

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

Григорин-Рябова Е. В. Чугунова А. В. Учредитель: Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ _

Издается с 1999 г.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Александров П. А., Баранова Е. К., Баранова И. В., Бударагин В. В., Литвинов В. Л., Свечников А. Б. Отличия возлействия излучения на нано-	
электронные материалы, приборы, схемы и на их микроэлектронные аналоги .	2
Яшин К. Д., Терпинская Т. И., Осипович В. С., Лемеш Р. Г., Жавнерко Г. К., Зильберман Р. Д., Петрович В. С. Технология создания медицинской нанобио- информационной диагностической системы на полупроводниковых нанокри- сталлах	11
Раткин Л. С. Нанотехнологические школы России: этапы становления и меж- дународная кооперация	15
ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ	
Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е., Васильев В. А. Повышение стабильности тонкопленочных нано-и микроэлектромеханических систем датчиков давления для систем измерения, контроля и диагностики технически сложных объектов.	21
Соловьев А. Н., Алексеев В. Е. Безгироскопная инерциальная система на основе акселерометров	26
Афонин С. М. Характеристики многослойных пьезоактюаторов нано- и микро- перемещений с параллельным и кодовым управлением	32
Королева В. А., Болтунов Д. В., Жуков А. А. Оценка характеристик микрораз- мерных слоистых исполнительных элементов устройств микросистемной тех- ники	42
СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ	
Мальцев П. П., Матвеенко О. С., Гнатюк Д. Л., Лисицкий А. П., Федоров Ю. В., Бунегина С. Л., Крапухин Д. В. Обзор реализаций планарных антенн Х-диапазона с двумя слоями металлизации	45
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 2010 г. в разделе "АРХИВ".

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2012

*ФL*анотехнологии и зондовая микроскопия

УДК 539.23-022.53

П. А. Александров, д-р. физ.-мат. наук, директор, e-mail: aleksandrov.peter@kiae.ru,
Е. К. Баранова, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.,
И. В. Баранова, науч. сотр.,
В. Бударагин, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
В. Л. Литвинов, д-р. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.,
А. Б. Свечников, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
Национальный исследовательский центр
"Курчатовский институт"

ОТЛИЧИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НА НАНОЭЛЕКТРОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИБОРЫ, СХЕМЫ И НА ИХ МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ АНАЛОГИ

Поступила в редакцию 17.11.2011

Работа посвящена систематическому анализу эффектов, которые следует учитывать при проведении исследований действия излучения на наноэлектронные материалы/приборы. Рассматриваются физические отличия действия излучения на указанные объекты по сравнению с их микроэлектронными аналогами. Анализ подкреплен теоретическими и экспериментальными результатами, опубликованными в литературе, а также оценками. Даны некоторые практические рекомендации и сформулированы задачи, требующие специального изучения.

Ключевые слова: наноэлектроника, радиационные повреждения, электронные материалы

Введение

Одна из основных тенденций современной электроники — миниатюризация, ведущая не только к переходу от микрометровых к нанометровым размерам, но и к появлению устройств, работающих на **новых принципах**. Уже сейчас разработаны и получены в лабораторных условиях различные типы наноматериалов/структур; дискретные наноприборы различных типов; простые схемы из таких приборов и интегральные схемы высокой степени интеграции. Эти устройства имеют малые габаритные размеры и вес, низкую потребляемую мощность, высокое быстродействие и чувствительность. Несмотря на наличие многих научных и технических проблем и отсутствие отработанной технологии их массового

производства, в ближайшем будущем можно ожидать создания новой элементной базы электроники, основанной на нанотехнологиях, в том числе, создания интегральных схем/систем со сверхвысокой степенью интеграции, а также различных высокочувствительных датчиков. Это позволяет говорить о создании на наноэлектронной базе аппаратуры/систем нового поколения с недостижимыми ранее потребительскими свойствами. В реальных условиях электронные приборы и схемы всегда работают в условиях облучения. Так, на электронику любого применения влияет естественная радиоактивность используемых материалов и фоновое космическое и земное облучение. Большим и разнообразным радиационным воздействиям подвергается аппаратура в атомной, авиационной, космической и военной технике; радиационной медицине и биологии; робототехнике и т. д. Кроме того, радиационные технологии широко применяют при производстве самих наноэлектронных приборов. Поэтому анализ действия излучения на наноэлектронику является важной и актуальной задачей.

В литературе уже опубликовано большое количество работ по действию излучения на отдельные типы наноэлектронных материалов (НЭМ) и приборов (НЭП). Однако ввиду новизны, сложности и многообразия возникающих задач достигнутый сейчас уровень исследований значительно уступает уровню исследований по действию излучения на объемные и микроэлектронные материалы, приборы и схемы. Естественно, что при изучении радиационных эффектов в новой элементной базе мы опираемся на представления, развитые ранее в радиационной физике твердого тела. В связи с этим представляется целесообразным сравнить действие излучения на прежние (объемные и микроэлектронные) и новые (наноэлектронные) объекты с учетом свойств последних.

Цель данной работы — систематический анализ отличий действия излучения на наноэлектронные (НЭ) материалы, приборы и схемы по сравнению с их объемными и микроэлектронными аналогами. Отдельно стоит вопрос о радиационной стойкости и надежности различных типов наноэлектронных приборов и систем, он будет рассмотрен в дальнейших публикациях.

1. Общие положения

Известно, что изменения электронных материалов, приборов и схем могут зависеть от следующих факторов:

• свойств исходных материалов и структур;

- технологии изготовления;
- размеров и размерности исходных структур/приборов;
- геометрии и архитектуры приборов и схем;
- физических механизмов и режимов работы;
- критериев работоспособности, связанных с их применением;
- условий облучения (включая характеристики излучения и внешней среды во время облучения);
- пострадиационных условий.

Некоторые из них, например критерии, определяющие работоспособность НЭ приборов и схем, пока еще четко не определены. Другие, такие как свойства исходных материалов и структур, существенно отличаются от их аналогов в микроэлектронике, в частности, зависимость свойств от числа атомов.

Кроме того, сами НЭ объекты характеризуются большим разнообразием. Поэтому конкретный вклад этих факторов в процессы и стойкость при облучении будет различным. Тем не менее, можно сформулировать ряд общих положений, которые следует учитывать при анализе действия излучений на наноэлектронные материалы (НЭМ) и наноэлектронные приборы (НЭП).

2. Наноматериалы

2.1. Исходные свойства

Современная микроэлектроника по применяемым материалам является преимущественно "кремниевой" электроникой. Другие материалы либо не являются определяющими, либо широко используются лишь в специальных областях.

Для наноэлектроники характерно широкое применение, наряду с "традиционными" материалами — полупроводниками, диэлектриками и металлами [1, 2] — различных, в том числе, и новых материалов [3]. Типичными примерами являются графен, фуллерены, халькогенидные стеклообразные полупроводники и магнитные материалы. При этом используются не только электрические и оптические, но и другие их свойства (например, фазовые переходы, спиновые состояния электронов и т. п.). Как сами материалы, так и используемые свойства существенно отличаются по чувствительности к действию излучения. Здесь мы не будем рассматривать эту специфику, а остановимся в основном на полупроводниковых НЭМ материалах. Кроме того, далее будет рассмотрено влияние ускоренных ионов (вычислительный эксперимент) на целостность металлических межсоединений, связанное с их применением в НЭ приборах.

Среди общих характеристик исходных НЭ материалов/структур выделим следующие характеристики, важные для анализа их радиационной стойкости.

Большая доля поверхностных атомов (атомов на границе раздела) по сравнению с числом объемных *атомов.* Эта доля зависит от формы и размера образца и увеличивается с уменьшением размера:

$$\xi_{surf} = \frac{N_{surf}}{N_{tot}} \sim \frac{S}{V},$$

где N_{surf} , N_{tot} — концентрация атомов вблизи поверхности и полная концентрация; S — площадь поверхности; V — объем. Типичные **модельные** объекты для наноструктур являются выпуклыми, Для них доля поверхностных атомов обратно пропорциональна среднему значению хорды $\overline{s} = 4\frac{V}{S}$. Точные выражения доли поверхностных атомов легко получить при учете того, что к ним относятся атомы в нескольких (обычно 2—3 [4]) приповерхностных слоях. Однако в общем случае число таких слоев зависит от рассматриваемого свойства. Так как поверхностные атомы имеют иные характеристики, чем атомы в объеме, то они существенно влияют **на все** свойства наноструктур.

Изменение поверхности и наличие поверхностных дефектов и связанных с ними электронных состояний. На поверхности обрывается периодичность в расположении атомов, присущая объему. Поэтому нарушается равновесие сил, действующих на эти атомы. Сама поверхность перестраивается. Возможно замыкание связей между соседними атомами (реконструкция поверхности) и взаимодействие с атомами/молекулами окружающей среды; возникновение оборванных связей на границах раздела полупроводник-диэлектрик и структурных дефектов, обусловленных рассогласованием решеток контактирующих материалов (в частности, на границе полупроводник-подложка). Всем указанным дефектам и связям соответствуют поверхностные состояния, влияющие на свойства различных наноструктур [5].

Легирование и эффект самоочистки. Легирование нанокристаллов составляет основу их применения. Эксперименты показывают, что введение примесей в процессе роста или путем диффузии затруднено и не подчиняется закону Фика. При этом никогда не удается достичь предела растворимости, соответствующего объемным кристаллам, но возможно легирование до относительно "небольших" и "умеренных" уровней. Бо́льших уровней удается достичь путем ионной имплантации, однако этот процесс сопровождается возникновением значительного числа радиационных дефектов.

Причиной, препятствующей легированию нанокристаллов, является захват примеси на поверхности [6] и/или эффект самоочистки [7]. Интерпретация последнего была дана с кинетической и с термодинамической точек зрения. С кинетической точки зрения примесь может диффундировать как внутрь, так и из кристалла. В нанокристаллах время диффузии весьма мало, а сам процесс определяется потенциальным барьером диффузии (энергией активации диффузии). Последний слабо зависит от конечного геометрического положения примеси, но существенно зависит от глубины примесного уровня. Эта глубина увеличивается с уменьшением размера нанокристалла. В результате коэффициент диффузии внутрь оказывается меньше, чем из кристалла. Преобладает "out"-диффузия, которая и определяет эффект самоочистки. С термодинамической точки зрения, энергия связи примеси в центре нанокристалла меньше, чем на его поверхности. Поэтому для понижения энергии системы примесь "выталкивается" из объема к поверхности.

Указанная тенденция наблюдалась экспериментально в нанообъектах разной размерности: квантовых точках, квантовых проволоках, нанотрубках и тонких наноразмерных пленках, изготовленных из разных полупроводников, легированных разными примесями (см., например, [6—10]). Поэтому, несмотря на отсутствие ясности о вкладах захвата примеси на поверхности и ее выталкивания [10], можно считать, что эффект самоочистки является общим для НЭМ.

Квантовые эффекты. Дополнительные квантовые эффекты, которые были неважны для описания свойств объемных и микроэлектронных материалов, становятся определяющими для НЭМ. Они обусловлены, прежде всего, размерным квантованием, туннелированием и кулоновской блокадой. Результат проявляется на всех основных свойствах этих материалов [5, 11—16]: энергетической зависимости плотности состояний; фононном спектре; механизмах рассеяния, переноса теплоты и тепловых характеристиках; рекомбинационных процессах; упругих свойствах.

2.2. Радиационные повреждения

Отличия радиационных повреждений НЭМ связаны с особенностями самих материалов (см. выше) и спецификой взаимодействия излучения с наноразмерными объектами. Вследствие этого существенно меняются представления о процессах радиационных повреждений и их характеристиках, развитые ранее в радиационной физике полупроводников. Изменения зависят от типа материала и его состава. Хотя эти отличия и взаимосвязаны, мы выделим отдельно некоторые общие черты, проиллюстрировав их на примере кремния.

Создание смещений. Известно, что в объемных и микрометровых образцах при "малой" энергии облучающих частиц создаются точечные дефекты — пары Френкеля (вакансии — междоузлия — V и I), которые после частичной взаимной аннигиляции диффундируют к стокам — атомам основных или технологических примесей. С этими примесными атомами V и I образуют устойчивые комплексы [17].

При "большой" энергии облучающих частиц образуются области с высокой концентрацией дефектов, окруженные объемным зарядом. Процесс их создания состоит из нескольких стадий [18].

Сначала, в течение $\sim 10^{-13}$ с образуются каскады смещений, состоящие из неоднородно распределенных пар Френкеля. После первичной взаимной аннигиляции выжившие компоненты этих пар взаимодействуют с окружением, создавая ядро области из собственных дефектов, или диффундируют к стокам, образуя примесно-дефектную оболочку. Вокруг ядра и оболочки образуется область объемного заряда. В общем случае область повреждений неоднородна. Ее ядро определяется подкаскадами (размером в несколько нанометров), а соотношение ядра и оболочки зависит от концентрации примесей. За исключением "горячих" носителей [19] и случаев сильного легирования [20] тонкая структура области повреждения (наличие подкаскадов) не важна, а ее размер определяется длиной экранирования.

В наноразмерных образцах картина меняется. При относительно "малых" энергиях облучающих частиц также вначале создаются пары вакансия междоузлие. Их дальнейшая релаксация определяется взаимной аннигиляцией, уходом на примеси и поверхность. Эти процессы не есть классическая "фиковская" диффузия, вследствие малых геометрических размеров объектов они состоят из небольшого числа хаотических прыжков. Поскольку содержание примесей относительно мало, то стабильные дефекты будут собственными.

При "больших" энергиях облучающих частиц также развивается каскад смещений. Однако условия его развития иные. Оценка времени ухода I и V к поверхности показывает, что оно весьма мало и сравнимо с временем развития каскада смещений, точнее временем взаимной аннигиляции V и I. Основным стоком для них является поверхность. Вблизи нее имеет место значительное обогащение вакансиями и междоузлиями, и их аннигиляция. Внутри каскада выживают преимущественно комплексы из собственных дефектов. Точное их распределение неизвестно. Однако в отличие от объемных образцов структура подкаскадов и их трансформация становится важной, поскольку их размеры могут быть соизмеримы с минимальными размерами наноструктур. Ранее было высказано предположение, что дефекты внутри наноматериалов могут подвергаться самоочистке, подобно примесям [7]. Этот эффект принципиально важен с точки зрения релаксации и создания стабильных радиационных повреждений, однако он пока подробно не изучен.

В целом приведенные аргументы показывают, что кинетика создания повреждений смещения, а также их отжига в НЭМ существенно изменяется по сравнению с объемными и микроэлектронными материалами.

Отметим, что основные отличия в бинарных и тройных соединениях по сравнению с кремнием связаны с тем, что здесь радиационные дефекты преимущественно являются комплексами собственных дефектов из разных подрешеток и слабо зависят от содержания легирующих примесей [21]. **Ионизация.** При рассмотрении ионизации в объемных и микроразмерных полупроводниках можно выделить три основных стадии [22]: перевод электронов в зону проводимости и образование пары высокоэнергетических (горячих) электрона и дырки; лавинное умножение носителей, созданных горячими электронами и дырками; термализация созданных носителей, обусловленная рассеянием на высокоэнергетических фононах.

В нанообъектах ситуация меняется следующим образом.

- Ширина запрещенной зоны увеличивается с уменьшением размера.
- В 2D- и 1D-объектах (тонкие пленки и квантовые проволоки) имеется непрерывная плотность состояний (хотя и отличная от объемных материалов), тогда как в 0D-объектах (квантовые точки) плотность состояний дискретна (подобна плотности состояний в атомах).
- Ввиду малых конечных размеров к процессу умножения следует добавить уход носителей за пределы нанообъекта вследствие прохождения горячих носителей над ограничивающим его барьером или туннелирования сквозь барьер, и их приход из примыкающего объема.
- Вследствие сильного кулоновского взаимодействия электронов и дырок существенно возрастает эффективность ударной рекомбинации Оже, образование и распад экситонов. Также отличается и фононный спектр.

Поэтому основные *составляющие* процессов ионизации будут отличаться от ионизации в объемных материалах. В 0D-объектах они будут "подобны" ионизации в атомах.

Пороговая энергия смещения (E_d) и энергия образования пары электрон—дырка (ε_{eh}) . Для описания радиационных воздействий используются понятия неионизационных и ионизационных энергетических потерь. Чтобы перевести эти энергетические потери в число смещенных атомов и число электронно-дырочных пар используют пороговую энергию смещения (E_d) и энергию образования пары электрон — дырка (ε_{eh}) . В объемных материалах эти величины можно считать постоянными в широком диапазоне энергий и видов облучающих частиц, поэтому они являются "хорошими" радиационными константами.

В классическом представлении [23] E_d состоит из энергии связи атома в решетке и энергии релаксации окружающей решетки, причем первая существенно превышает вторую. Сопоставление расчетного числа смещенных атомов и их экспериментального числа показало, что первое значительно превышает второе, причем экспериментальные значения E_d находились в широком интервале значений (для Si — от ~12 до ~50 эВ). Для объяснения такого разброса предлагалось несколько вариантов: наличие слабо связанных атомов вблизи поверхности и границ раздела с внутренними макродефектами [24]; разная доля взаимной аннигиляции первичных V и I, которая, в частности, зависит от концентрации примесей [25]; влияние ионизационных (неударных) механизмов на создание смещений [26].

В разных нанообъектах принципиально возможен вклад всех указанных механизмов. Однако наиболее важным является наличие слабо связанных поверхностных атомов, число которых зависит от размеров и размерности объекта. Это непосредственно проявляется в уменьшении энергии когезии с уменьшением размера наночастиц. Теоретический анализ в рамках различных моделей показал, что относительная энергия когезии линейно убывает с уменьшением размера наночастиц ($R_{\rm Hy}$) [14]:

$$\frac{E_{\rm HY}}{E_{vol}} = 1 - C\left(\frac{r_a}{R_{\rm HY}}\right),$$

где $R_{\rm HY}$ — энергия наночастиц; E_{vol} — объемная энергия; r_a — радиус атома; C — константа. В рамках модели жидкой капли значение $C \cong 5,75$, а указанное соотношение хорошо согласовывалось с экспериментальными данными для металлических наночастиц (Pb, Ag, Au).

Сказанное свидетельствует в пользу уменьшения эффективной пороговой энергии смещений E_d с уменьшением размера нанообъектов.

Эмпирически пороговую энергию смещения от координаты нанообъекта *r* можно описать, используя двухпараметрическое распределение Ферми

$$1 - \frac{\Delta E_d(r)}{E_{d,vol}} = \frac{E_{d,vol} - E_d(R)}{E_{d,vol}} = \frac{1}{1 + \exp(\frac{r-c}{a})},$$

где $\Delta E_d(r)$ — изменение энергии смещения; $E_{d,vol}$ — энергия смещения в объеме; c — радиус половинного изменения (ширина на полувысоте); $a = \frac{\Delta t}{(4\ln 3)}$, Δt — толщина поверхностного слоя (рис. 1).



Рис. 1. Аппроксимация изменения пороговой энергии смещения

Однако проведение расчетов с координатно-зависимой энергией затруднительно. Для оценок удобнее использовать двухгрупповое приближение из слабосвязанных поверхностных и сильносвязанных объемных атомов. Тогда эффективная пороговая энергия будет зависеть как от размерности, так и от размера образца:

$$\langle E_{d, eff} \rangle = E_{dS} N_S + E_{dV} N_{VS}$$

где индексы *S* и *V* — соответствуют поверхностным и объемным атомам.

Значение энергии образования пары ε_{eh} для объемных материалов, согласно работе [27], определяется по формуле

$$\varepsilon_{eh} = E_g + (E_{re} + E_{rh}) + E_V,$$

где E_g — ширина запрещенной зоны; $E_{re(h)}$ — средние кинетические энергии конечных низкоэнергетических электронов и дырок; E_V — энергия электронов и дырок, способных вызвать дальнейшую ионизацию при столкновениях с фононами. При этом значения $E_{re(h)}$ распределены в некотором интервале энергий от 0 до E_t и зависят от плотности состояний $\rho(E)$:

$$E_{re(h)} = \frac{\int_{E_t}^{E_t} E_{\rho(E)} dE}{\int_{E_t}^{E_t} E_{re(E)} dE}.$$

Предельное значение энергии (E_t) может быть оценено с помощью закона сохранения энергии и импульса и требует привлечения дополнительных соображений; E_V трудно оценить теоретически. Из сравнения измеренных значений ε_{eh} разных объемных материалов с расчетными значениями было получено $E_V \approx 0.5...1, 0$ Э.

Используя $\rho(E)$ для 3D-, 2D-, 1D- и 0D-объектов, легко получить, что $E_{re(h)}$ соответственно равно

 $\frac{3}{5} E_t$, $\frac{1}{2} E_t$, $\frac{1}{3} E_t$ и E_0 приблизительно равно положению дискретного уровня. Таким образом, есть лишь количественные отличия $E_{re(h)}$ для всех размерностей НЭМ, кроме 0D. Данные для E_V отсутствуют. Пока также не проанализировано влияние ухода/прихода носителей из/в нанообъект. Изложенные аргументы показывают необходимость специального изучения и адаптации понятий E_d и ε_{eh} к нанообъектам.

Статистический характер изменения параметров. Причиной статистического характера изменения параметров НЭМ является проявление дискретности взаимодействия излучения в малых объемах вещества. Это ведет к микроскопическому распределению переданной материалу энергии и к неоднородному распределению переданной энергии на микрошкале. В результате, для различных единичных взаимодействий имеет место дисперсия энергии, пошедшей как на ионизацию, так и на смещения. Эта дисперсия обусловлена флуктуациями следующих процессов [28, 29]:

- энергетического спектра облучающих частиц и их линейной передачей энергии;
- геометрией мишени и направлением падения (определяется средним значением хорды s);
- энергией и числом столкновений в мишени;
- вкладами энергии, пошедшими на ионизацию и другие неупругие процессы (фактор Фано) и смещения (поправка Линхарда).

