вибрации (вибропрочность)	ГОСТ РВ 20.57.416-98, метод 103-1.1, диапазон частот $F = 10...2000$ Гц, $j = 10$ g. Продолжительность испытаний $t = 6$ ч по осям X, Y, Z
6	Испытание на ударную прочность при воздействии механического удара одиночного действия	ГОСТ РВ 20.57.416—98, метод 106-1, $j = 100$ g, $\tau = 0,5$ мс, по 5 ударов по осям X, Y, Z
7	Испытания на воздействие изменения температуры	ГОСТ РВ 20.57.416-98, метод 205-2, от -500 до $+500^\circ\text{C}$; число циклов — 5; продолжительность одного цикла — 1 ч
8	Испытание на воздействие повышенной температуры среды	ГОСТ РВ 20.57.416—98, метод 201-1,202, ТВР, $T_{\text{вп}} = 50^\circ\text{C}$, $t = 30$ мин
9	Испытания на воздействие повышенной влажности воздуха	ГОСТ РВ 20.57.416—98, метод 207-2, $T = 25^\circ\text{C}$, $\varphi = 98 \pm 3\%$, $t = 6$ сут
10	Испытание на воздействие пониженной температуры среды	ГОСТ РВ 20.57.416—98, метод 203, $T_{\text{Нр}} = -20^\circ\text{C}$, $t = 30$ мин
11	Испытание на воздействие пониженного атмосферного давления	ГОСТ РВ 20.57.416—98, метод 209-1, $P = 10^{-1}$ мм рт. ст.
12	Испытание на акустическое воздействие	ГОСТ РВ 20.57.416—98, метод 108-2, диапазон частот $F = 125...10\,000$ Гц; суммарный среднеквадратический уровень акустического давления 150 дБ; длительность — 7,5 мин
13	Испытание на способность к пайке	ГОСТ РВ 20.57.416—98, метод 402-1, $T = 235^\circ\text{C}$
14	Испытание на пожарную безопасность (горючесть)	ГОСТ РВ 20.57.416-98, метод 409-1, время приложения пламени 10 с

Тестирование показало, что все образцы МЭМС-генераторов SiT8103AI-22-33S-25.00000 имеют характеристики, полностью соответствующие заявленным производителем во всем диапазоне рабочих температур. Отказов или ухода электрических характеристик

за пределы допустимых значений после проведения процедуры электротермотренировки не выявлено.

Четырнадцать из пятнадцати исследованных образцов МЭМС-генераторов SiT9102AI-242N33E-180.00000 имеют характеристики, полностью соответствующие

Таблица 5

Обобщенные экспериментальные данные

Параметр	Источник значений	Тип изделия	Тип изделия
		SiT8103	SiT9102
Время запуска при подаче питания, мс	Значение согласно технической документации	макс 10	—
	Результат измерения	6,4—6,8	—
Время выхода из дежурного режима, мс	Значение согласно технической документации	3 тип.; 4 макс.	—
	Результат измерения	2,6—2,8	—
Ток потребления в активном режиме, мА	Значение согласно технической документации	6,7 тип.; 7,5 макс.	73 тип.; 79 макс.
	Результат измерения	7,3	69-71
Ток потребления в дежурном режиме, мкА	Значение согласно технической документации	2,4 тип.; 4,3 макс.	—
	Результат измерения	2,0—2,2	—

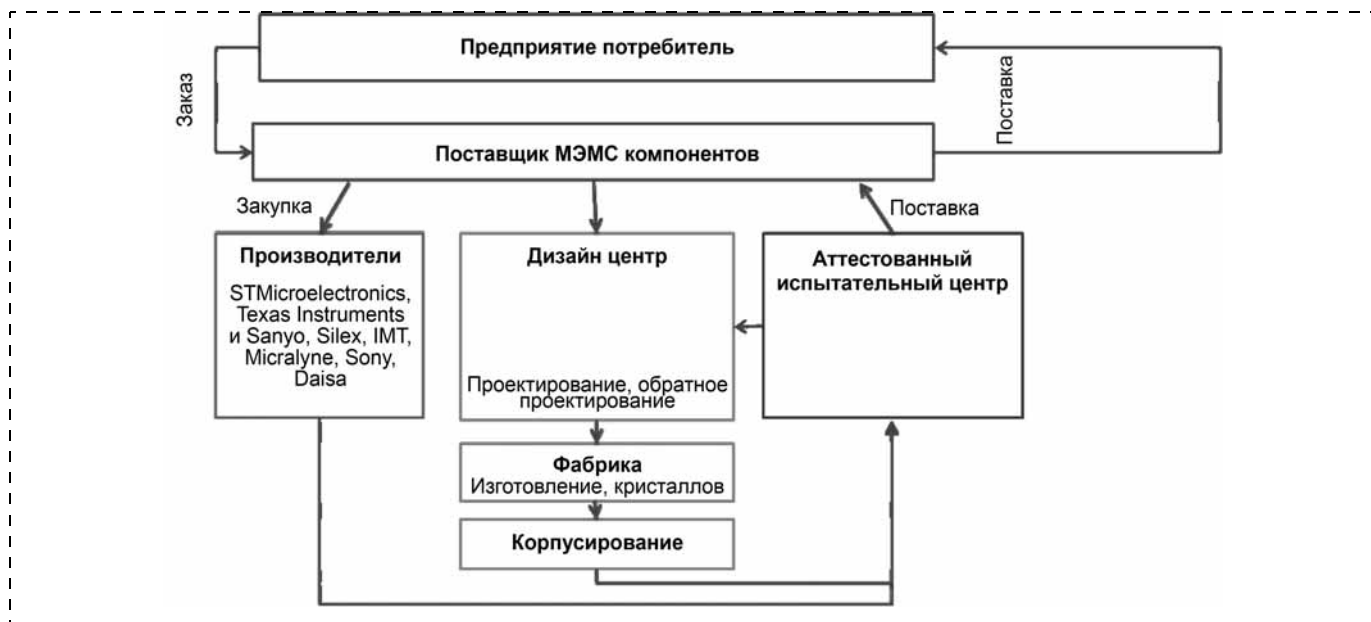


Рис. 12. Структурная схема совместного проекта по обеспечению отечественных потребителей ЭКБ МСТ

заявленным производителем во всем диапазоне рабочих температур. Один из образцов отбракован по результатам измерения выходной частоты генерации как имеющий заниженное значение данного параметра.

Проведенная работа по сертификации микромеханических генераторов подтвердила возможность применения данных изделий в требуемых условиях эксплуатации.

Заключение

Разработка, изготовление, поставка, тестирование, измерение характеристик и испытание изделий микро системной техники — сложная и в настоящий момент недостаточно формализованная научно-практическая задача, требующая консолидации усилий профессионалов. Начало такой работе фактически положено в рамках совместного проекта (рис. 12), реализуемого Центром микротехнологии и диагностики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета.

В рамках реализации данного проекта решаются задачи проектирования, изготовления, поставки и испытания изделий микро системной техники в рамках двух направлений:

- разработка и изготовление отечественной ЭКБ МСТ;
- использование в аппаратуре ЭКБ МСТ иностранного производства.

Для обеспечения отечественных предприятий разработчиков и поставщиков технически нового поколения современной ЭКБ МСТ фактически сформирован кла-

стер контрольного обеспечения ЭКБ МСТ с разделением функций (рис. 13, см. четвертую сторону обложки).

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

Список литературы

1. Лучинин В. В. Формирование шестого технологического уклада. Эволюция биотехносферы // Биотехносфера. 2011. № 1—2 (13—14). С. 5—10.
2. Лучинин В. В. Микросистемная техника: направления и тенденции развития. // Научное приборостроение РАН. 1999. Т. 9, № 1. С. 3—18.
3. Лучинин В. В., Степанов Ю. И., Телец В. А. Микросистемная техника. Прикладные области применения. М.: Изд. МИРЭА, 2004.
4. Лучинин В. В., Таиров Ю. М. Микросистемная техника — новая специальность государственного образовательного стандарта // Петербургский журнал электроники. 2000. № 3—4. С. 131—138.
5. Вернер В. Д., Иванов А. А., Коломенская Н. Г., Лучинин В. В., Телец В. А. Изделия микро системной техники — основные понятия и термины. // Нано- и микро системная техника. 2007. № 12. С. 2—5.
6. Вернер В. Д., Сауров А. Н., Иванов А. А., Коломенская Н. Г., Лучинин В. В., Мальцев П. П., Попова И. В. Изделия микро системной техники — термины и определения, классификация и обозначение типов. Нанотехнологии, наноматериалы, наносистемная техника. Мировые достижения — 2008. М.: Техносфера, 2008. С. 423—430.
7. Лучинин В. В., Садовая И. М. Реинжиниринг кристаллов интегральных схем // Петербургский журнал электроники. 2009. № 2. С. 5—25.

Luchinin V. V. *Principle of Matrix as the Foundation of Interdisciplinary Technologies* 2

This article presents the analysis of the structural and topological coding principles evolution in micro- and nanotechnology. The principle of matrix as a convergent interdisciplinary technology basis is discussed in detail.

Keywords: micro- and nanotechnology, structural and topological coding, principle of matrix, temporal relationship, non-equilibrium thermodynamic approach

Gareev K. G., Gracheva I. E., Moshnikov V. A. *Sol-gel Method of Nanocomposition Directed Synthesis on the Base of Nanosized Magnetic Fraction in Pores of Sealing Dielectric Matrix* 9

Magnetic properties of nanocomposites and development prospects of technological magnetic nanocomposites formation methods compatible with the construction of nano-devices and microsystem technology were reviewed.

Magnetic nanocomposites based on ferrite nanophase with the hierarchical structure were sol-gel derived. Complex analysis of nanocomposite layers of Fe—Ni—O—Si and Fe—Mn—O—Si systems was carried out by methods of thermal desorption, atomic force microscopy, reflection high-energy electron diffraction, vibrating sample magnetometry.