Эти процессы рассматриваются в теории микродозиметрии.

3. Наноэлектронные приборы

3.1. Характерные черты наноэлектронных приборов

НЭП отличаются большим разнообразием, а их конструкция и технология изготовления непрерывно изменяются и совершенствуются. Общими чертами для разных типов этих приборов являются следующие [30, 31].

Квантовые механизмы и квантовые режимы работы. К таким механизмам относятся туннелирование, баллистический и одноэлектронный перенос, кулоновская блокада, фазовая когерентность, использование фазовых переходов и спина носителей вместо заряда. Эти механизмы коренным образом меняют характеристики приборов и/или позволяют создавать новые приборы.

Потенциальные барьеры. Большинство НЭП приборов используют в своей работе различные виды потенциальных барьеров, созданных внутри одного материала или на поверхностях и границах раздела тех или иных материалов. "Качество" (отсутствие дефектов внутри и на поверхности) этих барьеров (резкость, высота барьера и его протяженность) является определяющим для работы данных приборов. В ряде случаев используется несколько взаимосвязанных барьеров.

Технология и конструкции. Для реализации квантовых режимов работы применяют "специфические" технологические и конструктивные решения [30, 31]. Это использование нескольких разных материалов в одном приборе; широкий диапазон концентраций легирующих примесей в разных областях одного прибора; многозатворные и вертикальные конструкции МДП-транзисторов; одностенные и/или многостенные трубки либо их пучки в качестве каналов полевых транзисторов; наличие разделительных слоев из материалов другого состава в транзисторах с высокой подвижностью электронов и резонансных туннельных диодах. Наблюдается значительный разброс параметров однотипных приборов. Кроме того, все НЭП содержат те или иные пассивные области, примыкающие к активному объему прибора.

3.2. Пассивные элементы и межсоединения

К ним относятся наноразмерные выводы/контакты, конденсаторы и межсоединения. Для контактов во многих случаях применяют тяжелые металлы; для межсоединений — медь или углеродные нанотрубки. Для металлических межсоединений сопротивление экспоненциально увеличивается с уменьшением ширины линии. При этом вариации размеров ведут к большим вариациям сопротивления [30]. Обычно межсоединения располагаются на диэлектрической подложке или изолированы друг от друга диэлектриками. Чтобы уменьшить задержку распространения сигнала целесообразно использовать материалы с низким значением диэлектрической проницаемости.

3.3. Радиационные изменения наноэлектронных приборов

Отличия радиационных повреждений НЭП определяются их исходными характеристиками, а также действием излучения на наноматериалы. Наиболее важными и общими факторами для приборов разного типа являются следующие.

Влияние механизма работы прибора. Радиационные повреждения НЭП определяются нарушением режима работы конкретного типа приборов. Эти механизмы для приборов разного типа значительно отличаются по чувствительности к дефектам и зарядам, созданных облучением. Так, работа одностенных углеродных нанотрубок связана с их проводимостью, которая весьма чувствительна к наличию радиационных дефектов и изменению поверхностных свойств [32]. Работа переключателей на халькогенидных стеклообразных полупроводниках, основанная на обратимом переходе между состояниями, нарушается при очень больших концентрациях дефектов или уровнях возбуждения (неравновесных носителей) [33]. Туннельные диоды (резонансные и диоды Esaki) повреждаются вследствие роста избыточного туннельного тока через уровни радиационных дефектов, когда он становится сравним с исходным туннельным током при напряжении седловины или пиковым напряжением, что требует значительной концентрации дефектов [34, 35]. Таким образом, для разных типов НЭП радиационная стойкость существенно различна. В настоящее время, лишь для некоторых приборов надежно установлены механизмы радиационных повреждений. Вместе с тем, это является основной задачей для описания и прогнозирования изменений в НЭП под действием излучения.

Влияние технологии и конструкции. Технология изготовления и конструкция приборов существенно влияют на их радиационные изменения. Например, замена подзатворного оксида SiO_2 в МДП-транзисторах на HfO_2 приводит не только к уменьшению наведенного заряда, но и к изменению его знака [36]. Переход от планарной к вертикальной конструкции ведет к уменьшению площади границы раздела ак-

тивной области с подложкой. Тем самым уменьшаются наведенный на этой границе раздела радиационный заряд при статическом облучении и нестационарный ток из подложки при импульсном облучении.

Статистический характер изменений. Статистический характер изменений обусловлен вероятностным характером взаимодействия излучения с малыми объемами вещества и технологическим разбросом однотипных приборов. Эффект наблюдался экспериментально для нескольких типов приборов при разных видах облучения (γ , *n*, *p*) [28, 38, 39]. Из сказанного следует необходимость проведения статистических радиационных испытаний или, по крайней мере, оценок статистических характеристик однотипных облученных приборов. Статистические разбросы, созданные облучением, необходимо учитывать и при конструировании, и при оценке стоимости соответствующей аппаратуры.

Анизотропия повреждений. Причиной анизотропии в НЭП является анизотропия радиационных повреждений в наноэлектронных материалах/структурах (см., например [32]), подложке, а также конструкции НЭП. Систематические исследования этого эффекта на разных приборах не проводились. Оценки показывают, что он может быть велик, и поэтому должен учитываться при исследованиях облучения направленными пучками частиц и изотропным облучением.

Роль примыкающего объема. Процессы в примыкающем объеме могут существенно влиять на повреждение НЭП. Причины этого обусловлены следующим.

1. Проникновение "вторичных" частиц, созданных внешним падающим ("первичным") излучением, в НЭП и/или в примыкающий объем. К таким частицам относятся вторичные электроны (б-электроны), продукты ядерных реакций и сами выбитые из материала атомы. Примыкающий объем зависит от вида и энергии излучения, материалов, типа и конструкции НЭП. В случае создания вторичных электронов их поток, пересекающий границу раздела между двумя материалами, не одинаковый, вследствие отсутствия равновесия на границе. Это приводит к неоднородности поглощенной дозы, а иногда и к созданию смещений. Вторичные электроны могут как увеличивать, так и уменьшать дозу, поглощенную в данном материале [40-43]. Эффективная протяженность примыкающего объема определяется длиной свободного пробега электронов в рассматриваемом материале. Эффект экспериментально наблюдался для различных материалов и видов излучения. Его вклад увеличивается с ростом отношения Z_{2}/Z_{1} и может быть сравним, или даже превосходить влияние первичных частиц (более чем на порядок у границы раздела Si/Au при у-облучении). В случае создания первично выбитых атомов эффективный примыкающий объем зависит от направления падающих частиц и их энергии. Повреждения обусловливаются первично выбитыми атомами, поэтому эффективный примыкающий объем зависит как от материалов, так и от энергии частиц и геометрии НЭП. Для оценки энергии и формы эффективного примыкающего объема можно использовать объем между любой точкой активного прибора и окружающим материалом на расстояниях между $R_d \pm \delta R_d$ первично выбитого атома. Форма этого объема может быть весьма сложной.

Имеются и экспериментальные подтверждения указанного эффекта. Так, для облученных полевых транзисторов с каналом из углеродных нанотрубок радиационные повреждения были значительно больше, когда трубка лежала на изолирующей подложке, чем для подвешенных трубок [44].

Таким образом, уменьшение объема подложки и площади контакта с ней может способствовать увеличению стойкости НЭП.

2. Неоднородное удаление материала — распыление и перемешивание вблизи границ раздела может приводить к изменению шероховатости границы, формы потенциальных барьеров, приконтактных и контактных областей.

Этот эффект хорошо изучен при ионной имплантации и важен при больших дозах ионов [45]. Граница раздела НЭП — подложка может служить барьером или стоком зарядов и/или дефектов, созданных в подложке. Эффект аналогичен захвату носителей на "гигантских" ловушках [46] и геттерированию примесей и дефектов в объемных полупроводниках [47]. Экспериментально он наблюдается в виде увеличения рекомбинации вакансий и междоузельных атомах в пленках КНИ [48].

3.4. Радиационные изменения межсоединений

Радиационные изменения микроразмерных металлических межсоединений были пренебрежимы по сравнению с изменениями характеристик отдельных микроэлектронных приборов. Металлические дорожки/полоски, используемые для межсоединений и выводов наноразмерных приборов, также подвергаются масштабированию при переходе от микроэлектронных к наноэлектронным приборам. Такие наноразмерные соединения весьма чувствительны к действию излучения. Основным эффектом является увеличение их сопротивления. Кроме того, возрастают задержка распространения высокочастотных сигналов и шумы. Физическими причинами этого является образование пор, обусловленных дефектами смещения, и создание зарядов на границах раздела металл-диэлектрик подложки, а при больших флюенсах и изменение шероховатости поверхности соединений. Экспериментально эти эффекты были отмечены в ряде работ. В частности, значительный рост сопротивления наблюдался при облучении нейтронами переключателей на халькогенидных полупроводниках [49]. Нарушение контакта обрыв, происходило на субмикронных выводах уже при 10^{14} нейтрон · см⁻², вольт-амперная характеристика могла быть измерена после облучения (с помощью зондов) до ~ 10^{17} нейтрон · см⁻². При этом "существенные" изменения вольт-амперной характеристики происходили при флюенсах свыше ~ $(1...5) \cdot 10^{15}$ нейтрон · см⁻², а при бо́льших флюенсах — сопротивление как в открытом, так и в закрытом состояниях уменьшалось до нескольких ом.

Для исследования влияния облучения на медные наноразмерные провода был специально проведен вычислительный эксперимент [50]. Ионы аргона с энергией 20 кэВ падали перпендикулярно на провод размером 5,2 × 26 × 1,6 нм. Далее методом молекулярной динамики с объемом выборки 2000 рассчитывалось положение каждого атома меди на протяжении 2 нс. Взаимодействие атомов Си-Си определялось многочастичным притягивающим потенциалом, который гладко сшивался с отталкивающим боровским потенциалом. В результате бомбардировки атомы аргона в 98 % случаев насквозь прошивали медный провод, в 2 % — происходило отражение. Наиболее редко (~0,2 %) наблюдался поперечный разрыв (рис. 2, а). Примерно в 7,6 % получалось сквозное отверстие (рис. 2, б), с которым мы связываем существенное увеличение сопротивления.

Из этих расчетов видно, что разрыв и резкое уменьшение сопротивления вполне реальны, и их необходимо учитывать при проектировании систем на наноэлектронных компонентах.

Сами наноразмерные межсоединения проявляют квантовые эффекты, особенно при работе на высоких частотах, и по существу являются квантовыми приборами. Поэтому их радиационные повреждения обязательно следует изучать, как и других активных НЭП.



Рис. 2. Разрыв медного нанопровода (*a*) и сквозное отверстие в медном нанопроводе (δ) в результате бомбардировки атомом Ar с начальной энергией 20 кэВ. Вид в плоскости (*x*, *y*) [50]

4. О наноэлектронных интегральных схемах

Вопросы повреждения наноэлектронных интегральных схем (НЭ ИС) требуют специального анализа, выходящего за пределы данной работы. Здесь мы остановимся лишь на нескольких важных моментах.

В настоящее время серийное производство больших НЭ ИС отсутствует. Однако уже работают опытные гибридные (наноэлектронные, микроэлектронные) интегральные схемы. В перспективе разумно ожидать, что для НЭ ИС будет характерно наличие "чрезвычайно большого" числа наноразмерных "плотноупакованных" элементов (приборов и межсоединений), работающих при низких напряжениях питания и малых сигналах на очень высоких частотах. Точнее, можно ожидать число элементов в схеме на 3—4 порядка выше, чем в современных УБИС, с размерами ~n(1...10) нм, напряжением 1 В и частотами порядка (несколько единиц) × (1...10) ГГц. Эти схемы содержат значительное количество соединительных проводов.

Важными являются технологические разбросы параметров отдельных приборов, наличие взаимодействия между ними и использование набора разных (в том числе, "новых") материалов в составе одной схемы. Вследствие значительного технологического разброса параметров облучение будет по-разному сказываться на изменении однотипных приборов в ИС. Может даже изменяться режим работы отдельных приборов/межсоединений. Это приводит, в частности, к увеличению в них тепловыделения и появлению "горячих пятен" на чипе (вплоть до выгорания). Такие пятна наблюдаются и в некоторых необлученных сложных схемах. Облучение будет способствовать их образованию. Поэтому строгий контроль технологического процесса является необходимым.

Исходя из геометрии приборов и схем, а также имеющихся данных по стойкости отдельных НЭП нетрудно оценить, что работоспособность схемы, помимо "плавного" изменения параметров, может быть связана со следующими обстоятельствами: 1) с резкими отказами от повреждений, вызванных одиночными частицами; 2) может быть обусловлена взаимодействиями в подложке; 3) возможно повреждение многих приборов одной частицей.

Первое обстоятельство аналогично эффектам от одиночных частиц. Отличие состоит в том, что оно обусловлено не только высокоэнергетическими частицами, такими как космические с энергией $\sim n(10...100)$ МэВ, но и частицами меньших энергий. Поэтому изучение повреждений от одиночных частиц и "тонкой" структуры таких повреждений является актуальным. Второе обстоятельство обусловлено значительно большим общим объемом подложки, по сравнению с активными приборами. В связи с этим уменьшение объема и создание профилированных подложек, или объемный монтаж схем, является актуальной технологической задачей. Третье обстоятельство нашло подтверждение, в частности, в виде многобитных отказов [51].

Таким образом, для использования потенциальных возможностей НЭ ИС, работающих в условиях облучения, важнейшими становятся вопросы надежности и методы увеличения их стойкости. Это особенно важно, поскольку такие системы имеют чрезвычайно высокую степень интеграции. В этом случае, несмотря на очень малую вероятность повреждения отдельного НЭП или межсоединения вследствие их малых размеров, действует принцип, утверждающий, что частица "куда-нибудь да попадет" и потому нарушит работу какого-нибудь прибора или межсоединения и всего чипа. Это означает, что вероятность повреждения чипа определяется произведением малой вероятности отказа одного прибора на очень большое число приборов и, очевидно, есть конечная величина.

Полезно разделить последствия действия радиации на наноэлектронные системы на два типа; соответственно с этим делятся и методы увеличения стойкости.

1. Постепенная деградация параметров с ростом дозы облучения. Это явление связано с постепенным накоплением дефектов и/или зарядов и характерно для низкоэнергетического γ -, *e*- и *n*-облучения. При предположении о хорошо отлаженной технологической схеме все элементы будут менять свои параметры одновременно и также одновременно выйдут из строя. В этом случае увеличение стойкости связано только с улучшением технологии, конструкции приборов и параметров материалов. Резервирование, как легко понять, не приводит к улучшению.

2. Резкий отказ какого-либо элемента. Такое явление может произойти под действием нейтронов и других частиц, вызывающих ядерную реакцию с большим выделением энергии, а также при попадании тяжелых заряженных частиц, просто разрушающих часть схемы или вызывающих временное сильное повышение проводимости. Такие явления достаточно редки, но никакие технологические приемы не помогут избежать отказа или сбоя в работе системы. В таком случае, пользуясь редкостью события, обычно используют резервирование. Из общих соображений теории вероятности понятно, что чем на более низком уровне проводится резервирование, тем больше будет стойкость.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что действие излучения на наноэлектронные материалы, приборы и интегральные схемы **отличается** от действия излучения на их микроэлектронные аналоги. Это связано со спецификой взаимодействия излучения с наноразмерными объектами, механизмами работы, конструктивными и технологическими факторами. Сформулирована **совокупность** этих отличий. Дано сравнение **процессов** дефектообразования и создания зарядов в объемных и микроэлектронных материалах. Имеют место отличия в кинетике их образования, накопления и отжига. Показана необходимость пересмотра представлений о пороговой энергии смещения и энергии образования пары электрон — дырка как о радиационных константах. Для пороговой энергии смещения предложено феноменологическое описание с учетом зависимости от размера.

В общем случае повреждения наноэлектронных приборов определяются нарушением вклада основного квантового механизма работы соответствующего типа приборов. При этом радиационные взаимодействия в "примыкающем" объеме (подложке) не менее важны, чем в активном объеме. Уменьшение площади взаимодействия с подложкой способствует повышению радиационной стойкости.

Помимо изменений активных приборов необходимо учитывать радиационные изменения наноразмерных пассивных элементов и межсоединений. Проведенный вычислительный эксперимент показал, что для металлических межсоединений возможно образование отверстий (пор) и разрывов.

Наряду с "плавными" изменениями параметров наноэлектронных приборов и интегральных схем возможны "резкие" отказы. Последние наиболее важны в интегральных схемах, где число элементов чрезвычайно велико. В связи с этим целесообразно дублирование наноэлектронных приборов и межсоединений на "низком" уровне.

Более точный учет указанных эффектов и введение их в расчетную схему, а в дальнейшем и в САПР возможен при конкретизации конструкции приборов и межсоединений.

Список литературы

1. **Форстер Л.** Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности. М.: Техносфера. 2008. 352 с.

2. **Proceedings** of 2003 nuclear and space radiation effects conference // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2003. V. 50, N 6.

3. Головин Ю. И. Введение в нанотехнику. М.: Машиностроение. 2007. 496 с.

4. Александров П. А., Нефедов А. А., Чапланов В. А. и др. Границы раздела при рентгеновской дифракции структуры Si—NaNO₂ // ФТТ. 1991. Т. 33. № 87. С. 1253.

5. Щука А. А. Наноэлектроника. М.: Физматкнига. 2007. 464 с.

6. Erwin S. G., Zu L., Haftel M. J., Efros A. L., Kennedy T. A., Norris D. J. Doping Semiconductor Nanocrystals // Nature. 2005. V. 436, N 7047. P. 91.

7. Dalpian G. M., Chelikowsky J. R. Self purification in semiconductor nanocrystals // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96, N 22. P. 226802.

8. **Melnikov D. V., Chelikowsky J. R.** Quantum Confinement in Phosphorus-Doped Silicon Nanocrystals // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 92, N 4. P. 046802.

9. **Tzu-Liang, Chelikowsky J. R.** Controlling diffusion of Lithium in Silicon nanostructures // Nano Lett. 2010. V. 10, N 3. P. 821–825.

10. Du M.-H., Erwin S. C., Efros Al. L., Norris D. J. Comment on "Self-Purification in Semiconductor Nanocrystals" // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100, N 17. P. 179702.

11. Драгунов В. П., Неизвестный И. Г., Гридчин В. А. Основы наноэлектроники. М.: Логос. 2006. 496 с.

12. Строгио М., Дутта М. Фононы в наноструктурах. М.: Физматлит. 2006. 320 с.

13. **Pop E., Goodson K. E.** Termal phenomena in Nanoscale Transistors // J. of Electronic Packaging 2006. V. 128, N 2. P. 102–108.

14. Vanithakumari S. C., Nanda K. K. A universal relation for cohesive energy of nanoparticles // Phys. Lett. A 2008. V. 372, N 46. P. 6930–6934.

15. Hohr T., Schenk A., Fichter W. Revised Shockley-Read-Hall lifitimes for quantum transport modelling // J. Appl. Phys. 2004. V. 95, N. 9. P. 4875–4882.

16. **Semiconductor** and Metal Nanocrystals Synthesis and Electronic and Optical Properties / Ed. by V. I. Klimov. N. Y.-Basel: Marcel Dekker Inc., 2004. 484 p.

17. Емцев В. В., Машовец Т. В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. М.: Радио и связь. 1981. 248 с.

18. Винецкий В. Л., Холодарь Г. А. Радиационная физика полупроводников. Киев: Наукова думка. 1979. 336 с.

19. **Оболенский С. В.** Моделирование структуры кластера радиационных дефектов в полупроводниках при нейтронном облучении // Изв. Вузов. Сер. Электроника. 2003. № 4. С. 49—55.

20. Литвинов В. Л., Ухин Н. А., Чураков Ю. И. Физикоматематическая модель областей повреждений в облученном сильнолегированном кремнии // Препринт ИАЭ им. И. В. Курчатова № 4954/9. М., 1989. 23 с.

21. Аствацатурьян Е. Р., Громов Д. В., Ломако В. М. Радиационные эффекты в приборах и интегральных схемах на арсениде галлия. Минск: Изд.-во "Университетское". 1992. 219 с.

22. Вавилов В. С. Действие излучений на полупроводники. М.: Наука. Физматлит. 1963. 264 с.

23. Бургуэн Ж., Ланно М. Точечные дефекты в полупроводниках. Т. 1. Экспериментальные аспекты. М.: Мир. 1985. 304 с.

24. Витовский Н. А., Мустафакулов Д., Чекмарева А. П. О величине порговой энергии смещения атомов в полупроводниках // ФТП 1977. Т. 11, № 9. С. 1747—1753.

25. Литвинов В. Л., Очертянский А. Л., Стучебников В. М., Ухин Н. А., Чураков Ю. И. Начальные скорости изменения концентрации и подвижности в сильнолегированном кремнии, облученном низкоэнергетическими частицами // Препринт ИАЭ им. И. В. Курчатова № 4955/9. М., 1989. 21 с.

26. Вавилов В. С., Кив А. Е., Ниязова О. Р. Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках. М.: Наука. Физматлит. 1981. 368 с.

27. Эланго М. А. Элементарные неупругие радиационные процессы. М.: Наука. Физматлит. 1988. 152 с.