Keywords: magnetic nanomaterials, ferrites, hierarchical structure, sol-gel technology

Kalyonov V. E., Korlyakov A. V. *Frequency-Resonance Method of Measurement of Mechanical Effect by Non-linear Micromechanical Transformer* 15

Basic principle measurement of frequency-resonance method by nonlinear micromechanical transformer is developed in this article. The condition for increasing sensitivity of nonlinear micromechanical transformer by movement and force is offered. There is an example of accelerometer on principle of nonlinear micromechanical transformer and optimization its parameters is done.

Keywords: MEMS, micromechanical accelerometer, nonlinear micromechanical transformer, frequency-resonance method of measurement

Alexandrova O. A., Maximov A. I., Maraeva E. V., Matyushkin L. B., Moshnikov V. A., Musikhin S. F., Tarasov S. A. *Synthesis and Self-Organization of Lead Sulphide Quantum Dots for Luminescent Structures Obtained by Colloidal Solution Evaporation* 19

The results of technology development for obtaining nanomaterials containing the arrays (nanosystems) of lead sulphide colloidal quantum dots are reported. Luminescent properties of quantum-dimensional elements composing hierarchical nanosystem are studied with the use of atomic force microscopy and photoluminescence measurement. A possible range of application in medicine diagnostics for lead sulphide quantum dots arrays was found.

Keywords: quantum dots, colloidal solution, lead sulphide, self-organization, photoluminescence, medicine diagnostics

Astashenkova O. N., Korlyakov A. V. *The Physical and Mechanical Parameters Control of Thin Films* . . 24

In this paper we describe the methods of measurement and calculation of compressive and tensile internal mechanical stress and Young's modulus of single-layer and composite membrane structures based on thin films of various materials. The results of measurements of mechanical stress and Young's modulus of films of different materials are presented.

Keywords: internal stress, thin films, properties of thin films, methods of measuring internal stress, Young's modulus, membranes

Afanasiev A. V., Demin Yu. A., Ivanov B. V., Ilyin V. A., Kardo-Sysoev A. F., Luchinin V. V., Smirnov A. A. *Miniature High Voltage SiC Source of Nanosecond Pulses for Generation of X-Ray and Microwave Radiation* 30

The results of development and experimental investigation of solid-state high voltage nanosecond pulse generators component for generation of X-ray and microwave radiation are presented. The basic component of electromagnetic radiation generation system is the developed novel superfast drift step recovery diode representing multilayer epitaxial silicon carbide structure, that provides the rate of voltage rise at the level of several volts per picosecond and pulse amplitude up to 2 kV.

Keywords: generation systems, X-ray and microwave radiation, drift step recovery diode, nanosecond pulse generator, silicon carbide

Korlyakov A. V., Ustinov E. M. Criteria and Optimization of Vibration Sensor. 33
 This article discusses how to extend the range of frequencies at the same time increasing the sensitivity of vibration sensors and containing in their structure, mechanical converters (transformers). The variants of the use of mechanical transducers is investigated, their advantages and disadvantages. Optimization criteria are to be considered in the development of such devices.

Keywords: vibration sensors, optimization criterion, a mechanical transformer, the equivalent electrical circuit

Goremykin N. I., Koygerov A. S., Smelov I. N. Small Type SAW ID-Tags. 37
 SAW ID-tags are considered. Constructive and functional features of SAW ID-tags are presented. SAW ID-tags signal-code sequences for serial and correlation receiving are presented. Class of size-reducing wire antennas in dielectric material is considered. The research results of developed and manufactured experimental models are presented.

Keywords: SAW ID-tag, signal-code sequence, wire antenna, helical antenna, dielectrical environment

Broiko A. P., Lenchuk O. S. Analysis of the Thermal State of the Microsensor Made on the Basis of Thin-Film Technology. 45
 The analysis of the thermal state microsensor made on the basis of thin-film technology, with the assessment calculations. Consider a model of the problem of stationary heat a thin membrane unsteady cooling of a thin membrane, the minimum area of the sensor associated with the fluctuation limit. Calculated that for air, if the sensor is working at maximum speeds of the definition (the order of the thermal relaxation time), its size can not be smaller 400 nm^2 .

Keywords: thermal state, microsensors, fluctuation limit

Askerko A. N., Bokhov O. S., Luchinin V. V. Testing and Verification of Microelectromechanical Components and Systems 49
 There are described now days market of microsystems, peculiarity of equipment with MEMS devices, test equipment support and electronic standards. In this paper was made the combining of question of testing, characteristic determinations and reliability of MEMS devices.

Keywords: microsystems, MEMS, MEMS testing

For foreign subscribers:

Journal of "NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE" (Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, ISSN 1813-8586)

The journal bought since november 1999.

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

ISSN 1813-8586.

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

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

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, 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 *З. В. Наумова*

Сдано в набор 18.12.2012. Подписано в печать 23.01.2013. Формат 60×88 1/8. Заказ МС213.

Цена договорная

Оригинал-макет ООО «Авансед солюшнз».

Отпечатано в ООО «Авансед солюшнз». 105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятничская, д. 5/7, стр. 2, офис 2.