28. Xapsos M. A., Summers G. P., Burke E. A., Poiveg C. Microdosimetry theory for microelectronic application // Nucl. Instr. Meth. B 2001. V. 184, N 1. P. 113–134.

Instr. Meth. B 2001. V. 184, N 1. P. 113–134. 29. Dale C. J., Marshall P. W., Burke E. A., e. a. The Generation Lifetime Damage Factor and its Variance in Silicon // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1989. V. 36, N 6. P. 1872–1881.

30. **Silicon** Nanoelectronics / Ed. by S. Oda, D. Ferry. Taylor & Francis. 2006. 313 p.

31. Wong B. P., Mittal A., Cao Y., Starr G. Nano-CMOS Circuit and Physical Design. Wiley. 2005. 393 p.

32. **Krasheninnikov A. V.** Irradiation Phenomena in CNT // Chemistry of Carbon Nanotubes. Ch. 1 / Eds. V. A. Basiuk, E. V. Basiuk. 2007. P. 1–58.

33. Александров П. А., Баранова Е. К., Баранова И. В., Бударагин В. В., Литвинов В. Л. Действие излучения на схемы памяти с фазовым изменением на халькогенидных стеклах // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 10. С. 40–47.

34. Weaver B. D., Thompson P. E., Jin N., e. a. Radiation Tolerance of Si/Si(0,6)Ge(0,4) Resonant Interband Tunneling Diods // J. Appl. Phys. 2004. V. 95, N 11. P. 6406–6408.

35. Доманевский Д. С., Литвинов В. Л., Ломако В. М. и др. Радиационные изменения вольт-амперных характеристик туннельных диодов из арсенида галлия // ФТП. 1970. Т. 4, № 8. С. 1425—1431.

36. Fin FETs and Other Multigate Transistors / Ed. by J.-P. Colinge. Springer. 2008. 350 p.

37. Oldham T. R., Bennet K. W., Beaucour J., e. a. Total dose failures in advanced electronics from single ions // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1993. V. 40, N 6. P. 1820. 38. Marshall P. W., Dale C. J., Burke E. A., e. a. Total dose

38. Marshall P. W., Dale C. J., Burke E. A., e. a. Total dose failures in advanced electronics from single ions // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1989. V. 36, N 6. P. 1831–1839.

39. Weller R. A., Sternberg A. L., Massengill L. W., e. a. Evaluating Average and Atypical Response in Radiation Effects Simulations // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2003. V. 50, N 6. P. 2265-2271.

40. Brown D. B. The phenomenon of electron rollout for energy deposition and defect generation in irradiated MOS devices // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1986. V. 33, N 6. P. 1240-1244.

41. Griffoni A., Silverstri M. Dose Enhancement Due Interconnects in Deep-Submicron MOSFET Exposed to X-Rays // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2009. V. 56, N 4. P. 2205-2211.

42. **DasGupta A., Fleetwood D. M., Reed R. A.**, e. a. Dose Enhancement and Reduction in SiO₂ and High-k MOS Insulators // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2010. V. 57. Pt. 2. N 6. P. 3463-3469.

43. Аствацатурьян Е. Р., Голотюк О. Н., Попов Ю. А. и др. Проектирование электронных схем с учетом радиационных воздействий. М.: МИФИ. 1984.

44. Громов Д. В., Елесин В. В., Петров Г. В. и др. Радиационные эффекты в элементах наноэлектроники // Изв. Вузов. Сер. Электроника 2010. Т. 81, № 1. С. 45-49.

45. Ronning C., Borschel C., Geburt S., e. a. Tailoring the properties of semiconductor nanowires using ion beams // Phys. Stat. Sol. B 2010. V. B247, N 10. P. 2329–2337.

46. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М.: Мир. 1977. 562 с.

47. Perevostchikov V. A., Skoupov V. D. Gettering Defects in Semiconductors. Berlin—Heidelberg, N. Y.: Springer, 2005. 386 р. 48. Щербачев К. Д., Бублик В. Т., Мордкович В. Н., Пажин Д. М. Особенности образования радиационных дефек-тов в слое структур "кремний на изоляторе" // ФТП 2011. Т. 45, № 6. С. 754—758. 49. Будзин В. В., Коба Б. В., Литвинов В. Л. и др. Радиа-

ционные эффекты в элементах памяти из халькогенидных стеклообразных полупроводников // ФТП 1981. Т. 15, № 8. C. 1635–1637

50. Свечников А. Б. Образование дефектов в ультратонких медных нанопроводах / Расширенный доклад на конференции "Информационно-вычислительные технологии в науке

2011". 3 c. URL: http://www.ivtn.ru/2011/pdf/d11_06.pdf 51. Guertin S. M., Nguyen D. M., Patterson J. D. Microdose induced data loss on floating gate memories // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006. V. 53, N 6. P. 3518–3524.

УДК 003.26

К. Д. Яшин¹, канд. техн. наук, доц.,

- Т. И. Терпинская², канд. биол. наук, ст. науч. сотр.,
- **В. С. Осипович**¹, канд. техн. наук, доц.,

Р. Г. Лемеш², инженер,

- **Г. К. Жавнерко³**, канд. хим. наук, зав. лаб., **Р. Д. Зильберман**², мл. науч. сотр.,

В. С. Петрович¹, студент

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

²Институт физиологии НАН Беларуси ³Институт химии новых материалов НАН Беларуси

e-mail: seth22@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ МЕДИЦИНСКОЙ НАНОБИОИНФОРМАЦИОННОЙ **ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ** НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОКРИСТАЛЛАХ

Поступила в редакцию 19.10.2011

Представлена конструкция флуоресцентных полупроводниковых нанобиомаркеров для визуализации опухолевых клеток in vitro.

Ключевые слова: нанобиоинформационная технология, флуоресцентные нанобиомаркеры, наночастица, диагностика опухолевых заболеваний, полупроводниковые нанокристаллы

Введение

В работах [1-3] освещены вопросы получения люминесцентных полупроводниковых нанокристаллов селенида кадмия с эпитаксиальным слоем сернистого цинка CdSe/ZnS, которые в научнотехнической литературе называют квантовыми точками. Нанобиоинформационные технологии являются бурно развивающимся научным направлением XXI века. Разработчики микросистемной техники активно сотрудничают с медицинскими учреждениями.

Целью настоящих исследований явилась разработка нанобиоинформационной технологии для задач диагностики опухолевых заболеваний. Актуальность обусловлена необходимостью диагностики заболеваний на самых ранних стадиях.

Принципы построения нанобиоинформационной системы на основе полупроводниковых нанокристаллов (квантовых точек)

Для визуализации процессов функционирования, взаимодействия клеток различных типов, выявления путей их миграции применяют их маркирование (мечение). Наиболее распространенным способом мечения живой клетки является введение в нее флуоресцентных зондов. Для этого используют органические флуоресцентные красители; в последнее десятилетие широкое применение получают квантовые точки, обладающие существенными преимуществами перед органическими красителями, в частности, по интенсивности и длительности флуоресценции [4-7]. Ведутся исследования по изучению взаимодействия наночастиц с живыми клетками.

Концепция построения и принцип действия системы для индикации и диагностики биологических клеток и клеточных компонентов описаны в работе [3]. Информационная составляющая наноразмерной биосистемы основана на флуоресценции нанокристаллов CdSe/ZnS, биолого-медицинская на специфическом "узнавании" определенного вида



Рис. 2. Спектры возбуждения наночастиц:

I - CdSe/ZnS; 2 - CdSe/ZnS с дополнительным белковым покрытием



Рис. 3. Спектры испускания наночастиц:

1 - CdSe/ZnS; 2 - CdSe/ZnS с дополнительным белковым покрытием

клеток в анализируемых образцах; полупроводниковая — на применении наноразмерных $A_2 B_6$ кристаллов. Кристаллы CdSe/ZnS фиксируются стабилизирующей оболочкой, позволяющей работать с полупроводниковыми частицами в физиологических растворах (рис. 1, см. третью сторону обложки). Оптический информационный сигнал полупроводниковой нанобиосистемы представлен на рис. 2, 3 в виде спектров возбуждения и испускания.

Материалы, конструкция, технология получения и применения нанобиомаркеров

Использовались кристаллы CdSe/ZnS, полученные по технологии, разработанной авторами работы [8]. Рентгеноструктурные и рентгеноспектральные исследования представлены в [3, 9]. Анализ образцов проводился с применением инфракрасного (ИК) Фурье-спектрометра. Наиболее интенсивные колебания отмечены в области 2956,40 см⁻¹ (рис. 4).

Для оценки цитотоксичности были исследованы нанобиомаркеры различной конструкции, которые отличались материалом стабилизирующей оболочки:

- образец № 1 пассивирующая пленка из плотноупакованных молекул меркаптоундекановой кислоты;
- образец № 2 тиогликолевая кислота;
- образец № 3 цистеин.

Максимум флуоресценции приходится на 568 нм, 597 нм и 583 нм соответственно. Для оценки размеров наноструктур образца № 1 было проведено их исследование с применением атомно-силовой микроскопии (ACM) на сканирующем зондовом микроскопе "Nanoscope 3D" (рис. 5). Образцы изучали в контактном режиме, использовали кантилеверы из нитрида кремния с константой упругости 0,12 Н/м (рис. 6, 7). Параметры иглы: высота 3,0 мкм; радиус закругления 20 нм; длина 4 мкм; толщина 0,6 мкм; покрытие 15 нм Cr + 60 нм Au; частота 20 кГц.

Результаты (рис. 8, см. третью сторону обложки) показывают, что маркеры микроскопа находятся на разных по высоте уровнях, и расстояние между уровнями составляет 8 нм. На поверхности подложки находятся гидрофильные наноструктуры (светлые точки на изображении сканирования поверхности). Они дают пики в секционном анализе. Размеры меркаптоундекановой кислоты составляют примерно 1,4...2 нм. Следовательно, исследуемые нанокристаллы CdSe/ZnS имеют размер 3...4 нм. На рис. 9 (см. третью сторону обложки) приведена люминесцентная фотография исследованных образцов.



Рис. 4. ИК Фурье-спектр исходных CdSe/ZnS наночастиц



Рис. 5. Атомно-силовой микроскоп "Nanoscope 3D" (США)



Рис. 6. Игла NP-1, вид сбоку и вид спереди



Рис. 7. Игла NP-1, вид сверху и вид сбоку

Биологический материал мышей представлял опухоли: асцитную карциному Эрлиха (АКЭ) и асцитную гепатому 22а (АГ22а). Клеточные суспензии анализировали на флуоресцентном микроскопе Leitz MPV-2. Для наблюдения и регистрации флуоресценции использовали систему Ploemopak, для возбуждения флуоресценции — ртутную лампу. Снимки выполняли цифровой камерой Leica DC300 F с программным комплексом Leica IM1000. Иллюстрации получены с использованием программы Image J: функции "Color RGB split" и "Туре 8—bit".

Результаты и их обсуждение

Было изучено поглощение наночастиц клетками опухолевых асцитов. Зафиксировано поглощение клетками АКЭ наночастиц всех трех образцов (рис. 10, см. четвертую сторону обложки). При этом частицы образцов № 1 и № 3 в большинстве клеток равномерно распределялись преимущественно в околомембранном пространстве. В то же время после инкубации клеток с частицами образцов № 2 были видны более крупные ярко флуоресцирующие гранулы. Различное распределение нанокристаллов в цитоплазме может быть свидетельством различий в механизмах поглощения наночастиц клетками. Так, авторы [6] показали, что полистереновые наносферы (40 нм) и квантовые точки CdSe/ZnS с полиэтиленгликолиевым пассивирующим покрытием (20 нм) различным образом распределяются в цитоплазме растительных протопластов.

При инкубации клеток АКЭ с наночастицами не зарегистрирована цитотоксичность последних. Она снизилась лишь на 5...9 %, однако отличий между опытными сериями и контрольными сери-

Жизнеспособность клеток асцитной карциномы Эрлиха

№ п/п	Серия опыта	Жизне- способность клеток АКЭ, %
1	АКЭ + образен № 1	894 + 21
2	AK = + of f a = 1	92.9 ± 0.8
3	$AK\Theta + observe N 3$	90.6 ± 2.5
4	АКЭ + дистиллированная вода.	90.5 ± 1.8
	без наночастиц	, , -
5	АКЭ, исходный, до окраски	$98,1 \pm 1,6$
	-	

ями (вместо наночастиц использовали дистиллированную воду) не наблюдали (см. таблицу).

При инкубации АГ22а с наночастицами последние проникали в клетки. Не выявлено значительных отличий в окрашивании клеток при инкубации их с частицами всех трех типов. Наблюдалась агрегация наночастиц (рис. 11, см. четвертую сторону обложки) в изотоническом растворе, что вело к снижению качества окраски, окрашивалась лишь часть клеток опухолевого асцита. Так, при использовании образца № 1 наблюдалась флуоресценция части клеток опухолевого астита; в единичных клетках наблюдалось яркое свечение по всему фону, в большинстве клеток флуоресцировала клеточная мембрана (рис. 11, а). Для тушения флуоресценции нанокристаллов, не вошедших в клетки, использовали трипановый синий (рис. 11, б). Применение трипанового синего показало, что интенсивно поглощают нанокристаллы погибшие клетки (свечение нанокристалов в погибших клетках постепенно тушится трипановым синим и заменяется красной флуоресценцией, характерной для этого красителя) и единичные живые клетки. В большинстве клеток нанокристаллы оседают на клеточной мембране с наружной стороны, и их свечение тоже постепенно тушится трипановым синим (ср. рис. 11, a и 11, δ).

При инкубации клеток асцита АГ22а с частицами образца № 2 наблюдалось яркое свечение единичных живых клеток и флуоресценция квантовых точек в примембранном пространстве внутри клеток; причем наночастицы видны в виде мелких гранул на мембране (рис. 11, в). Для сравнения, при инкубации наночастиц с клетками костного мозга последние захватывали частицы и сохраняли флуоресценцию при добавлении трипанового синего, что свидетельствует о проникновении квантовых точек внутрь клеток [10]. Следует отметить, что во всех случаях клетки костного мозга лучше поглощали наночастицы, чем клетки опухолевых асцитов. Вероятно, это объясняется различными механизмами поглощения [7, 10, 11]. При окраске асцита частицами образца № 3 наблюдали аналогичную картину, однако проникновение квантовых точек в опухолевые клетки было несколько лучше, и при добавлении трипанового синего флуоресценция в околомембранном пространстве в большинстве клеток сохранялась (рис. 11, г).

Таким образом, полупроводниковые нанокристаллы CdSe/ZnS с пассивирующей пленкой из молекул меркаптоундекановой кислоты, тиогликолевой кислоты и цистеина могут быть использованы для визуализации живых клеток. Качество окраски клеток значительно зависит от способа приготовления окрашивающих растворов и концентрации наночастиц в инкубационной среде. Показано, что морфологическая картина поглощения опухолевыми клетками наночастиц зависит от конструкции последних. Цитотоксического эффекта исследованных модификаций наночастиц не выявлено.

Перспективы развития технологии

Актуальность разработки обусловлена необходимостью совершенствования клинической диагностики для раннего определения сахарного диабета, рака и других заболеваний. Для обеспечения высокой специфичности связывания нанобиомаркеров с диагностируемыми антигенами реализована схема иммунолюминесцентного анализа (рис. 12), основанная на применении системы антиген-антитело [11]. Схема процесса подразумевает нанесение на полупроводниковые частицы (на финишном этапе) белкового покрытия. В качестве белкового покрытия антитела. Уникальные оптические выступают свойства нанобиомаркеров сохраняются. На рис. 13 (см. четвертую сторону обложки) представлена блок-схема нанобиоинформационной системы. На схеме показаны: рабочие места для получения нанокристаллов (1) и оценки их оптических свойств (2); рентгеноструктурный спектр нанокристаллов (3); схема наночастицы, подготовленной для работы в физиологических растворах (4); схемы технологических приемов формирования систем антиген-антитело для высокоспецифического определения ис-



Рис. 12. Схема иммунолюминесцентного анализа с использованием полупроводниковых нанобиомаркеров (система антиген/антитело)

комых антигенов (5, 6); микрофотография биологических клеток, детектируемых с помощью люминесцирующих нанокристаллов (7); врач, изучающий результаты анализов пациента (8).

Заключение

Разработан ряд модификаций полупроводниковых наночастиц CdSe/ZnS с пассивирующей пленкой различного состава (из молекул меркаптоундекановой кислоты, тиогликолевой кислоты и цистеина), пригодных для визуализации живых клеток, и методика прижизненной окраски последних. Результаты визуализации продемонстрированы на опухолевых клетках мышей: асцитной карциномы Эрлиха и асцитной гепатомы 22а. Не выявлено цитотоксического эффекта наночастиц в течение 5-часовой инкубации. Наблюдаются различия в морфологической картине поглощения опухолевыми клетками нанокристаллов с различным пассивирующим покрытием, что, вероятно, является отражением различий в механизмах поглощения этих частиц. Результаты свидетельствуют о возможности применения исследованных полупроводниковых наночастиц для изучения закономерностей поглощения клетками нанообъектов различного размера и конструкции.

Авторы благодарят доктора химических наук М. В. Артемьева за любезно представленные образцы наночастиц.

Список литературы

1. Яшин К. Д., Осипович В. С., Пицук С. Е. Люминесцентные полупроводниковые наночастицы // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 5. С. 70-74.

2. Яшин К. Д., Осипович В. С., Пицук С. Е. Получение наночастиц // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 6. C. 2-6.

3. Яшин К. Д., Осипович В. С., Кульчицкий В. А. и др. Нанобиополупроводниковая система визуализации клеток // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 12. С. 48-52

4. Aldana J., Wang Y. A., Peng X. Photochemical instability of CdSe nanocrystals coated by hydrophilic thiols // J. Am. Chem. Soc. 2001. Vol. 123. P. 8844–8850.
5. Zhang Y., Chen Y., Westerhoff P., et al. Stability and removal of water soluble CdSe quantum dots in water // Environ Sci. Techard 2009. Let 2009.

Sci. Technol. 2008. Jan 1.

6. Etxeberrial E., Gonzalezl P., Baroja-Fernandez E., et al. Fluid Phase Endocytic Uptake of Artifical Nano-Spheres and Fluorescent Quantum Dots by Sycamore Cultured Cells // Plant Signaling & Behavior. 2006. Vol. 1, N 4. P. 196–200.

7. Hansen C. G., Nichols B. J. Molecular mechanisms of clathrin-independent endocytosis // Journal of Cell Science. 2009. Vol. 122, N 11. P. 1713–1721.

8. Sukhanova A., Devy J., Venteo L., et al. Biocompatible fluorescent nanocrystals for immunolabeling of membrane proteins and cells // Analytical Biochemistry. 2004. Vol. 324, N 1. P. 60–67

9. Яшин К. Д., Осипович В. С., Пицук С. Е. Структура нанокристаллов селенида кадмия, полученных методами коллоидной химии для применения в медицинской диагностике // Доклады БГУИР. 2007. № 3 (19). С. 74—79.

10. Яшин К. Д., Осипович В. С., Терпинская Т. И. и др. Технология визуализации клеток для экологической токсикологии // Здоровье и окружающая среда: сб. научных тру-дов. Минск: Белинформ. 2009. Вып. 13. С. 521–526. 11. Ostendorp S., Lei Y., Wilde G. Two-step synthesis method

for regular arrays of nano-particles embedded in oxide layers // Chemical Physics Letters. 2011. Vol. 513. P. 99-102.

УДК 623.3

Л. С. Раткин, канд. техн. наук, директор по научной работе ООО "АРГМ", г. Москва, e-mail: rathkeen@bk.ru

НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ШКОЛЫ РОССИИ: ЭТАПЫ СТАНОВЛЕНИЯ И МЕЖДУНАРОДНАЯ КООПЕРАЦИЯ

Поступила в редакцию 12.02.2012

С 5 по 7 октября 2011 г. в Академическом физикотехнологическом университете — научно-образовательном центре нанотехнологий РАН (г. Санкт-Петербург) под председательством Президента Нанотехнологического общества России (НОР), д-ра. техн. наук В. А. Быкова проходила Третья ежегодная научно-практическая конференция НОР "Выход российских нанотехнологий на мировой рынок: опыт успеха и сотрудничества, проблемы и перспективы", на которой были представлены доклады по различным направлениям отраслевого развития в России.

Ключевые слова: Российская академия наук (РАН), Нанотехнологическое общество России (НОР), наноматериалы, нанотехнологии, нанообразование, наноиндустрия, поверхностно-активные вещества (ПАВ), нанотрубки, наночастицы, нанокомпозиты

Одной из ведущих научных школ в России, имеющих международное признание и лидерство по ряду нанотехнологических направлений, является школа вице-президента РАН, лауреата Нобелевской премии академика Ж. И. Алферова. Открывая конференцию, ректор Академического физико-технологического университета — Научно-образовательного центра нанотехнологий РАН отметил инновационный характер российских разработок, их высокий уровень и конкурентоспособность на международном рынке.

Значительное влияние на развитие наноиндустрии в России оказала научная школа декана факультета наук о материалах МГУ им. М. В. Ломоносова академика РАН Ю. Д. Третьякова, первого Президента НОР. Совместно с В. И. Путляевым был представлен доклад об инновационной нанотехнологической образовательной деятельности сквозь призму научно-исследовательских студенческой и аспирантской работ. Нанообразование и нанопросвещение, как неотъемлемые компоненты современного индустриального развития России, предполагают корректировку ряда образовательных программ в сфере нанотехнологий и наноматериалов. В 2012 г. факультету наук о материалах МГУ им. М. В. Ломоносова исполняется 21 год, и, вступая в третье десятилетие своего существования, при подготовке нового поколения специалистов-наноматериаловедов нельзя не учитывать ряд факторов. Помимо кадровых проблем в докладе рассматривалась специфика организации и проведения НИР по нанотехнологической и наноматериаловедческой тематикам, в частности, по наноструктурированным материалам для фотокатализа, нанотрубкам и композитам на их основе, гидрофильным и гидрофобным квантовым точкам для биомедицинских и фотовольтаических приложений.

Серия докладов была представлена научной школой профессора Н. И. Борисенко (Электростальский политехнический институт — филиал ФГОУ ВПО НИТУ МИСиС). В соавторстве с Р. М. Гизатуллиным (ООО ИСШ "НАНОДЕНТ") рассмотрены процессы самоорганизации и самосборки в композиционных материалах. В частности, предложен метод замещения функции периодонта (промежуточной ткани между костной поверхностью и окружающей тканью) сверхпластичными и биоструктурированными наноматериалами с фрактально структурированной поверхностью. Полученное новообразование — пространственное тело, названное авторами "фениксоном", по аналогии с упругой компонентой периодонта демпфирует колебания системы "ткань-имплантант": так как имплантант и фениксон имеют аналогичные структуры, состоящие из микро- и наночастиц, демпфирование колебаний имеет естественный характер, как у периодонта. Фрактальная структурированность поверхности микро- и наночастиц обусловливает прочность связей при прорастании в частицы живой ткани в послеоперационный период.

Профессором Н. И. Борисенко в соавторстве с О. Н. Борисенко, А. А. Савелло и Е. А. Чичиро исследован эффект измельчения зерен твердых сплавов вследствие избыточной поверхностной энергии наночастиц. В отличие от роста зерна при затвердевании "обычного" твердого сплава, при затвердевании сплава с присадкой наночастиц наблюдается рост внутренних напряжений в зерне, приводящих к его разрушению. На примере зерен карбида вольфрама показан эффект измельчения зерна с выравниванием гранулометрического состава материала. Ровный зерновой состав модифицированного сплава обусловливает его улучшенные значения характеристик динамической вязкости, прочности и высокой твердости, а также точности резания.

В ходе работ по изучению концентраций наночастиц при создании твердых сплавов профессором Н. И. Борисенко совместно с П. А. Лисиным построена модель, способствующая нахождению диапазона оптимальных концентраций. Исследовано пять видов плотных упаковок наночастиц тетраэдральная, тетрагональная, кубическая, пирамидальная и ромбическая. Низший предел концентрации наночастиц был получен с учетом геометрических построений. Верхний предел был определен при дополнении минимально возможной упаковки произвольно размещенными в оставшихся полостях наночастицами. Экспериментально было получено, что динамическая вязкость, прочность и твердость материала возрастают при мелкозернистой структуре сплава с концентрацией наночастиц до 6 %. Для каждого вида упаковки был установлен оптимальный диапазон концентраций, что существенно сократило время подбора композиций для натурных экспериментов.

Четвертое направление работы научной школы профессора Н. И. Борисенко — тэны большой мощности для изучения работы ядерных реакторов и проведении пусконаладочных работ при их запуске. Совместно с Г. Р. Петросяном разработана технология прессовки смеси крупнозернистого порошка из хорошо уплотняющегося при "сухом" прессовании материала и рабочего ультрадисперсного нанопорошка. При исследовании распределения крупных и мелких частиц сферической формы допускалось заполнение промежутков между "крупными" частицами "мелкими", исходя из критериев произвольного заполнения свободных объемов и геометрических условий построения. При создании каркаса из хорошо прессующихся крупных частиц возможно размещение большого числа плохо прессующихся мелких частиц без снижения электрической прочности и теплопроводности композиционного материала. Получен материал из ультрадисперсных частиц отлично прессующегося оксида магния (размер — 1...3 мкм) и негигроскопичного и обладающего высокой электрической прочностью и теплопроводностью нитрида бора (размер — 30...80 нм), что позволило на экспериментальном трубчатом нагревателе достичь устойчивой работы при температуре 1200 °С по оси нагревателя и при тепловом потоке 2 МВт на метр длины.

Другая научная школа профессора В. А. Волкова (МГТУ им. А. Н. Косыгина) представила на конференции доклады по изучению особенностей формирования слоя наночастиц магнитных жидкостей (ФСНМЖ) на поверхности полимерных волокон (ППВ) для придания тканям защитных свойств и по нанотехнологиям формирования модифицирующих слоев (ФМС) на волокнах для маслоотталкивающей отделки тканей (МОТ). В случае ФСНМЖ на ППВ (доклад в соавторстве с Е. Л. Щукиной и С. А. Омельянчуком) рассматривались АСМ-методы идентификации наночастиц после осаждения на волокна тканей по размерам с исследованием закономерностей их распределения и определением оптимальных условий осаждения с учетом расчета электрических потенциалов поверхностей волокон и частиц и энергии их взаимодействия. Представлены разные методы фиксации на поверхности волокон частиц, в частности, посредством создания полимерной пленки из наночастиц синтетических латексов, проанализированы свойства ткани и предложено использование модифицированных магнитными наночастицами тканей для защиты от излучений.

В другом докладе профессора В. А. Волкова совместно с А. А. Агеевым (ИМЭИ) и А. И. Амарули (МГТУ им. А. Н. Косыгина) по ФМС на волокнах для МОТ в обзоре модификации текстильных материалов представлены методы молекулярного наслаивания интерполимерных комплексов, состоящих из фторсодержащего анионактивного ПАВ и водорастворимого катионактивного полимера, а также технологии генерации полимерных нанопленок из осажденных латексных частиц и принципы формирования при адсорбции модификатора мономолекулярного нанослоя. В частности, представлены результаты использования метода олеофобизации волокон текстильных материалов, базирующегося на технологии нанесения фторсодержащего ПАВ и якорного полимера по слоям. Модификация волокон нанотехнологией молекулярного наслаивания фторуглеродных ПАВ повышает их устойчивость к химчистке и стирке. Адсорбция ПАВ и полимеров применяется для генерации наноразмерных модифицирующих слоев, что обеспечивает грязе-, масло- и водоотталкивание тканей, используемых для производства текстильных изделий одежды, чехлов и различной продукции технического назначения.

Два доклада на конференции были представлены руководителем направления нанотехнологических исследований Ю. А. Гордеевым (РГУТиС). В обзорном исследовании рисков и перспектив применения нанотехнологий в АПК обусловливалось активное применение нанотехнологий и наноматериалов в шестом технологическом укладе. Обосновывались применения фармацевтических и медицинских наносистем для защиты окружающей среды и экологии, нанобиотехнологий и нанобиологических систем для восстановления почв, конструирование синергетических бионаноинфокогнитивных систем и агронанотехнологических комплексов для повышения урожайности и противодействия неблагоприятным факторам. В частности, возможно применение МЭМС-устройств для подавления действия личинок вредителей сельскохозяйственных культур.

Подробный анализ биологически активных компонентов ионизированного потока излучений низкотемпературной гелиевой плазмы был представлен в докладе представителя научной школы изучения нанотехнологий для АПК Ю. А. Гордеевым (РГУТиС) по агробиотехнологическим сельскохозяйственным системам. Были проведены эксперименты с использованием в качестве рабочего газа плазматрона гелия со сплошной составляющей на длинах волн 680...700 нм. На опытном сельскохозяйственном плазмотроне СУПР-М с высокой стабильностью работы и большой площадью облучения со спектром в диапазоне 460...400 нм, близком к спектру излучения Солнца весной, были изучены оптические спектральные свойства семян растений. В ходе исследования спектральных характеристик сельскохозяйственных плазмотронов различных конструкций с гелиевой плазмой были получены данные, свидетельствующие о позитивном влиянии облучения семян растений на рост урожайности сельскохозяйственных культур.

В Брянском государственном техническом университете представителем научной школы С. В. Давыдовым изучена технология наномодифицирования железоуглеродистых сплавов. При обсуждении модели наноструктурной организации расплавов, в том числе сталей и чугунов, представлены модели макроструктурного строения расплава. При рассмотрении жидкого чугуна как однофазной системы (углеродно-железистый полимер, структурные компоненты которого — фуллерены и углеродные наночастицы на их основе) допустимо его "модифицирование" фазой неметаллических включений, например, сульфидов и оксидов, синтезированных на основе растворенных в чугуне серы и кислорода их активизация идентифицируется адсорбционными процессами углеродных наноструктур на поверхности раздела "расплав — неметаллическое включение". При обработке чугунов разных видов с помощью наномодификаторов возможна оптимизация технологических процессов управления их структурным состоянием, что позволяет более детально структурировать процессы модификации железоуглеродистых сплавов.

В соавторстве с канд. техн. наук В. С. Леоновым (ЗАО НПО "Квантон") С. В. Давыдовым исследованы процессы высокоскоростной динамической имплантации поверхности углеродистой стали речным песком и разработаны технологии порционно-непрерывной динамической имплантации микродоз кристаллических тел на поверхность обрабатываемого материала, что позволяет вкладывать целиком кристаллическую решетку одного вещества в кристаллическую решетку другого вещества. Поскольку атомы незначительно смещаются относительно центров равновесия (от размера осевых единиц — доли процента), формируются условия сближения структурных элементов для генерации новых связей, структур и кристаллических фаз. При высокоскоростной динамической имплантации речным песком поверхности углеродистой стали выявлен факт формирования под поверхностью образца тонкого слоя силицилов железа. При формировании структуры специфика взаимодействия со сталью частичек песка возможно появление структурных наноэффектов

на межфазной поверхности "сталь—песок" и на фронте ударной волны.

Представителями научной школы Московского государственного института электронной техники (технического университета) Л. П. Ичкитидзе, В. М. Подгаецким и С. В. Селищевым исследована электропроводность композиционного наноматериала с углеродными нанотрубками. Изучена удельная электропроводность толстых слоев композиционного наноматериала, состоящего из многослойных углеродных нанотрубок (производитель — фирма "Таунит") и медицинского геля на базе карбоксилметилиеллюлозы. Наблюдаемый болометрический эффект обусловлен фоточувствительностью образцов, биосовместимость которых наряду с невысоким коэффициентом изменения удельной электропроводности, низким порогом протекания и высокой удельной электропроводностью позволяют применять наноматериал в биомедицине, МЭМС и других областях.

Сотрудником Института нанотехнологий микроэлектроники РАН А. Н. Миронюком совместно с Л. П. Ичкитидзе разработан гибридный датчик магнитного поля (ДМП) для регистрации углеродных нанотрубок (УНТ). Поскольку при инкапсуляции магнитных наночастиц внутрь УНТ они регистрируются ДМП, применяются высокочувствительные ДМП, построенные, например, на технологической базе измерения эффекта гигантского магнитосопротивления (ГМС). Магниточувствительный элемент (МЧЭ) с эффектом ГМС, диэлектрическая подложка, сверхпроводящий трансформатор магнитного потока (СТМП) и размещенная между активной СТМП-полосой и МЧЭ изолирующая пленка составляет гибридный ДМП, принцип действия которого основан на измерении магнитного поля с помощью СТМП на МЧЭ. Разработанный гибридный ДМП высокого разрешения обеспечит неинвазивный контроль миграции УНТ, их распределения и концентрации в биообъектах и магнитных объектах, например, суперпарамагнитных наночастицах, элементах наноэлектроники и мезоскопических наночастицах.

В Научно-исследовательском институте комплексных испытаний оптических приборов и систем В. С. Макиным и в Ульяновском государственном университете Р. С. Макиным на базе разработанной универсальной поляритонной модели лазерно-индуцированного разрушения конденсированных сред исследованы принципы взаимодействия мощного лазерного излучения ультракороткой длительности с диэлектриками. При фотонно-индуцированном нетермическом фазовом переходе возникает возбуждение поверхностных неравновесных плазмон поляритонов. Интерференция на формируемой внутри диэлектрика границе "диэлектрик — плазменный слой" и на границе раздела

"воздух — диэлектрик" обусловливает синтез наноструктур разрушения — их вид зависит от характера поляризации излучения. Поскольку фемтосекундному излучению присуща минимальная область термического воздействия без растрескивания хрупких диэлектриков (например, керамик, стекол и кристаллов), возможна организация производства оборудования для лазерной фемтосекундной маркировки изделий. При фемтосекундной маркировке диэлектриков, например полимеров, необходимо учитывать повышение уровня защиты от подделки с применением круговой, радиальной и азимутальной поляризации излучения и зависимость от ориентации вектора линейно поляризованного лазерного излучения ориентации периодических наноструктур. Допустимо создание наноструктур, период которых меньше дифракционного оптического предела, и технологий с применением когерентной оптической микроскопии для считывания трехмерного маркировочного изображения.

Профессор В. Ф. Петрунин представил нанотехнологии и наноматериалы, разрабатываемые в Национальном исследовательском ядерном университете "МИФИ". Помимо неравновесного характера наноструктурного состояния вещества, промежуточного между аморфным и кристаллическим, рассмотрены нанотехнологии и наноматериалы для получения нанокрасок для защиты продукции от подделки, для конденсаторов и электропроводов, для конструкционных и топливных материалов для АЭС, для радиопоглощающих и радиационнозащитных покрытий и материалов, нанофильтров для очистки газов и жидкостей.

Созданию автоматических программно-управляемых технологий и производств атомной точности был посвящен доклад А. А. Потапова (Институт динамики систем и теории управления СО РАН). Предлагается математическое описание процесса атомно-молекулярной сборки и компьютерного нанопроектирования с установлением корректных связей между микро- и макроуровнями вещества. Построена многоуровневая модель, в рамках которой сборка молекул и атомов в мультимолекулярные и мультиатомные комплексы и системы обусловлена знанием механизма их парного связывания, что предполагает глубокое изучение электронного строения атомов.

В системе научных школ по нанотехнологической проблематике РХТУ им. Д. И. Менделеева сотрудник Э. Г. Раков специализируется по вопросам современного состояния производства и использования УНТ. Приведены данные 370-страничного отчета (2011 г.) компании "MarketsandMarkets", согласно которому в 2016 г. ежегодный рост мирового рынка УНТ составит 12,4 % и достигнет 3,3 млрд долл. США. Из 14 тыс. т производственных мощностей многослойных УНТ на азиатские страны будет

приходиться порядка 6 тыс. т. Среди новых материалов, содержащих УНТ, следует выделить нанокомпозиты (УНТ выступают в качестве наполнителей, содержание — до 5 %) и консолидированные УНТ, состоящие из нанотрубок на 95...100 %. Инвестиционно привлекательными являются инновационные проекты по производству прозрачных электропроводных пленок и покрытий, конкурирующих с твердым раствором оксидов олова и индия и применимых для оборудования в сфере сенсорики и фотоники. В нанокомпозитной группе необходимо выделить модифицированные полимеры: помимо полимерной продукции интенсивно развивается направление по гибридным композитам, бетону, керамике, биологическим материалам и металлам, применимым, в частности, в МЭМС и беспилотных летательных аппаратах. Из композитов с УНТ планируется изготавливать порядка 100 деталей для пассажирского самолета Boeing 787, ряд компонентов уже выпускается серийно для военного самолета F-35 (производитель компания "Lockheed Martin").

Представителями научной школы Восточно-Сибирского государственного технологического университета П. В. Колобовым, И. П. Титовой, О. П. Титовым и А. О. Титовым разработаны технологии идентификации поверхностных свойств материалов и веществ, методы определения поверхностной активности по перемещению жидкости поверхностно-активными веществами и оборудование для измерения дальности распространения микроволн с регистрацией и записью значений характеристик процессов при перемещении жидкости с помощью ПАВ, содержащихся в капле раствора. С помощью профилометра получены средние значения показателей шероховатости поверхностей для разных типов материалов. Согласно проведенным расчетам, порядка 3,5 млн молекул воды может быть перемещено одной молекулой ПАВ, что позволяет применять разработанную технологию для характеристики наноматериалов.

Применением разработок И. С. Фастова в ЗАО "Нанотехнологии и инновации" является опыт создания малой инновационной компании в наноиндустриальной сфере для коммерциализации технологий, в частности, по производству наноконтейнеров из алюмосиликатных трубок и наноконтейнерных модификаторов, композиционных материалов и материалов на их основе. Среди сфер применения авиационно-космическая и медицинская промышленность, керамика и лакокрасочные материалы, АПК, косметология (например, инкапсуляция биологически и химически активных веществ), строительство и индустрия пластмасс. Разработаны методики продвижения на российский рынок высокотехнологичной продукции с учетом нормативно-правовой базы в предпринимательской сфере, анализа ключевых факторов малого и среднего инновационного бизнеса, управления персоналом для стимулирования творческой активности и инициативы, а также построения систем оперативного, тактического и стратегического менеджмента.

По сравнению с коммерческо-внедренческой направленностью в ЗАО "Нанотехнологии и инновации", С. А. Фастовым в ЗАО "Нанотех-Актив" проводятся системные научные исследования по разработке алюмосиликатных наноконтейнеров для разных отраслей. В частности, возможно применение разработанных алюмосиликатных нанотрубок (АНТ) для получения проводящих наполнителей. Высокая каталитическая активность и пористая структура АНТ позволяют применять их для разделения газообразных и жидких смесей и в качестве различных катализаторов. Разные поверхностные химические свойства на внешних и внутренних сторонах АНТ являются следствием их различной химической структуры, что позволяет проводить их селективную модификацию. По сравнению с УНТ АНТ значительно дешевле, что позволяет рассчитывать на успешную реализацию инвестиционных проектов по выпуску инновационной высокотехнологичной продукции на базе АНТ на внутренний и внешний рынки.

Представителями научной школы Владимирского государственного университета им. А. Г. и Н. Г. Столетовых исследован процесс синтеза наноструктурированных тонкопленочных титановых покрытий под действием в вакууме фемтосекундного лазерного излучения. Коллективом в составе С. М. Аракеляна, Д. В. Абрамова, К. С. Хорькова, В. Г. Прокошева и М. Н. Герке изучено формирование тонкопленочных титановых покрытий методом лазерной абляции образцов в вакууме. В частности, установлено присутствие кристаллической формы диоксида титана — рутила на поверхности подложки наноструктурированных пленок. При применении иттербиевой лазерной системы формируется равномерная пленка, в которой функционально выделяются несколько зон. При использовании титан-сапфировой лазерной системы в центральной зоне после изъятия подложки с напыленной пленкой активные наночастицы взаимодействуют с атмосферным кислородом. Перераспределение рельефа поверхности с формированием квазиупорядоченных структур обусловлена большей, чем по краям, толщиной пленки и концентрацией частиц в центральной зоне. При удалении от нее топологические параметры структур меняются, хотя в центральной области напыления синтез зигзагообразных структур интенсивнее, чем по краям.

Украинская нанотехнологическая научная школа на конференции [1] была представлена М. В. Юрженко (Институт химии высокомолекулярных соединений НАН Украины) и Ю. В. Литвиненко

(Институт геохимии окружающей среды НАН и МЧС Украины). Для очистки техногенно загрязненных вод от поллютантов (например, радионуклидов и тяжелых металлов) рассматривается применение ферритного метода, соосаждения, ионного обмена на ионообменниках и сорбции с использованием искусственных и природных наноматериалов. В комбинационных наноматериалах сорбентом являются коллоиды поликремниевых кислот, получаемых с участием дисперсий магнетита из водного раствора. Базовыми механизмами, влияющими на поглощение катионов из дисперсионной среды при синтезе наночастиц поликремниевых кислот, являются сорбционные процессы в комбинационном наноматериале и поглощение катионов при формировании наноколлоидов. При удалении поглощенных коллоидами поликремниевых кислот катионов их коагуляция возможна в условиях, препятствующих миграции в жидкость поглощенных веществ из твердой фазы комбинационных наноматериалов — ими могут быть композиционные полимерные материалы: гибридные органо-неорганические наносистемы на базе солей поликремниевой кислоты, изоцианатсодержащих модификаторов и уретановых олигомеров. Согласно проведенным ранее исследованиям, перечисленные наносистемы обладают высокой сорбционной активностью и селективностью к молекулам органических растворителей и воды, что обусловлено разностью электростатических зарядов молекул сорбата и сорбента, а также процессами диссоциации молекул сорбата во внешнем электромагнитном поле. Применение солей поликремниевой кислоты как неорганического компонента наносистем также перспективно, поскольку непосредственно при синтезе наносистем возможно введение коагулянта, что в твердой фазе комбинационного наноматериала приведет к построению прочных химических связей. В рамках исследований украинской нанотехнологической научной школой изучены различные способы введения микро- и наночастиц коагулирующего агента и основного сорбента. Например, для получения комбинационного наноматериала, анализа структур и физико-химических свойств и способности поглощения и удаления ионов многовалентных, щелочноземельных и щелочных металлов возможно введение в композиционные органо-неорганические наносистемы кремний-магнетитового композита. Среди основных направлений синтеза комбинационных наноматериалов можно отметить не только формирование наносистем с применением водного раствора поликремниевой кислоты с магнетитовыми дисперсиями для создания нанокомпозита с химически связанным наполнителем и генерацию из наносистем ядерных мембран посредством бомбардирования потоком альфа-частиц с последую-

щим введением коагулянта в полученные поры коагулянта, но и введение в наносистемы сухих наночастиц в процессе их создания для получения физически наполненного нанокомпозита, а также введение в наносистемы коагулянта методом сорбции из водного раствора и десорбции из объема наносистем воды. В ходе исследований было установлено, что основные коагулянты и сорбенты, входящие в состав разработанных рекомбинационных наноматериалов, применимы для извлечения из растворов радиоактивных ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs с исходной активностью 5 кБк/л. Полученный при удалении катионов кремниевый композит образует стеклофазу при температуре 1000 °С, что позволяет его применять для остекловывания радиоактивных отходов.

В рамках конференции был представлен доклад Д. М. Урманова (Академия навигации и управления движением, Русская ассоциация МЭМС), где были рассмотрены тренды развития рынка навигационной техники, в том числе малогабаритных инерциальных систем на базе МЭМС- и НЭМСакселерометров, инклинометров и гироскопов. Помимо практических приложений рассматривались тенденции в построении навигационного оборудования, включая миниатюризацию систем, применение нанотехнологий и наноматериалов при их изготовлении, различные аспекты оптимизации ценовой и тарифной политики, вопросы формирования эффективной маркетинговой политики при реализации отраслевой продукции в различных сферах — безопасности, судостроении и авиастроении, а также нефтегазовой индустрии. Подчеркивалась позитивная роль сотрудничества предприятий ФРГ и РФ при проектировании и выпуске первого российского двухосевого МЭМСинклинометра на базе инновационных технологий, были представлены результаты испытаний МЭМС-сенсора. Также рассматривались перспективы реализации на рынке РФ инвестиционного проекта по организации выпуска в России по технологиям глубокого травления двухосевого МЭМС-акселерометра и предложения по налаживанию долгосрочного сотрудничества научных организаций, производственных предприятий РФ и иностранных фирм в сфере МЭМС и НЭМС.

Среди выступлений представителей региональной исполнительной власти можно отметить доклад Ю. В. Ягудаева (Министерство экономического развития Ставропольского края), Ю. А. Копейкина и А. Е. Котова (НО "Фонд содействия развитию внутренних инвестиций в субъекты малого и среднего предпринимательства в научно-технической сфере Ставропольского края"), в котором было проанализировано текущее состояние проблем развития наноиндустрии на территории Ставропольского края и оценены его инвестиционные и инновационные возможности при реализации отраслевых проектов и программ. На конференции были также представлены доклады ряда вузов России, стран ближнего и дальнего зарубежья. Рассматривались перспективы нанотехнологического сотрудничества научных школ, защиты интеллектуальной собственности в наноиндустриальной сфере и продвижения инновационной продукции на внутренний и внешний рынки [2].

Выводы:

1. В 2012 г. Российская научная общественность отмечает три важных юбилея: весной — пятилетие Российской нанотехнологической инициативы, провозглашенной в Послании Президента Российской Федерации В. В. Путина в 2007 г., в июле пятилетие создания ГК "РОСНАНО" (с 01.01.2011 — ОАО "РОСНАНО") и в декабре — пятилетие создания Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (на базе Отделения информационных технологий и вычислительных систем РАН). Целесообразно проведение Нанотехнологическим обществом России осенью 2012 г. 4-й ежегодной научно-практической конференции, посвященной этим событиям. Автором предлагается в качестве одной из тем обсуждения предстоящей осенней конференции НОР рассмотреть этапы становления российских нанотехнологических школ и их научную кооперацию на международном уровне.

2. В России сформировалась разветвленная система нанотехнологических научных школ, имеющая международное признание. Между тем, выделяемых средств на реализацию большинства наноиндустриальных проектов ОАО "РОСНАНО" недостаточно. Кроме того, процедура оформления подачи заявок в Российскую нанотехнологическую корпорацию труднореализуема для большинства предприятий малого и среднего бизнеса, работающих в нанотехнологической сфере. Для расширения перечня участников наноиндустриальной кооперации необходимо значительное упрощение процедуры подачи заявок в ОАО "РОСНАНО" и существенное сокращение сроков их рассмотрения с соответствующим расширением перечня направлений сотрудничества.

Список литературы

1. Махиянова Е. Б. Совместное заседание Президиумов Российской академии наук и Национальной академии наук Украины в рамках дней образования и науки Украины в Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2011. Т. 81, № 12. С. 1128—1134.

2. Раткин Л. С. Патент на изобретение № 2322693.

Элементы МНСТ

УДК 681.586'326:539.2

Е. М. Белозубов¹, д-р техн. наук, нач. группы, **Н. Е. Белозубова²**, аспирант, инженер, **В. А. Васильев²**, д-р техн. наук, проф., зав. каф., e-mail: opto@bk.ru ¹Пенза, ОАО "Научно-исследовательский институт физических измерений" ²Пензенский государственный университет

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ НАНО-И МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ, КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Поступила в редакцию 22.11.2011

Рассмотрено повышение стабильности тонкопленочных нано- и микроэлектромеханических систем датчиков давления для систем измерения, контроля и диагностики технически сложных объектов.

Ключевые слова: тонкопленочные нано- и микроэлектромеханические системы (HuMЭMC), временная стабильность, температура, деформация, критерий, датчик давления, идентичный тензоэлемент

Тензорезисторные датчики давления, использующие в качестве чувствительных элементов тонкопленочные нано- и микроэлектромеханические системы (НиМЭМС) [1], разрабатываемые и изготавливаемые ОАО "НИИФИ" в настоящее время, обладают очень высокой стойкостью к воздействию жестких дестабилизирующих факторов. Достаточно отметить, что эти датчики работают при воздействии в широком диапазоне частот виброускорений, достигающих 10 000 м/с². Структурное многообразие датчиков [2] обеспечивает работу в температурном диапазоне от криогенных температур до 250 °С и выше. Эти датчики сохраняют свои технические характеристики в течение 15 и более лет. При этом они не требуют поверки в течение всего срока службы. Преимуществом датчиков является также сочетание высокой стойкости к воздействию жестких дестабилизирующих факторов с достаточной точностью, малыми массой и габаритными размерами. В то же время системы измерения, контроля и диагностики модернизируемых и вновь создаваемых технически сложных объектов настоятельно требуют дальнейшего улучшения характеристик датчиков давления. В настоящее время актуальной задачей является дальнейшее повышение временной стабильности тонкопленочных НиМЭМС и датчиков давления на их основе [3].

В работе [4] на основании полученных структурно-факторных условий стабильности сформулирован структурно-факторный метод обеспечения стабильности тонкопленочных НиМЭМС, заключающийся в обеспечения идентичности структур тонкопленочных тензорезисторов, размеров и характеристик их элементов, а также идентичности деформаций и температур, воздействующих на эти элементы при изготовлении и эксплуатации.

В работе [4] определены критерии временной стабильности тонкопленочных НиМЭМС:

- минимальная нелинейность функции преобразования давления в выходной сигнал (характеризует деформационный аспект структурнофакторных условий стабильности);
- минимальная аддитивная температурная погрешность НиМЭМС или минимальное приведенное значение коэффициента функции влияния температуры на начальный выходной сигнал (интегральный критерий, учитывающий температурный аспект структурно-факторных условий стабильности);
- минимальная мультипликативная температурная погрешность или минимальное приведенное значение коэффициента функции влияния температуры на чувствительность (интегральный критерий стабильности, характеризующий температурный и деформационный аспекты структурно-факторных условий стабильности).

Тонкопленочные НиМЭМС с идентичными тензоэлементами, относящиеся к системам с дискретными тензорезисторами, за счет возможности оптимального размещения тензорезисторов в зонах воздействия деформационных температурных полей на упругом элементе [5] стали основой создания целого ряда серийно изготавливаемых тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления нового поколения, предназначенных для системы измерения, контроля и диагностики технически сложных объектов при воздействии стационарных, нестационарных температур и повышенных виброускорений [5]. Применение НиМЭМС с идентичными тензоэлементами в датчиках давления позволило в 3...10 и более раз уменьшить их погрешность при воздействии вышеназванных факторов. В то же время недостатком известных решений является сравнительно большая погрешность измерения давления в условиях воздействия температур широкого диапазона вследствие различного влияния имеющих различную конфигурацию и размеры перемычек, соединяющих радиальные и окружные тензоэлементы, которые включены в два других противоположных плеча измерительного моста. При этом не всегда возможна компенсация с требуемой точностью имеющегося при реальном производстве технологического разброса геометрических размеров и физических характеристик тензоэлементов и имеющихся существенных различий конфигураций и размеров перемычек, соединяющих окружные и радиальные тензоэлементы [6].

Недостатком известных решений является также сравнительно низкая чувствительность к измеряемому давлению, вызванная меньшей чувствительностью к измеряемому давлению окружных тензоэлементов по сравнению с радиальными тензоэлементами вследствие меньших значений тангенциальных (окружных) деформаций от измеряемого давления по сравнению с радиальными в месте размещения тензоэлементов. Кроме того, различная чувствительность к измеряемому давлению окружных и радиальных тензорезисторов приводит к увеличению нелинейности характеристики датчика, что также является недостатком таких конструкций.

Дальнейшее улучшение характеристик датчиков давления на основе тонкопленочных НиМЭМС возможно за счет применения в них тонкопленочных НиМЭМС с идентичными тензоэлементами и идентичными перемычками [6]. Целью решения является уменьшение погрешности измерения в условиях воздействия широкого диапазона температур, повышение чувствительности к измеряемому давлению и уменьшение нелинейности характеристики за счет устранения различий конфигураций и размеров перемычек, соединяющих тензоэлементы, возможности более точной компенсации технологического разброса геометрических размеров и физических характеристик тензорезисторов, а также за счет размещения всех тензоэлементов в зонах воздействия максимальных и близких по абсолютной величине радиальных деформаций от измеряемого давления.

Созданная НиМЭМС (рис. 1) содержит корпус 1, круглую мембрану 2 с периферийным основанием 3, по которому мембрана закреплена в корпусе, соединенные перемычками 4 из низкоомного материала и включенные в измерительный мост тензорезисторы 5. Они выполнены в виде соединенных перемычками одинакового количества имеющих одинаковую форму тензоэлементов 6, расположенных по окружности на мембране. Радиальные тензоэлементы 6, включенные в два противоположных плеча измерительного моста, расположены на периферии мембраны 2. Одна из перемычек 4, со-



Рис. 1. НиМЭМС с идентичными тензоэлементами и перемычками

единяющих тензорезисторы, имеет две контактные площадки 7, соединенные резистивной полосой 8, отдельные участки которой закорочены дополнительными перемычками 9. Два других плеча измерительного моста выполнены в виде радиальных тензоэлементов 10, расположенных на границе тонкой части мембраны и жесткого центра 11, выполненного на мембране 2 [6].

Размещенные в области жесткого центра 11 и на тонкой части мембраны 2 перемычки 12 и 13, соединяющие тензоэлементы 10, расположенные на границе тонкой части мембраны 2 и жесткого центра 11 соответственно, идентичны размещенным на тонкой части мембраны 2 и в области периферийного основания 3 перемычкам 14 и 15, соединяющим тензоэлементы 6, расположенные на периферии мембраны 2.

При воздействии измеряемого давления на мембрану 2 со стороны 16, противоположной расположению тензосхемы, на планарной поверхности мембраны возникают радиальные и тангенциальные напряжения и деформации, которые воспринимаются тензоэлементами 6 и 10 тензорезисторов. В связи с тем, что тензоэлементы 6 расположены на периферии мембраны, воздействие деформации от измеряемого давления на тензоэлементы 6 приводит к уменьшению их сопротивлений. Выводные проводники 17 и гермовыводы 18 обеспечивают подачу на измерительный мост напряжения питания и снятие выходного сигнала.

В связи с тем, что тензоэлементы 10 расположены на границе тонкой части мембраны 2 и жесткого центра 11, выполненного на мембране 2, воздействие деформаций от измеряемого давления на радиальные тензоэлементы 10 приводит к увеличению их сопротивлений. Так как тензоэлементы 6 и 10 включены соответственно в противоположные плечи измерительного моста, то на его выходе формируется выходной сигнал, значение которого однозначно связано с измеряемым давлением.

Так как тензоэлементы 6 и 10 расположены в радиальном направлении соответственно на периферии мембраны 2 и на границе тонкой части мембраны 2 и жесткого центра 11, где воздействуют радиальные деформации от измеряемого давления, значения которых существенно больше тангенциальных (окружных) деформаций, то чувствительность к измеряемому давлению предлагаемой НиМЭМС будет больше. Так как тензоэлементы 6 и 10 расположены в радиальном направлении соответственно на периферии мембраны 2 и на границе жесткого центра 11, где воздействуют радиальные деформации от измеряемого давления, значения которых, отличаясь по знаку, практически не различаются по абсолютной величине, то нелинейность характеристики НиМЭМС будет уменьшена [6].

Идентичность перемычек 12 и 13 соответственно перемычкам 14 и 15 обеспечивает уменьшение погрешности измерения при воздействии температур широкого диапазона вследствие уменьшения различного влияния перемычек, соединяющих тензоэлементы, на сопротивления соответствующих тензорезисторов. Кроме того, уменьшение различий конфигураций и размеров перемычек, соединяющих тензоэлементы 6 и 10, позволяет повысить точность компенсации имеющегося при реальном производстве технологического разброса геометрических размеров и физических характеристик тензоэлементов 6, 10 и перемычек 12, 13, 14, 15 с помощью закорачивания отдельных участков резистивной полосы 8 дополнительными перемычками 9 [6].

Идентичность перемычек 14, 15 и 12, 13, соединяющих тензоэлементы 6 и 10, может быть достигнута, в том числе и при отличии радиуса дуг окружностей, описанных вокруг тензоэлементов 10, расположенных на границе тонкой части мембраны 2 и жесткого центра 11, от радиуса дуг окружностей, описанных вокруг тензоэлементов 6, расположенных на периферии мембраны 2. Но при этом идентичность перемычек может быть достигнута только в случае, если расстояние и взаимное расположение между тензоэлементами 6 не равны расстоянию и взаимному расположению между тензоэлементами 10. Неравенство этих расстояний и взаимных расположений приводит к неидентич-





ности тензорезисторов 5, состоящих из тензоэлементов 6, расположенных на периферии мембраны 2, и тензорезисторов, состоящих из тензоэлементов 10, расположенных на границе тонкой части мембраны 2 и жесткого центра 11, а следовательно, к нескомпенсированной температурной погрешности и погрешности нелинейности характеристики датчика.

Так как радиус дуг окружностей, описанных вокруг тензоэлементов 10, расположенных на границе тонкой части мембраны 2 и жесткого центра 11, равен радиусу дуг окружностей, описанных вокруг тензоэлементов 6, расположенных на периферии мембраны 2, то расстояние и взаимное расположение между тензоэлементами 6 будет равно расстоянию и взаимному расположению между тензоэлементами 10, а следовательно, тензорезисторы, состоящие из тензоэлементов 6, будут идентичны тензорезисторам, состоящим из тензоэлементов 10. Следовательно, погрешность измерения при воздействии широкого диапазона температур будет уменьшена.

Общий размер радиусов, описанных вокруг тензоэлементов, выбран равным среднему значению радиусов дуг окружностей, описанных вокруг тензоэлементов 6, и дуг окружностей, описанных вокруг тензоэлементов 10. В этом случае отклонения от радиального направления тензоэлементов 6 и 10 с достаточной для предлагаемого решения точностью будут одинаковы, а следовательно, будут одинаковы их чувствительности к измеряемому давлению, что уменьшит нелинейность, погрешность измерения при воздействии температур широкого диапазона и повысит точность компенсации имеющегося при реальном производстве технологического разброса геометрических размеров и физических характеристик тензоэлементов и перемычек.

Проведенный из центра мембраны радиус дуг окружностей, описанных вокруг тензоэлементов 10, расположенных на границе тонкой части мембраны 2 и жесткого центра 11, определим методом

> геометрического построения по теореме Пифагора (рис. 2, выноска *A*)

$$r_{C00} = \left[(r_C + L)^2 + 0.25a^2 \right]^{0.5}, \quad (1)$$

где r_C — радиус жесткого центра; L — длина тензоэлемента; a — ширина тензоэлемента.

Проведенный из центра мембраны радиус дуг окружностей, описанных вокруг тензоэлементов *6*, расположенных на периферии мембраны *2*, выбран равным радиусу мембраны. Тогда с учетом соображений, приведенных выше, можно записать, что радиус дуг окружностей, описанных вокруг тензоэлементов, равен

$$r_E = 0.5 \left\{ \left[(r_C + L)^2 + 0.25a^2 \right]^{0.5} + r_M \right\}, \qquad (2)$$

где r_E — радиус дуг окружностей, описанных вокруг тензоэлементов; r_M — радиус мембраны.

В рассматриваемом решении предложено совмещение в центре соответствующего тензорезистора дуг окружностей (с радиусом r_E), описанных вокруг тензоэлементов 6, расположенных на периферии мембраны 2, с границей тонкой части мембраны 2 и периферийного основания 3, а также дуг окружностей (с радиусом r_E), описанных вокруг тензоэлементов 10, расположенных на границе тонкой части мембраны 2 и жесткого центра 11, с имеющей центр в центре мембраны окружностью (с радиусом r_{C00}), описанной вокруг тензоэлементов 10 (рис. 2, выноска A).

Такое решение позволяет обеспечить нахождение соответствующих тензоэлементов 6 и 10 на тонкой части мембраны 2 в зонах максимальных и одинаковых (по абсолютной величине) деформаций от измеряемого давления на минимальных, симметричных и одинаковых (с достаточной для практической реализации точностью) расстояниях от границ тонкой части мембраны 2 с периферийным основанием 3 и жестким центром 11 [6]. Как было показано ранее, такое восприятие деформаций повышает чувствительность, а также уменьшает нелинейность и погрешность в широком диапазоне температур. В этом случае координаты центров дуг окружностей, описанных вокруг тензоэлементов 6 и 10, должны находиться на радиусе мембраны, проведенном через центр соответствующего тензорезистора, т. е.

$$\Omega_{Mi} = 0,5(\Omega_{Mimin} + \Omega_{Mimax});$$

$$\Omega_{Cj} = 0,5(\Omega_{Cjmin} + \Omega_{Cjmax}),$$

где Ω_{Mi} — угол между осью X и радиусом мембраны, проведенным через центр *i*-го тензорезистора, расположенного на периферии мембраны; Ω_{Cj} угол между осью X и радиусом мембраны, проведенным через центр *j*-го тензорезистора, расположенного на границе тонкой части мембраны и жесткого центра; $\Omega_{Mi\min}$, $\Omega_{Mi\max}$ — углы между осью X и радиусом мембраны, проведенным соответственно через начало и конец *i*-го тензорезистора, расположенного на периферии мембраны; $\Omega_{Cj\min}$, $\Omega_{Cj\max}$ — углы между осью X и радиусом мембраны, проведенным соответственно через начало и конец *j*-го тензорезистора, расположенного на границе тонкой части мембраны и жесткого центра.



гис. 5. гасчетная модель определения оптимальных координат центров и радиусов дуг окружностей, описанных вокруг тензоэлементов

При этом смещения центров дуг окружностей, описанных вокруг тензоэлементов 6 и 10, по соответствующему радиусу (рис. 3) будут равны

$$OO_{Mi} = r_M - r_E; \quad OO_{Cj} = r_{C00} - r_M.$$
 (3)

Подставляя в выражения (3) определенные ранее соотношения (1), (2) для r_M и r_{C00} , после преобразований получим

$$OO_{Mi} = 0.5 \left\{ r_M - \left[(r_C + L)^2 + 0.25a^2 \right]^{0.5} \right\};$$

$$OO_{Cj} = 0.5 \left\{ \left[(r_C + L)^2 + 0.25a^2 \right]^{0.5} - r_M \right\}.$$

Тогда непосредственно из рис. 3 получаем оптимальные соотношения для координат центров дуг окружностей, описанных вокруг тензоэлементов, расположенных на периферии мембраны и на границе мембраны и жесткого центра:

$$x_{0Mi} = 0.5 \left\{ r_M - \left[(r_C + L)^2 + 0.25a^2 \right]^{0.5} \right\} \cos \Omega_{Mi};$$
(4)

$$y_{0Mi} = 0.5 \left\{ r_M - \left[(r_C + L)^2 + 0.25a^2 \right]^{0.5} \right\} \sin \Omega_{Mi};$$
 (5)

$$x_{0Cj} = 0.5 \left\{ \left[(r_C + L)^2 + 0.25a^2 \right]^{0.5} - r_M \right\} \cos \Omega_{Cj};$$
(6)

$$y_{0Cj} = 0.5 \left\{ \left[(r_C + L)^2 + 0.25a^2 \right]^{0.5} - r_M \right\} \sin \Omega_{Cj}, \quad (7)$$

где x_{0Mi} , y_{0Mi} — координаты центров дуг окружностей, описанных вокруг тензоэлементов, расположенных на периферии мембраны; x_{0Cj} , y_{0Cj} — координаты центров дуг окружностей, описанных вокруг тензоэлементов, расположенных на границе тонкой части мембраны и жесткого центра.

Серийные образцы датчиков давления на основе разработанной тонкопленочной НиМЭМС по сравнению с датчиками давления на основе ранее

разработанной HиMЭMC имеют в 20 раз меньшие приведенные значения погрешности от нелинейности статической характеристики, в 6 раз меньшие значения коэффициентов функции влияния температуры на начальный выходной сигнал, в 10 раз меньшие значения коэффициентов функции влияния температуры на чувствительность.

Таким образом, в значительной степени выполнены определенные в работе [4] критерии временной стабильности тонкопленочных НиМЭМС, учитывающие деформационный, температурный и температурно-деформационный аспекты структурно-факторных условий стабильности. Для подтверждения этого проведена количественная оценка величины несоответствия НиМЭМС структурнофакторным условиям стабильности в соответствии с выражением, предложенным в работе [7]:

$$\begin{split} \xi &= \sum_{j=1}^{4} \sum_{i=1}^{N} \rho_{P}^{-1} |\rho_{Pij} - \rho_{P}| + \varepsilon_{P}^{-1} |\varepsilon_{Pij} - \varepsilon_{P}| + \\ &+ T_{P}^{-1} |T_{Pij} - T_{P}| + l_{P}^{-1} |l_{Pij} - l_{P}| + b_{P}^{-1} |b_{Pij} - b_{P}| + \\ &+ \rho_{PA} \rho_{P}^{-1} (\rho_{PA}^{-1} |\rho_{PAiJ} - \rho_{PA}| + \varepsilon_{PA}^{-1} |\varepsilon_{PAij} - \varepsilon_{PA}| + \\ &+ T_{PA}^{-1} |T_{PAij} - T_{PA}| + l_{PA}^{-1} |l_{PAij} - l_{PA}| + \\ &+ b_{PA}^{-1} |b_{PAij} - b_{PA}|) + \rho_{A} \rho_{P}^{-1} (\rho_{A}^{-1} |\rho_{AiJ} - \rho_{A}|) + \\ &+ \varepsilon_{A}^{-1} |\varepsilon_{Aij} - \varepsilon_{A}| + T_{A}^{-1} |T_{Aij} - T_{A}| + l_{A}^{-1} |l_{Aij} - l_{A}| + \\ &+ b_{A}^{-1} |b_{Aij} - b_{A}| + \rho_{K} \rho_{P}^{-1} (\rho_{K}^{-1} |\rho_{KiJ} - \rho_{K}|)) + \\ &+ \varepsilon_{K}^{-1} |\varepsilon_{Kij} - \varepsilon_{AK}| + T_{K}^{-1} |T_{Kij} - T_{K}| + l_{K}^{-1} |l_{Kij} - l_{K}| + \\ &+ b_{K}^{-1} |b_{Kij} - b_{K}| + \rho_{K\Pi} \rho_{P}^{-1} (\rho_{K\Pi}^{-1} |\rho_{K\Pi iJ} - \rho_{K\Pi}|) + \\ &+ \varepsilon_{K\Pi}^{-1} |\varepsilon_{K\Pi ij} - \varepsilon_{K\Pi}| + T_{K\Pi}^{-1} |T_{K\Pi ij} - T_{K\Pi}| + \\ &+ l_{K\Pi}^{-1} |l_{K\Pi ij} - l_{K\Pi}| + b_{K\Pi}^{-1} |b_{K\Pi ij} - b_{K\Pi}| + \\ &+ \rho_{\Pi} \rho_{P}^{-1} (\rho_{\Pi}^{-1} |\rho_{\Pi iJ} - \rho_{\Pi}|) + \varepsilon_{\Pi}^{-1} |\varepsilon_{\Pi ij} - \varepsilon_{\Pi}| + \\ &+ T_{\Pi}^{-1} |T_{\Pi ij} - T_{\Pi}| + l_{\Pi}^{-1} |l_{\Pi ij} - l_{\Pi}| + b_{\Pi}^{-1} |b_{\Pi ij} - b_{\Pi}|, \end{split}$$

где ρ_{Pij} , ρ_{PAiJ} , ρ_{AiJ} , ρ_{AKiJ} , ρ_{KiJ} , $\rho_{\Pi J}$, $\rho_{K\Pi J}$ — эффективное удельное поверхностное сопротивление соответствующих элементов и переходов і-го тензоэлемента *j*-го тензорезистора; _{Ріj, Аіj, Кіj, Пj, -} индексы, обозначающие принадлежность индексируемых параметров соответственно тензорезистивному, адгезионному, контактному элементу *i*-го тензоэлемента *j*-го тензорезистора; РАіј, АКіј, КПј индексы, обозначающие принадлежность индексируемых параметров соответственно переходу тензорезистивный — адгезионный, адгезионный — контактный, контактный — проводящий і-го тензоэлемента *j*-го тензорезистора; j = 1, 2, 3, 4 — номер тензорезистора в мостовой схеме; *i* = 1...*N* — номер тензоэлемента в тензорезисторе; l_{PiJ} , l_{PAiJ} , l_{AiJ} , l_{AKiJ} , l_{KiJ} , $l_{K\Pi J}$, $l_{\Pi J}$ — эффективная длина соответствующих элементов и переходов; b_{Pi}, b_{PAi}, b_{Ai}, b_{Ai},

 $b_{\mathrm{AK}iJ}, b_{\mathrm{K}iJ}, b_{\mathrm{K}\Pi J}, b_{\Pi J}$ — эффективная ширина соответствующих элементов и переходов *i*-го тензоэлемента *j*-го тензорезистора; ε_{Pij} , ε_{PAiJ} , ε_{AiJ} , ε_{AKiJ} , ε_{KiJ} , $\varepsilon_{K\Pi J}$, $\varepsilon_{\Pi J}$, — относительная деформация, воздействующая на соответствующие элементы и переходы *i*-го тензоэлемента *j*-го тензорезистора; $T_{\text{PiJ}}, T_{\text{PAiJ}}, T_{\text{AiJ}}, T_{\text{AKiJ}}, T_{\text{KiJ}}, T_{\text{K\Pi J}}, T_{\Pi J}$ — температура, воздействующая на соответствующие элементы и переходы *i*-го тензоэлемента *j*-го тензорезистора; ρ_P , ρ_{PA} , ρ_A , ρ_{AK} , ρ_K , ρ_Π , $\rho_{K\Pi}$ – среднее значение эффективного удельного поверхностного сопротивления соответствующих элементов и переходов; $l_{\rm P}$, $l_{\rm PA}$, $l_{\rm A}$, $l_{\rm AK}$, $l_{\rm K}$, $l_{\rm K\Pi J}$, $l_{\Pi J}$ — среднее значение эффективной длины соответствующих элементов и переходов; $b_{\rm P}, b_{\rm PA}, b_{\rm A}, b_{\rm AK}, b_{\rm K}, b_{\rm K\Pi}, b_{\Pi}$ – среднее значение эффективной ширины соответствующих элементов и переходов; ε_{P} , ε_{PA} , ε_{AiJ} , ε_{AK} , ε_{K} , $\epsilon_{K\Pi}, \epsilon_{\Pi}$ — среднее значение относительной деформации, воздействующей на соответствующие элементы и переходы; $T_{\rm P}$, $T_{\rm PA}$, $T_{\rm A}$, $T_{\rm AK}$, $T_{\rm KIJ}$, $T_{\rm K\Pi}$, T_{Π} среднее значение температуры, воздействующей на соответствующие элементы и переходы.

Для тонкопленочной HиMЭMC с идентичными тензоэлементами и идентичными перемычками, изображенной на рис. 1, количественная величина несоответствия структурно-факторным условиям стабильности $\xi = 0,003$.

Дальнейшим развитием предложенного решения является разработанная тонкопленочная НиМЭМС, схематическое изображение фрагментов которой приведено на рис. 4. Упругий элемент выполнен в виде мембраны l, изготовленной как одно целое с опорным основанием 2 и жестким центром 3. Тонкопленочные тензорезисторы $R_1 - R_4$ выполнены в виде идентичных тензоэлементов 4, размеры и местоположение которых соответствуют соотношениям (4)—(7). Тензоэлементы 4 соединены идентичными перемычками 5. Резистивная полоса 6 образует компенсационный резистор R_{β} . Контактные площадки 7 предназначены для присоединения вывод-



Рис. 4. Схематическое изображение фрагментов НиМЭМС

ных проводников. Каждый тензоэлемент 4 состоит из четырех равномерно размещенных микротензоэлементов 8, соединенных дополнительными контактными площадками 9. В связи с тем, что тонкопленочная НиМЭМС с идентичными тензоэлементами и идентичными перемычками, изображенная на рис. 4, выполнена в соответствии с соотношениями (4)—(7), она также отвечает определенным в работе [4] критериям временной стабильности тонкопленочных Ни-МЭМС, учитывающим деформационный, температурный и температурно-деформационный аспекты структурно-факторных условий стабильности. При этом количественная оценка несоответствия структурно-факторным условиям стабильности этой Ни-МЭМС аналогична оценке для НиМЭМС, изображенной на рис. 1. Таким образом, можно отметить, что предложенные НиМЭМС в настоящее время в наибольшей степени соответствуют критериям временной стабильности, учитывающим деформационный, температурный и температурно-деформационный аспекты структурно-факторных условий стабильности тонкопленочных НиМЭМС.

Список литературы

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

ника. 2007. № 12. С. 49—51. 2. Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е., Васильев В. А. Тонкопленочные микромеханические системы и датчики на их основе // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 2. С. 33—39.

3. Гордеев В. А., Иванов В. П., Мозжорина М. Ю., Портола И. С. Результаты наземной отработки и летных испытаний алгоритмов управления пневмогидравлической системой подачи топлива ракеты космического назначения "Ангара" // Латчики и системы. 2011. № 9. С. 2—39.

"Ангара" // Датчики и системы. 2011. № 9. С. 2—39. 4. Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е. Повышение временной стабильности датчиков давления на основе тонкопленочных нано- и микроэлектромеханических систем // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 6. С. 31—38.

5. **Belozubov E. M.** Promising thin-film strain-resistor pressure sensors for rocket and aviation techniques // Measurement Techniques. 2004. V. 47. № 5. P. 474–480.

6. Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е. Патент РФ № 2345341. Тонкопленочный датчик давления. Опубл. 20.01.09. Бюл. № 2.

7. Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е., Васильев В. А. Временная стабильность тонкопленочных нано-и микроэлектромеханических систем с идентичными тензоэлементами и датчиков давления на их основе // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. № 11. С. 45—50.

УДК 621.396.98(100):519.673

А. Н. Соловьев, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской Академии наук, Москва, Зеленоград, e-mail: Alexander.Soloviev@dinfo.ru В. Е. Алексеев, науч. сотр., Научноисследовательский институт вычислительных средств и систем управления, Москва, Зеленоград, e-mail: valerbas@mail.ru

БЕЗГИРОСКОПНАЯ ИНЕРЦИАЛЬНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Поступила в редакцию 06.12.2012

Предложена реализация безгироскопной навигационной инерциальной системы (Б-ИНС) на основе распределенного множества 12 полупроводниковых акселерометров. В отличие от классических Б-ИНС предлагаемый вариант имеет более высокие точностные характеристики расчета навигационных параметров (координат и угловой ориентации).

Ключевые слова: безгироскопные инерциальные навигационные системы, распределенное множество акселерометров

Введение

Инерциальная навигационная система (ИНС), являющаяся ключевым компонентом построения интегрированных навигационных систем (ИНС & ГЛОНАСС/GPS), содержит два типа сенсоров: акселерометры и гироскопы. Достаточно привлекательной является реализация ИНС на основе одного (более простого и дешевого) типа сенсоров — акселерометров, что позволяет сократить стоимость ИНС и получить дополнительные функциональные возможности. Известно достаточно много подходов построения ИНС на основе только акселерометров (безгироскопные ИНС — Б-ИНС). Однако основным недостатком данного решения является то, что погрешности расчета основных навигационных параметров (координат и угловой ориентации) значительно превышают погрешности традиционных ИНС, реализованных с использованием гироскопов. Это в значительной степени ограничивает область применения Б-ИНС в реальных разработках. Поэтому построение дешевых Б-ИНС, имеющих точностные характеристики, соизмеримые с точностными характеристиками традиционных ИНС, является актуальной задачей. В работе предлагаются варианты реализации подобных Б-ИНС.

1. Существующие подходы к реализации безгироскопных инерциальных систем

Концепция построения ИНС на основе только акселерометров (*all-accelerometer approach* или *gyro-free approach*) была предложена более 40 лет назад. Все предложенные за это время подходы можно условно разделить на две группы.

1. Использование "эффекта Кориолисова ускорения", при котором один или несколько акселерометров вращаются (или вибрируют) по заданной траектории [1—6]. Данные акселерометры фактически эквивалентны гироскопам в классической ИНС.

2. Так называемый "прямой подход" определения углового ускорения путем установки двух или более акселерометров в фиксированное положение относительно некоторой подвижной системы координат [7—13]. В обоих подходах акселерометры также измеряют линейные ускорения, что необходимо для получения навигационного решения.

В работе [1] было впервые предложено полное навигационное решение на основе "только акселерометров". Однако данное решение имеет ограничения на значение угловой скорости. В работе [10] была также впервые предложена конфигурация, которая содержит шесть акселерометров и обеспечивает получение полного навигационного решения без каких-либо ограничений на значение угловой скорости. При этом было показано, что шесть — это минимальное число акселерометров, на основе которых может быть построена Б-ИНС, позволяющая получить полное навигационное решение. В настоящее время данная шестисенсорная модель является основой построения современных Б-ИНС. Однако и данный подход имеет серьезный недостаток по сравнению с традиционным вариантом построения ИНС на основе гироскопов: значительно более быстрый рост погрешности определения навигационных параметров.

2. Инерциальные параметры объекта и данные, снимаемые с акселерометра

На рис. 1 представлена связанная система координат (ССК), т. е. система координат, жестко связанная с твердым телом, на котором установлен акселерометр, а также параметры установки акселерометра (*Accel*) в данной системе координат:

- координаты установки акселерометра $R_{accel} = \begin{bmatrix} R_Y \\ R_Y \end{bmatrix}$
- ориентация чувствительных осей акселерометра

г

$$\theta_{accel} = \begin{bmatrix} \theta_X \\ \theta_Y \\ \theta_Z \end{bmatrix}, где \theta_X(\theta_Y, \theta_Z) - косинус угла между$$

чувствительной осью акселерометра и соответственно осью X, Y, Z CCK.

Движение объекта, с которым жестко связана CCK, относительно некоторой неподвижной системы координат (HCK) характеризуется следующими параметрами:

1. Параметры поступательного движения:

- *А* ускорение ССК относительно НСК, заданное в НСК;
- G вектор гравитации, заданный в НСК.
 2. Параметры вращательного движения:
- углы поворота ССК относительно НСК: α_X, α_Y, α_Z (угол поворота вокруг соответствующей оси);
- угловая скорость $W = [W_X, W_Y, W_Z]^T$ и ускорение $\dot{W} = [\dot{W}_X, \dot{W}_Y, \dot{W}_Z]^T$ ССК относительно НСК, заданные в ССК;
- угловая ориентация ССК относительно НСК C_{bN} . При этом, если один и тот же вектор имеет координаты в ССК и НСК как R_{iner} и R_{body} , со-ответственно, то $R_{iner} = C_{bN} \cdot R_{body}$.



НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 4, 2012 —

Если обе системы координат являются ортогональными, то выполняются следующие условия: $C_{bN}^{-1} = C_{bN}^T$, и как следствие этого $C_{bN}^T \cdot C_{bN} = I$.

Значение С_{bN} полностью определяется значениями W_X, W_Y, W_Z в соответствии со следующими выражениями:

$$\Omega(t_i) = \begin{bmatrix} 0 & -W_Z(t_i) & W_Y(t_i) \\ W_Z(t_i) & 0 & -W_X(t_i) \\ -W_Y(t_i) & W_X(t_i) & 0 \end{bmatrix};$$
$$C_{bN}(t_i) = C_{bN}(t_{i-1}) \mathbf{e}^{\Omega(t_i)\Delta t_i}, \Delta t_i = t_i - t_{i-1},$$

где $\mathbf{e}^{\Omega(t_i)\Delta t_i}$ — функция матричной экспоненты. Если для момента t_i заданы все инерциальные

параметры $A(t_i), W(t_i), \dot{W}(t_i)$, то показания акселерометра могут быть определены как

$$F_{accel,j}(t_i) = (\Theta_{accel,j} F + W \times W \times R_j + \dot{W} \times R_j), (1)$$

где *F* — "кажущееся" ускорение объекта в подвижной системе координат,

$$F = \begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{bmatrix} = C'_{bN}(A + G), \ G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 9,8 \end{bmatrix};$$

 R_i — координаты установки акселерометра j; W угловая скорость.

Выражение (1) может быть также представлено в матричном виде:

$$F_{accel,\,j} = Q_j \beta,\tag{2}$$

Г

٦

где

$$Q_{j}^{T} = \begin{bmatrix} \theta_{X,j} \\ \theta_{Y,j} \\ \theta_{Z,j} \\ R_{Yj}\theta_{Zj} - R_{Zj}\theta_{Yj} \\ R_{Zj}\theta_{Zj} - R_{Zj}\theta_{Yj} \\ R_{Zj}\theta_{Zj} - R_{Zj}\theta_{Zj} \\ -(R_{Yj}\theta_{Yj} + R_{Zj}\theta_{Zj}) \\ -(R_{Yj}\theta_{Yj} + R_{Zj}\theta_{Zj}) \\ -(R_{Yj}\theta_{Yj} + R_{Zj}\theta_{Zj}) \\ R_{Yj}\theta_{Xj} + R_{Xj}\theta_{Xj} \\ R_{Yj}\theta_{Zj} + R_{Xj}\theta_{Zj} \\ R_{Yj}\theta_{Zj} + R_{Zj}\theta_{Yj} \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} F_{X} \\ F_{Y} \\ F_{Z} \\ \dot{W}_{X} \\ \dot{W}_{Y} \\ \dot{W}_{Z} \\ W_{X}^{2} \\ W_{Y}^{2} \\ W_{X}^{2} \\ W_{X}^{2} \\ W_{X}^{2} \\ W_{X} \\ W_{Y} \\ W_{X} \\ W_{Y} \\ W_{X} \\ W_{Y} \\ W_{X} \\ W_{Y} \\ W_{Y} \\ W_{X} \\ W_{Y} \\ W_{X} \\ W_{Y} \\ W_{X} \\ W_{Y} \\ W_{Y} \\ W_{X} \\ W_{Y} \\ W_{Y}$$

Очевидно, что значение в может быть определено на основе решения системы линейных уравнений (2):

$$\beta = Q^{-1} F_{accel}.$$
 (3)

При этом матрица Q целиком и полностью определяется параметрами установки акселерометров $R_{accel}, \theta_{accel}$

3. Сравнительный анализ точностных характеристик классической ИНС и шестисенсорной (традиционной) Б-ИНС

Проведем сравнительный анализ точностных характеристик Б-ИНС и классической ИНС, реализованной с использованием гироскопов.

3.1. Анализ точностных характеристик традиционной ИНС

Как показано в работе [14], основным источником погрешностей современных ИНС являются низкочастотный (bias) и высокочастотный (noise) шумы акселерометров (b_{accel} , σ_{accel}) и гироскопов (b_{gyro} , σ_{gyro}), соответственно. Поэтому оценка точностных характеристик будет проведена с учетом данных параметров инерциальных сенсоров.

1. Высокочастотный шум сенсора (noise) о. Имеет характеристики "белого шума" и обычно задается в виде спектральной мощности: $\sigma_0 = \text{deg/sec} \sqrt{Hz}$. Если показания сенсора интегрируются *n* раз, то получается *n*-кратный интеграл "белого шума", для которого σ_{Σ} определяется из выражения

$$\sigma_{\Sigma}^{2} = \frac{\sigma^{2} 2^{n-1} t^{2n-1} \Delta t}{(2n-1)!}, \qquad (4)$$

где t — время интегрирования; Δt — дискрет интегрирования.

2. Низкочастотный шум сенсора (bias)b. Имеет характер случайного Марковского процесса (значение в момент t_i сильно коррелировано со значением в момент t_{i-1}). При аналитической оценке погрешностей величину b можно считать детерминированной, а результат ее *n*-кратного интегрирования оценивать как:

$$\sigma_{bias, \alpha} = \frac{bt^n}{n!}.$$
 (5)

С учетом выражений (4) и (5) определение угловой ориентации ПСК относительно земной системы координат путем интегрирования показаний гироскопа приводит к появлению следующей погрешности угловой ориентации:

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_{bias, \alpha} + \sigma_{noise, \alpha},$$

где

 $\sigma_{bias, \alpha} = b_{gyro}t; \ \sigma_{noise, \alpha} = \sigma_{gyro}\sqrt{t\Delta t}.$ Определение линейных ускорений, снимаемых с акселерометров, за счет компенсации вектора гравитации д приводит к появлению погрешности компенсации вектора гравитации:

$$\sigma_g = g \sigma_{\alpha}$$

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 4, 2012 -

Расчет координат путем двойного интегрирования показаний акселерометров (т. е. трансформации его погрешностей b_{accel} , σ_{accel}) приводит к следующему выражению для оценки погрешности традиционного ИНС:

> $\sigma_R(t) = \sigma_{b, R}(t) + \sigma_{noise, R}(t),$ $\sigma_{b, R} = \frac{b_{gyro}gt^3}{6} + \frac{b_{accet}t^2}{2};$

$$\sigma_{noise, R}(t) = \sqrt{\sigma_{1, R}^2 + \sigma_{2, R}^2},$$

$$\sigma_{1, R} = \sigma_{accel} \sqrt{\frac{t^3 \Delta t B_{accel}}{3}}, \ \sigma_{2, R} = g \sigma_{gyro} \sqrt{\frac{t^3 \Delta t B_{gyro}}{30}}.$$

Таким образом, итоговое выражение для оценки погрешности расчета координат на основе традиционной ИНС имеет следующий вид:

$$\sigma_R = \frac{b_{gyro}gt^3}{6} + \frac{b_{accel}t^2}{2} + \sqrt{\sigma_{accel}^2 \frac{t^3 \Delta t}{3} + g^2 \sigma_{gyro}^2 \frac{t^5 \Delta t}{30}}.$$
 (6)

3.2. Анализ точностных характеристик шестисенсорной Б-ИНС

С учетом алгоритма расчета, представленного в работе [10], определение значений угловой скорости путем интегрирования значений углового ускорения дает следующие погрешности:

$$\sigma_{gyro} = \frac{b_{accel}}{r}t + \frac{\sigma_{accel}}{r}\sqrt{t\Delta t},$$

где *r* — расстояние от центра ССК до точки установки акселерометров [10]; определение угловой ориентации путем интегрирования значений угловой скорости:

$$\sigma_{\alpha} = \frac{b_{accel}}{2r}t^2 + \frac{\sigma_{accel}}{r}\sqrt{\frac{t^3\Delta t}{3}};$$

определение линейных ускорений, снимаемых с акселерометров, за счет компенсации вектора гравитации, приводит к появлению погрешности

$$\sigma_g = g \sigma_{\alpha}$$
.

С учетом расчета координат путем двойного интегрирования значений линейных ускорений, имеем:

$$\sigma_R(t) = \sigma_{b, R}(t) + \sigma_{noise, R}(t)$$

где

где

$$\sigma_{noise, R}(t) = \sqrt{\sigma_{1, R}^2 + \sigma_{2, R}^2}, \quad \sigma_{1, R} = \sigma_{accel} \sqrt{\frac{t^3 \Delta t}{3}},$$
$$\sigma_{2, R} = g \frac{\sigma_{accel}}{r} \sqrt{\frac{t^7 \Delta t}{630}}.$$

 $\sigma_{b, R} = \frac{b_{accel}gt^4}{r \cdot 24} + \frac{b_{accel}t^2}{2};$

В итоге выражение для оценки погрешности шестисенсорной Б-ИНС имеет следующий вид:

$$\sigma_R = b_{accel} \frac{gt^4}{r \cdot 24} + \frac{t^2}{2} + \sigma_{accel} \sqrt{\frac{t^3 \Delta t}{3} + \frac{g^2}{r^2} \cdot \frac{t^7 \Delta t}{630}}.$$
 (7)

Сравнение полученных выражений (7) с (6) показало, что существующая шестисенсорная модель А-ИНС значительно проигрывает по своим точностным характеристикам традиционной ИНС.

4. Реализация Б-ИНС на основе 12-сенсорной модели

4.1. Расчет значений угловых скоростей

Ключевым вопросом построения Б-ИНС является определение значений угловых скоростей W_X , W_Y , W_Z , которые в традиционной ИНС определяются с помощью гироскопов. Из выражения (2) можно записать:

$$W_X^2 r = \frac{\sum_{j=1}^{12} q_{7,j}^- A_j}{\det(Q)}; \quad W_X W_Y r = \frac{\sum_{j=1}^{12} q_{10,j}^- A_j}{\det(Q)}; \\ W_X W_Z r = \frac{\sum_{j=1}^{12} q_{11,j}^- A_j}{\det(Q)}, \quad (8)$$

где $q_{i,j}^-$ — элементы матрицы Q^{-1} (обратной Q), det(Q) — детерминант матрицы Q.

При этом последовательность расчета составляющих угловой скорости \vec{W} будет следующей:

$$W_X = \sqrt{W_X^2 r/r}; \quad W_Y = W_X W_Y r/W_X r;$$
$$W_Z = W_X W_Z r/W_X r. \tag{9}$$

Для оценки погрешностей вычисления W_X , W_Y , W_Z на основе (9) выполним дифференцирование правой и левой частей выражений (8):

$$2W_{X}\Delta W_{X}r = \frac{\sum_{j=1}^{12} q_{\overline{1},j}\Delta A_{j}}{\det(Q)};$$

$$\Delta W_{X}W_{Y}r + W_{X}\Delta W_{Y}r = \frac{\sum_{j=1}^{12} q_{\overline{1}0,j}\Delta A_{j}}{\det(Q)};$$

$$\Delta W_{X}W_{Z}r + W_{X}\Delta W_{Z}r = \frac{\sum_{j=1}^{12} q_{\overline{1}1,j}\Delta A_{j}}{\det(Q)}.$$
(10)

– НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 4, 2012 —

Преобразуя (10), получим

$$\Delta W_{X} = \frac{\sum_{i=1}^{12} q_{7,i} \Delta A_{i}}{2 W_{X} r \det(Q)};$$

$$\Delta W_{Y} = \frac{\sum_{i=1}^{12} \left(2 q_{10,i}^{-} - \frac{W_{Y}}{W_{X}} q_{7,i}^{-}\right) \Delta A_{i}}{2 W_{X} r \det(Q)};$$

$$\Delta W_{Z} = \frac{\sum_{i=1}^{12} \left(2 q_{11,i}^{-} - \frac{W_{Z}}{W_{X}} q_{7,i}^{-}\right) \Delta A_{i}}{2 W_{X} r \det(Q)}.$$
(11)

Принимая $|W_Y| \leq |W_X|, |W_Z| \leq |W_X|$ для (11), получим итоговые выражения для оценки погрешностей расчета W_X, W_Y, W_Z :

$$\Delta W_{X} = \frac{\sum_{i=1}^{12} q_{\overline{7},i} \Delta A_{i}}{2 W_{X} r \det(Q)};$$

$$\Delta W_{Y} = \frac{\sum_{i=1}^{12} (2 q_{\overline{10},i} - q_{\overline{7},i}) \Delta A_{i}}{2 W_{X} r \det(Q)};$$

$$\Delta W_{Z} = \frac{\sum_{i=1}^{12} (2 q_{\overline{11},i} - q_{\overline{7},i}) \Delta A_{i}}{2 W_{X} r \det(Q)}.$$
(12)

4.2. Вариант реализации Б-ИНС

Как следует из выражений (11), (12), оценка точностных характеристик Б-ИНС в значительной степени зависит от величины det(Q), которая, в свою очередь, определяется выбором координат расположения акселерометров и ориентации его чувствительных осей.

В табл. 1, 2 представлены координаты установки акселерометров и ориентации их чувствительных осей для предлагаемой 12-сенсорной модели Б-ИНС, а также графическая интерпретация данной модели (рис. 2).

Достоинства предложенной модели:

- симметричность (используются три симметричные платы с установленными на них двухосевыми акселерометрами). При этом каждая плата может быть изготовлена, протестирована и откалибрована отдельно, что значительно упрощает изготовление данного модуля;
- конструктивная простота; данная модель при ее конструктивной реализации значительно проще традиционной шестисенсорной модели Б-ИНС.

4.3. Калибрация Б-ИНС

При изготовлении и сборке Б-ИНС реальное расположение акселерометров и ориентация их чувствительных осей будут отличаться от идеальных значений, представленных в табл. 1, 2. Для учета данных значений используется процедура начальной калибрации, по своей сути аналогичная процедуре калибрации, представленной ранее в работе [15] для шестисенсорной Б-ИНС. Суть данной процедуры состоит в последовательном выполнении двух этапов:

1) учет реальной ориентации чувствительных осей акселерометров (см. табл. 2) путем последовательной установки Б-ИНС каждой из своих шести граней на горизонтированную (относительно вектора гравитации) плоскость;

2) учет координат установки акселерометров (см. табл. 1) за счет определения взаимного расположения акселерометров. Для этого Б-ИНС последовательно устанавливается каждой из своих шести граней на горизонтированную поверхность, которая вращается с заданной (эталонной) угловой скоростью.

Значения, снятые с акселерометров при выполнении обоих калибровочных этапов, обрабатываются специальной процедурой калибрации, которая позволяет определить (и учитывать в дальнейшем) значения параметров, представленных в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Координаты установки акселерометров

R _{accel}	Acc 1	Acc 2	Acc 3	Acc 4	Acc 5	Acc 6	Acc 7	Acc 8	Acc 9	Acc 10	Acc 11	Acc 12
X Y Z	0 r 0	0 r 0	r 0 0	r 0 0	$\begin{array}{c} 0\\ -r\\ 0\end{array}$	$\begin{array}{c} 0\\ -r\\ 0\end{array}$	-r 0 0	-r 0 0	$\begin{array}{c} 0\\ 0\\ -r \end{array}$	$\begin{array}{c} 0\\ 0\\ -r \end{array}$	0 0 <i>r</i>	0 0 <i>r</i>

Таблица 2

Ориентация чувствительных осей акселерометров

θ_{accel}	Acc 1	Acc 2	Acc 3	Acc 4	Acc 5	Acc 6	Acc 7	Acc 8	Acc 9	Acc 10	Acc 11	Acc 12
X Y Z	0 0 1	$ \begin{array}{c} 0 \\ -1 \\ 0 \end{array} $	$0 \\ 0 \\ -1$	$-1 \\ 0 \\ 0$	$-1 \\ 0 \\ 0$	0 1 0	$\begin{array}{c} 0 \\ -1 \\ 0 \end{array}$	1 0 0	1 0 0	0 0 1	0 1 0	$0 \\ 0 \\ -1$





4.4. Анализ точностных характеристик предложенной Б-ИНС

Для предложенной модели реализация виртуального гироскопа имеет следующие оценки погрешности:

gyro bias:
$$b_{gyro} = \frac{b_{accel}}{2wr}$$
, gyro noise: $b_{gyro} = \frac{\sigma_{accel}}{2wr}$,

где *w* — угловая скорость вращения объекта, на котором установлена данная ИНС.

При этом погрешность угловой ориентации будет оцениваться как

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_{b, \alpha} + \sigma_{noise, \alpha},$$

где
$$\sigma_{b, \alpha} = tb_{gyro_GF} = \frac{tb_{accel}}{2wr}, \sigma_{noise, \alpha} = \sigma_{gyro_GF} \sqrt{t\Delta t} =$$

= $\frac{\sigma_{accel} \sqrt{t\Delta t}}{2wr}.$

Выполняя преобразования, аналогичные приведенным в разд. 3.2, получим итоговое выражение для оценки погрешности расчета координат на основе предложенной 12-сенсорной модели Б-ИНС:

$$\sigma_{R} = b_{accel} \left(\frac{gt^{3}}{12wr} + \frac{t^{2}}{2} \right) + \sigma_{accel} \sqrt{\frac{t^{3} \Delta t}{3} + \frac{g^{2}}{(2wr)^{2}} \frac{t^{5} \Delta t}{30}}.$$
 (13)

Сравнение выражений (13) и (6) показывает, что погрешность Б-ИНС сопоставима с погрешностью традиционной (на основе гироскопов) ИНС (см. разд. 3.1).

Заключение

Предложенная 12-сенсорная Б-ИНС по своим точностным характеристикам практически эквивалентна традиционной ИНС. Вместе с тем, реализация данного варианта Б-ИНС, содержащего только акселерометры, является значительно более простой и технологичной при использовании в составе полупроводниковой микросистемы.

Список литературы

1. **Krishnan V.** Measurement of Angular Velocity and Linear Acceleration Using Linear Accelerometers // Journal of the Franklin Institute. Oct. 1965. 280:4.

2. **Merhav S. J.** A Nongyroscopic Inertial Measurement Unit // J. Guidance. May—June 1982. Vol. 5, N 3.

3. Klass P. J. Inertial Sensor Utilizes Coriolis Effect // Aviation Week and Space Technology. 1983. Oct. 10.

4. Norling B. Accelerometers: Current and Emerging Technology // Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Surveying and Remote Sensing, Banff, Alberta, Canada. 1990. September 10-13.

5. **Merhav S.** Aerospace Sensor Systems and Applications. New York: Springer-Verlag, 1996. (Chap. 6, Coriolis Angular Rate Sensors).

6. **Sun G., Gu Q.** Accelerometer Based North Finding System // Proc. of IEEE Position, Location, and Navigation Symposium (PLANS). March 2000.

7. Schuler A. R., Grammatikos A., Fegley K. A. Measuring Rotational Motion with Linear Accelerometers // IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems. May 1967. Vol. AES-3, N 3.

8. **Padgaonkar A. J., Krieger K. W., King A. I.** Measurement of Angular Acceleration of a Rigid Body Using Linear Accelerometers // Journal of Applied Mechanics. 1975. September.

9. Monaco S. J., Audley D. R., Okubo S., Schuler A. R. Tuned Vertical Indicating System // Journal of Guidance and Control. November — December 1978. Vol. 1, N 6.

10. Chen J., Lee S., DeBra D. Gyroscope Free Strapdown Inertial measurement Unit by Six Linear Accelerometers // Journal of Guidance, Control and Dynamic. March—April 1994. Vol. 17, N 2.

11. Soloviev A. N., Mostov K. S., Koo T. J. Initial Attitude Determination and Correction of Gyro-Free INS Angular Orientation Parameters // IEEE Intelligent Transportation System: Conference Proceedings. November 1997.

12. **Mostov K. S.** Design of Accelerometer-Based-Gyro-FREE Navigation Systems, Ph. D. Dissertation. University of California, Berkeley, 2000.

13. **Tan C., Park S., Mostov K., Varaiya P.** Design of Gyroscope-Free Navigation Systems // IEEE Intelligent Transportation Systems. Conference Proceedings. August 2001.

14. Soloviev A., Frank v. Graas. Review of Potential Applications of Low-Cost GPS/INS for General Aviation // Proceedings of ION GPS. 2002.

15. **Chao-Yu Hung, Sou-Chen Lee.** A Calibration Method for Six-Accelerometer INS // International Journal of Control, Automation, and Systems. October 2006. Vol. 4, N 5. P. 615–623.

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

ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЬЕЗОАКТЮАТОРОВ НАНО-И МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ И КОДОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Поступила в редакцию 05.12.2011

Получены механические и регулировочные характеристики многослойного пьезоактюатора нано- и микроперемещений с параллельным и кодовым управлением. Определены статические и динамические характеристики простых и многослойных пьезоактюаторов нано- и микроперемещений при продольном и поперечном пьезоэффектах с параллельным и кодовым управлением.

Ключевые слова: простые и многослойные пьезоактюаторы, нано- и микроперемещения, деформация, механические и регулировочные характеристики, параллельное и кодовое управление

Использование пьезоактюаторов (пьезодвигателей) для нано- и микроперемещений перспективно в нанотехнологии, нанобиологии, микроэлектронике и астрономии для прецизионного совмещения, компенсации температурных и гравитационных деформаций. Увеличение диапазона перемещения до десятков микрометров достигается использованием многослойного (составного, пакетного, блочного) пьезоактюатора (ПА), являющегося одним из наиболее перспективных электромагнитоупругих двигателей нано- и микроперемещений, который обеспечивает нанометрическую точность в диапазоне десятков микрометров и полосу пропускания порядка 100 Гц [1—6].

В системе управления нано- и микрометрической деформацией многослойного ПА предъявляются жесткие требования к диапазону перемещений, жесткости и точности ПА нано- и микроперемещений. Актуальным в настоящее время является обеспечение точности систем управления деформацией многослойного ПА нано- и микроперемещений при параллельном и кодовом управлении, которое требует определения соответствующих механических характеристик ПА. Применение многослойного ПА с кодовым управлением позволяет эффективно использовать электромеханическое цифроаналоговое преобразование для нано- и микроперемещений, пропорциональных управляющему коду.

Пьезоактюаторы нано- и микроперемещений обеспечивают пространственное прецизионное по-

зиционирование объектов в нанотехнологическом оборудовании и микроэлектронике. ПА для приводов нано- и микроперемещений имеют:

- диапазон перемещения от нескольких нанометров до десятков микрометров;
- чувствительность менее 1 нм/В;
- нагрузочную способность до 1000 Н;
- мощность на выходном валу до 100 Вт;
- полосу пропускания порядка нескольких десятков герц;
- диапазон перемещений от единиц нанометров до десятков микрометров.

Применение простых и многослойных ПА для нано- и микроманипуляторов с пьезоприводами решает задачи точного совмещения в микроэлектронике, нанотехнологии, астрономии и адаптивной оптике [1—6]. В отличие от простого многослойный ПА имеет в статике без нагрузки увеличенный в n раз диапазон перемещения, что соответствует n — числу пьезослоев ПА.

Конструктивно многослойный ПА в зависимости от технологии изготовления может быть выполнен в виде:

- составного пьезопреобразователя из отдельных упруго поджатых пьезопластин;
- пакетного или блочного пьезопреобразователя из пьезопластин, спеченных с применением серебряной пасты;
- составного пьезопреобразователя из пьезопакетов с упругим армированием;
- склеенного многослойного пьезопреобразователя из пьезопластин;
- многослойного пьезопреобразователя со слоями, нанесенными по толстопленочной или тонкопленочной технологиям.

Так как предельные разрушающие механические напряжения сжатия в пьезокерамике промышленных марок ЦТС или РZТ в среднем в 10 раз превышают предельные разрушающие напряжения растяжения, то для повышения прочности целесообразно осуществлять предварительное поджатие многослойного ПА с помощью пружины или мембраны. Усилие предварительного поджатия должно превышать максимальную растягивающую нагрузку, что обеспечивает гарантированное рабочее сжатие многослойного ПА [4, 5]. Многослойный ПА нано- и микроперемещений собирается следующим образом: предварительно сжатый для выбора зазоров межлу пьезопластинами многослойный пьезопреобразователь стягивается предварительно деформированным упругим элементом (шпилькой, пружиной или мембраной). Удельное усилие сжатия составляет порядка 5 МПа. При этом усилии выбираются зазоры и зависимость деформации от внешнего усилия принимает линейный характер.

Основным параметром внешней нагрузки ПА является ее жесткость нагрузки, т. е. отношение силы упругой реакции нагрузки к ее деформации.

В зависимости от жесткости нагрузки выбирают конструктивные параметры простого ПА при продольном и поперечном пьезоэффектах (рис. 1, *a*, *б*). Для практического использования многослойных ПА необходимо знание их основных характеристик: пьезомодулей, упругих податливостей, пределов



Рис. 1. Простой пьезоактюатор нано- и микроперемещений: кинематические схемы при продольном (*a*) и поперечном (*б*) пьезоэффектах, механические характеристики при продольном (*в*) и поперечном (*г*) пьезоэффектах

временного сопротивления на сжатие. Статические характеристики ПА определяются с учетом уравнения обратного пьезоэффекта и механической нагрузки [4—6]. ПА нано- и микроперемещений работает на основе обратного пьезоэффекта: перемещение достигается в результате деформации ПА при приложении внешнего электрического напряжения.

Рассмотрим механические и регулировочные характеристики простых и многослойных ПА. В классическом электроприводе статические характеристики электродвигателя в установившихся режимах работы делятся на механические $\omega(M)$ и регулировочные $\omega(U)$, где ω — угловая скорость вала; M момент нагрузки, U — управляющее напряжение. Аналогично для ПА нано- и микроперемещений статические характеристики вида S(T) или $\Delta l(F)$ будем называть механическими характеристиками, где S — относительная деформаця; T — механическое напряжение; Δl — относительное перемещение; F — внешняя сила, а характеристики вида S(E) или $\Delta l(U)$ — регулировочными характеристиками, где E — напряженность электрического поля.

Механические и регулировочные характеристики измеряли на прессе УММ-5 в диапазоне рабочих нагрузок при механических напряжениях в ПА до 50 МПа.

Статическая механическая характеристика ПА — уравнение обратного пьезоэффекта [3—6] при продольном пьезоэффекте и управлении по напряжению имеет вид

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

где $S_3 = \xi/l$ — относительная деформация пьезоактюатора по оси 3 (см. рис. 1, *a*), где ξ — перемещение, $l = n\delta$ — длина многослойного ПА, *n* — число пьезопластин; d_{33} — пьезомодуль; $E_3 = U/\delta$ напряженность электрического поля по оси 3 (U напряжение на электродах ПА); $s_{33}^E = 1/E_{33u}$ — упругая податливость по оси 3 при E = const и управлении от источника напряжения (E_{33u} — модуль Юнга пьезоэлектрической керамики при E = const); $T_3 = -F/S_0$ — механическое напряжение в ПА по оси 3 (F — внешняя сила, S_0 — площадь сечения ПА).

В статике максимальное перемещение Δl_{3max} по оси 3 простого ПА при F = 0 описывается зависимостью

$$\Delta l_{3\max} = d_{33}U.$$

Соответственно максимальное рабочее усилие $F_{3\max}$ по оси 3 простого ПА при $\Delta l = 0$ определяется выражением

$$F_{3\max} = \Delta l_{3\max} S_0 / \left(s_{33}^E \delta \right) = d_{33} U S_0 / \left(s_{33}^E \delta \right).$$

Рассмотрим простой ПА (пьезопластину) при продольном пьезоэффекте (рис. 1, *a*) с пьезомодулем $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$ м/В, напряжением питания U =

= 300 В, толщной пьезопластины $\delta = 0.6 \cdot 10^{-3}$ м, упругой податливостью $s_{33}^E = 1.25 \cdot 10^{-11}$ м²/H, радиусом $R_{\Pi} = 7.5 \cdot 10^{-3}$ м, площадью сечения $S_0 =$ = 1.77 $\cdot 10^{-4}$ м². При таких данных имеем: $\Delta l_{3 \text{ max}} =$ = 120 нм, $F_{3 \text{ max}} = 2.83$ кН и статические механические характеристики вида $S_3(T_3)$, приведенные на рис. 1, *в* при $E_3 = 600$ (1), 400 (2), 200 кВ/м (3).

Из равенства (1) получаем уравнение статической механической характеристики простого ПА при продольном пьезоэффекте с управлением по напряжению в виде

$$\Delta l = d_{33}U - s_{33}^E F \delta / S_0 = d_{33}U - F / C_{33}$$

или

$$\Delta l = \Delta l_{3\max}(1 - F/F_{3\max}),$$

где δ — толщина ПА; $C_{33} = S_0/(s_{33}^E\delta)$ — его жесткость. Соответственно, при U = const получим уравнение $\Delta l(F)$ механической характеристики, а при F = const — уравнение $\Delta l(U)$ регулировочной характеристики ПА.

Статическая механическая характеристика ПА — уравнение обратного пьезоэффекта [3—6] при поперечном пьезоэффекте с управлением по напряжению — имеет вид

$$S_1 = d_{31}E_3 + s_{11}^E T_1.$$
 (2)

Для нахождения в статике максимального перемещения $\Delta l_{1 \text{ max}}$ по оси 1 (см. рис. 1, *г*) простого ПА при *F* = 0 воспользуемся зависимостью

$$\Delta l_{1\max} = d_{31} U h / \delta.$$

Максимальное рабочее усилие по оси 1 простого ПА при $\Delta l = 0$ найдем из выражения

$$F_{1\max} = d_{31} U S_0 / \left(s_{11}^E \delta \right).$$

Рассмотрим простой ПА при поперечном пьезоэффекте (см. рис. 1, δ), когда напряженность электрического поля направлена по оси 3, а деформация — по оси 1, с пьезомодулем $d_{31} = 2 \cdot 10^{-10}$ м, напряжением питания U = 300 В, толщиной пьезопластины $\delta = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м, упругой податливостью $s_{11}^E = 1,15 \cdot 10^{-11}$ м²/H, высотой $h = 3 \cdot 10^{-2}$ м, шириной $b = 1 \cdot 10^{-2}$ м, площадью сечения $S_0 =$ $= 6 \cdot 10^{-6}$ м. При таких данных имеем (см. рис. 1, ϵ): $\Delta l_{1max} = 3$ мкм; $F_{1max} = 52$ Н и механические характеристики вида $\Delta l(F)$, приведенные на рис. 1, ϵ при U = 300 (1), 200 (2), 100 (3) В. Отклонение расчетных значений от экспериментальных не превышает 5 %.

Из равенства (2) получаем уравнение статической механической характеристики простого ПА при поперечном пьезоэффекте с управлением по напряжению в виде

$$\Delta l = d_{31}Uh/\delta - s_{11}^E Fh/S_0 = d_{31}Uh/\delta - F/C_{11}$$

или

$$\Delta l = \Delta l_{1\max}(1 - F/F_{1\max}),$$

где h — длина простого ПА (пьезопластины); $C_{11} = C_{11} (E_{11})$

 $= S_0 / (s_{11}^E h) -$ его жесткость.

Рассмотрим механические и регулировочные характеристики многослойных ПА с параллельным управлением по напряжению при продольном и поперечном пьезоэффектах.

Из диаграмм сжатия в области рабочих усилий для ПА разных конструктивных исполнений следует, что независимо от конструкции и вида управления многослойного ПА для увеличения его жесткости необходимо предварительное поджатие с удельным давлением, большим механического напряжения выбора зазоров и смятия микронеровностей.

В статике максимальное перемещение по оси 3 многослойного ПА (рис. 2, *a*) при F = 0 описывается зависимостью $\Delta l_{3\max} = d_{33}nU$, а его максимальное рабочее усилие по оси 3 при $\Delta l = 0$ имеет вид

$$F_{3\max} = \Delta l_{3\max} S_0 / \left(s_{33}^E l \right) = d_{33} U S_0 / \left(s_{33}^E \delta \right).$$

Следовательно, из равенства (1) уравнение статической механической характеристики многослойного ПА при продольном пьезоэффекте с параллельным управлением по напряжению получаем в виде

$$\Delta l = d_{33}nU - s_{33}^{E}Fl/S_{0} = d_{33}nU - F/C_{33}$$
(3)

или

$$\Delta l = \Delta l_{3\max}(1 - F/F_{3\max})$$

где $F_{3\max} = d_{33}US_0/(s_{33}^E\delta); l = n\delta$ — длина многослойного ПА (*n* — число его пьезопластин); $C_{33} = S_0/(s_{33}^El)$ — жесткость ПА. Таким образом, при U == const имеем уравнение $\Delta l(F)$ механической характеристики, а при F = const — уравнение $\Delta l(U)$ регулировочной этого ПА.

Рассмотрим многослойный ПА, спеченный из пьезопластин, при продольном пьезоэффекте (рис. 2, *a*) с пьезомодулем $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$ м/В, напряжением питания U = 300 В, упругой податли-



Рис. 2. Многослойный пьезоактюатор нано- и микроперемещений при параллельном управлении: кинематические схемы при продольном (a), поперечном (δ) пьезоэффектах, механические характеристики (s) при продольном пьезоэффекте, регулировочные характеристики (z) при продольном пьезоэффекте

востью $s_{33}^E = 3 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{H}$, толщиной пьезопластин $\delta = 0.6 \cdot 10^{-3}$ м, диаметром пьезопластин $D = 15 \cdot 10^{-3}$ м, числом пьезопластин n = 50 при параллельном управлении, когда пьезопластины механически соединены последовательно, а электрически — параллельно. Получаем механическую характеристику *1* многослойного ПА (рис. 2, *в*) с $\Delta l_{3\text{max}} = 6$ мкм, $F_{3\text{max}} = 1.18$ кH.

Уравнение обратного пьезоэффекта при T = const позволяет рассчитать регулировочные характеристики (рис. 2, *г*) многослойного ПА с параллельным управлением по напряжению при продольном пьезоэффекте, выполненного в виде составного пьезопреобразователя с пьезомодулем $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$ м/В и упругой податливостью $s_{33}^E = 7.5 \cdot 10^{-11}$ м²/H, составленного из восьми пьезопакетов П-3, при механических напряжениях $T_3 = 0$ (*1*), 6,7 (*2*), 13,4 (*3*) МПа.

Аналогично из равенства (2) получаем уравнение статической механической характеристики многослойного ПА при поперечном пьезоэффекте с параллельным управлением по напряжению в виде

$$\Delta l = d_{31} U l / \delta - s_{11}^{E} F l / S_0 = d_{31} U l / \delta - F / C_{11}, \quad (4)$$

где l = nh — длина многослойного ПА (h — длина пьезопластины); $C_{11} = S_0/(s_{11}^E l)$ — его жесткость, или в виде

$$\Delta l = \Delta l_{1\max}(1 - F/F_{1\max}),$$

где $\Delta l_{1\text{max}} = d_{31} U n h / \delta$, $F_{1\text{max}} = d_{31} U S_0 / (s_{11}^E \delta)$.

Из уравнения (4) механической характеристики многослойного ПА следует, что наряду с пьезомодулем одной из важнейших физических характеристик ПА является упругая податливость. Для увеличения жесткости механической характеристики многослойного ПА необходимо выбирать его конструктивное исполнение с минимальной упругой податливостью.

Основным параметром внешней нагрузки ПА является ее жесткость, в зависимости от которой выбираются его конструктивные параметры. Следовательно, с учетом формулы (3) выражение для перемещения многослойного ПА (рис. 3, *a*) при продольном пьезоэффекте с параллельным управлением по напряжению имеет вид

$$\xi = d_{33}nU - F/C_{33};$$
(5)
= $F_0 + C_a\xi + C_e\xi; \quad F_0 = \sigma_a S_0,$

где $C_{33} = S_0 / (s_{33}^E l)$ — жесткость многослойного ПА; F — внешняя сила; F_0 — сила первоначального поджатия упругим элементом; σ_a — механическое напря-

F



Рис. 3. Армированный многослойный пьезоактюатор нано- и микроперемещений с упругой нагрузкой и параллельным управлением: кинематические схемы при продольном (*a*), поперечном (δ) пьезоэффектах, регулировочные характеристики (*в*) при продольном пьезоэффекте

жение первоначального армирования в ПА; C_a — жесткость армирующего элемента; C_e — жесткость нагрузки.

Отсюда выражение для регулировочной характеристики — перемещения армированного многослойного ПА при продольном пьезоэффекте и параллельном управлении по напряжению — получаем в виде

$$\xi = \frac{d_{33}nU - \sigma_a l s_{33}^E}{1 + (C_a + C_e)/C_{33}} = \frac{l(d_{33}E_3 - \sigma_a s_{33}^E)}{1 + (C_a + C_e)/C_{33}}.$$

Так как механическое напряжение первоначального армирования для каждого образца ПА имеет определенное постоянное значение, то его перемещение ξ в зависимости от первоначального армирования получает постоянное смещение, не зависящее от подаваемого на ПА электрического напряжения. Следовательно, уравнение регулировочной характеристики (рис. 3, *в*) многослойного ПА при продольном пьезоэффекте под действием внешней нагрузки можно представить в виде

$$\Delta l = \frac{\Delta l_{3\max}}{1 + (C_a + C_e)C_{33}},$$
(6)

где $\Delta I_{3\max} = d_{33}nU$ — амплитуда перемещения многослойного ПА до армирования (U — амплитуда напряжения на его электродах).

Регулировочные характеристики (рис. 3, *в*) приведены для склеенного из пьезопластин ПА с параллельным управлением по напряжению с пьезомодулем $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$ м/В, напряжением питания U = 300 В, числом пьезопластин n = 25 при $C_a + C_e = 0$ (прямая 1) и $C_a + C_e = 0.2C_{33}$ (прямая 2).

Аналогично с учетом формулы (4) получаем выражение для регулировочной характеристики — перемещения армированного многослойного ПА при поперечном пьезоэффекте (рис. 3, *б*) и параллельном управлении по напряжению в виде

$$\xi = \frac{d_{31}(l/\delta)U - \sigma_a l s_{11}^E}{1 + (C_a + C_e)/C_{11}} = \frac{l(d_{31}E_3 - \sigma_a s_{11}^E)}{1 + (C_a + C_e)/C_{11}},$$

где $C_{11} = S_0 / (s_{11}^E l)$ — жесткость этого ПА.

Регулировочную характеристику армированного многослойного пьезодвигателя при поперечном пьезоэффекте под действием внешней нагрузки можно представить в виде

$$\Delta l = \frac{\Delta l_{1\,\text{max}}}{1 + (C_a + C_e)/C_{11}},\tag{7}$$

где $\Delta l_{1 \max} = d_{31}(l/\delta) U.$

Выражения (3)—(7) соответствуют статическим механическим и регулировочным характеристикам многослойных ПА и позволяют выбирать их параметры в зависимости от внешней нагрузки на ПА в нано- и микроманипуляторах с пьезоприводами.

Диапазон перемещения ПА пропорционален пьезомодулю и напряжению питания. Для эффективного использования рабочего диапазона перемещения при упругоинерционной нагрузке выбираем суммарную жесткость нагрузки в пределах $0 < C_a + C_e < 0.1 C_{33(11)}$. Увеличение жесткости нагрузки приводит к уменьшению постоянной времени $T_{33(11)}$.

Расчетные характеристики многослойных ПА относительно экспериментальных имеют погрешность 5 %.

В системе автоматического управления нано- и микроманипуляторами с цифроаналоговым преобразованием (ЦАП) [6] используется многослойный секционный ПА при продольном пьезоэффекте с кодовым управлением секциями. Многослойный ПА делится на N секций с числом n_k пьезопластин в k-й секции. Секции механически соединены последовательно и изолированы. Соответственно пьезопластины (пьезослои) в каждой секции соединены электрически параллельно, а механически последовательно.

Рассмотрим кодовое управление с электромеханическим ЦАП пьезоэлектрическими многослойными секционными ПА при продольном и поперечном пьезоэффектах, обеспечивающее нанои микроперемещения, пропорциональные управляющему коду. Проведем моделирование статических и динамических характеристик многослойного секционного ПА как электромеханической системы с сосредоточенными параметрами при малом сопротивлении $R \rightarrow 0$.

При продольном пьезоэффекте получим: число пьезопластин в секции $n_k = 2^{k-1}$; длина *k*-й секции $l_k = 2^{k-1}\delta$, где k = 1, 2, ..., N (N - число секций).

Общая длина многослойного секционного ПА (рис. 4, *a*)

$$l = \sum_{k=1}^{N} l_k = (2^N - 1)\delta.$$

Максимальное перемещение многослойного секционного ПА при продольном пьезоэффекте в статике имеет вид

$$\Delta l_{\max} = d_{33}(2^N - 1)U = d_{33}nU,$$

где $n = 2^N - 1$ — число пьезопластин в многослойном секционном ПА.

Соответствующее перемещение многослойного секционного ПА при продольном пьезоэффекте

в статике при подаче на вход двоичного кода составляет:

$$\Delta l = \sum_{k=1}^{N} a_k \Delta l_k,$$

где $a_k = 0$; 1 — разряды двоичного кода. Следовательно, получим:

$$\Delta l = \sum_{k=1}^{N} a_k d_{33} 2^{k-1} U = d_{33} \left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1} \right) U.$$

Рассмотрим механические и регулировочные характеристики многослойных ПА с кодовым управлением при продольном пьезоэффекте. В этом случае суммарная деформация многослойного ПА складывается из деформаций отдельных секций пьезопластин при подаче на них напряжения и деформации всего многослойного ПА под воздействием внешней силы. Из равенства (3) получаем уравнение статической механической характеристики (рис. 4, *в*) многослойного ПА при продольном пьезоэффекте с кодовым управлением по напряжению в виде

$$\Delta l = d_{33} \left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1} \right) U - s_{33}^E Fl/S_0 =$$

= $d_{33} \left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1} \right) U - F/C_{33},$ (8)

где $C_{33} = S_0 / (s_{33}^E l),$ или в виде

$$\Delta l = \Delta l_{3\max}(1 - F/F_{3\max}),$$

где
$$\Delta I_{3\max} = d_{33} \left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1} \right) U;$$

 $F_{3\max} = d_{33} \left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1} \right) US_0 / (s_{33}^E l)$

или

$$\Delta I_{3\max} = d_{33}n_s U; \quad F_{3\max} = d_{33}n_s U S_0 / \left(s_{33}^E l \right)$$

(здесь $n_s = \sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}$ — число пьезослоев многослойного ПА, подключенных к источнику напряжения).

Механические характеристики (рис. 4, *в*) приведены для склеенного из пьезопластин многослойного секционного ПА при продольном пьезоэффекте с пьезомодулем $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$ м/В, напряжением питания U = 300 В, упругой податливостью $s_{33}^E = 4 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{H}$, с пьезопластинами толщиной $\delta = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м, диаметром $D = 15 \cdot 10^{-3}$ м, числом пьезопластин n = 15, с числом секций N = 4 с кодовым управлением при $a_1 = 1$, $a_2 = 1$, $a_3 = 1$, $a_4 = 1$ (прямая I); $a_1 = 0$, $a_2 = 1$, $a_3 = 0$, $a_4 = 1$ (прямая 2) и $a_1 = 1$, $a_2 = 0$, $a_3 = 1$, $a_4 = 0$ (прямая 3).

Из выражения (6) регулировочную характеристику — перемещение в статике многослойного сек-



Рис. 4. Многослойный секционный пьезоактюатор нано- и микроперемещений с кодовым управлением: кинематические схемы при продольном (a), поперечном (δ) пьезоэффектах, механические характеристики (a) при продольном пьезоэффекте ционного ПА (рис. 5, *a*) — при продольном пьезоэффекте и упругой нагрузке получим в виде

$$\Delta I = \frac{d_{33} \left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1} \right) U}{1 + (C_a + C_e) / C_{33}}.$$
(9)

Секционный ПА (см. рис. 4, δ) при поперечном пьезоэффекте выполняют в виде монолитного ПА с раздельными секционными электродами или в виде многослойного секционного ПА с секциями длиной $l_k = 2^{k-1}l_1$, где k = 1, 2, ..., N. Длина секционного ПА при поперечном пьезо-

Длина секционного ПА при поперечном пьезоэффекте

$$l = \sum_{k=1}^{N} l_{k} = (2^{N} - 1)l_{1}$$



Рис. 5. Армированный многослойный секционный пьезоактюатор нано- и микроперемещений с упругой нагрузкой с кодовым управлением при продольном (a), поперечном (δ) пьезоэффектах Перемещение секционного ПА (см. рис. 4, δ) при поперечном пьезоэффекте в статике при подаче напряжения на k-ю секцию ПА

$$\Delta l_k = d_{31} 2^{k-1} l_1 U/\delta.$$

Максимальное перемещение секционного ПА при поперечном пьезоэффекте в статике имеет вид

$$\Delta l_{\rm max} = d_{31}(2^N - 1)l_1 U/\delta.$$

Перемещение секционного ПА при поперечном пьезоэффекте в статике при подаче на вход двоичного кода определяется выражением

$$\Delta l = (d_{31}l_1/\delta) \left(\sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1}\right) U.$$

Рассмотрим механические и регулировочные характеристики многослойных ПА с кодовым управлением при поперечном пьезоэффекте. В этом случае суммарная деформация многослойного секционного ПА равна сумме деформаций его отдельных секций при подаче на них напряжения и его общей деформации под воздействием внешней силы.

Уравнение статической механической характеристики многослойного секционного ПА при поперечном пьезоэффекте с кодовым управлением по напряжению получим из равенства (4):

$$\Delta l = (d_{31}l_1/\delta) \left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1} \right) U - s_{11}^E Fl/S_0 = = (d_{31}l_1/\delta) \left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1} \right) U - F/C_{11},$$
(10)

где $C_{11} = S_0 / (s_{11}^E l),$ или в виде

$$\Delta l = \Delta l_{1\max} (1 - F/F_{1\max}),$$

где $\Delta l_{1 \max} = (d_{31}l_1/\delta) \left[\sum_{k=1}^{\infty} a_k 2^{k} - 1 \right] U; F_{1 \max} =$

$$= (d_{31}l_1/\delta) \left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1} \right) US_0 / (s_{11}^E l).$$

Из формулы (7) регулировочная характеристика — перемещение секционного пьезодвигателя (рис. 5, δ) — при поперечном пьезоэффекте и упругой нагрузке в статике представляется в виде

$$\Delta l = \frac{(d_{31}l_1/\delta) \left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}\right) U}{1 + (C_a + C_e)/C_{11}}.$$
 (11)

Перемещение многослойного ПА в статике при продольном или поперечном пьезоэффектах и уп-

ругой нагрузке — регулировочная характеристика, определяется выражением

$$\Delta l = k_c U, \tag{12}$$

где k_c — коэффициент передачи, который имеет вид:

• с параллельным управлением согласно формулам (6) и (7)

$$k_{c} = \begin{cases} \frac{d_{33}n}{1 + (C_{a} + C_{e})/C_{33}} - \\ \text{при продольном пьезоэффекте;} \\ \frac{d_{31}l/\delta}{1 + (C_{a} + C_{e})/C_{11}} - \\ \text{при поперечном пьезоэффекте;} \end{cases}$$

 с кодовым управлением согласно формулам (9) и (11)

$$\frac{d_{33}\sum\limits_{k=1}^{N}a_{k}2^{k-1}}{1+(C_{a}+C_{e})/C_{33}} -$$

при продольном пьезоэффекте;

$$\frac{\left(d_{31}l_{1}/\delta\right)_{k=1}^{N}a_{k}2^{k-1}}{1+(C_{a}+C_{e})/C_{11}} -$$

при поперечном пьезоэффекте.

Рассмотрим динамические характеристики многослойного ПА как электромеханической системы с распределенными или сосредоточенными параметрами. Динамические характеристики многослойного ПА рассчитывают на основе совместного решения волнового уравнения, уравнения продольного пьезоэффекта при нулевых начальных и соответствующих граничных условиях.

При расчете ПА используется волновое уравнение [3—6], описывающее распространение волны в длинной линии с затуханием без искажений:

$$\frac{1}{\left(c^{E}\right)^{2}}\frac{\partial^{2}\xi}{\partial t^{2}} + \frac{2\alpha}{c^{E}}\frac{\partial\xi}{\partial t} + \alpha^{2}\xi = \frac{\partial^{2}\xi}{\partial x^{2}},\qquad(13)$$

где $\xi(x, t)$ — смещение сечения пьезоактюатора; x — координата; t — время; c^E — скорость звука при E = const; α — коэффициент затухания.

При одном закрепленном торце ПА, например при x = 0, получим $\xi(x, t) = 0$, а при упругоинерционной нагрузке на ПА при x = l получим уравнение сил, действующих на другом его торце:

$$T_3 S_0 = -M \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - (C_a + C_e) \xi, \qquad (14)$$

где *М* — перемещаемая масса.

- 39

Используя преобразование Лапласа

$$\Xi(x, p) = L\{\xi(x, t) = \int_{0}^{\infty} \xi(x, t) \mathbf{e}^{-pt} dt,$$

получим передаточную функцию *W*(*p*) многослойного ПА при продольном пьезоэффекте, параллельном управлении и упругоинерционной нагрузке как электромеханической системы с распределенными параметрами:

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} =$$

$$= \frac{d_{33} \times}{Mp^2 / C_{33} + \operatorname{cth}[l(p/c^E + \alpha)] \times} \rightarrow$$

$$\to \frac{\times n}{\times l(p/c^E + \alpha) + (C_a + C_e) / C_{33}}, \quad (15)$$

где $\Xi(p)$ — преобразование Лапласа перемещения торца многослойного ПА по оси 3; U(p) — преобразование Лапласа напряжения на обкладках многослойного ПА при нулевых начальных условиях.

Отсюда получим выражение для статического перемещения $\Delta l = \xi(\infty)$ армированного многослойного ПА при продольном пьезоэффекте и параллельном управлении в установившемся режиме при подаче напряжения $U(t) = U_0 1(t)$ в случае упругоинерционной нагрузки:

$$\xi(\infty) = \lim_{t \to \infty} \xi(t) = \lim_{p \to 0} pW(p) \frac{U_0}{p} =$$

=
$$\lim_{\substack{p \to 0 \\ \alpha \to 0}} \frac{d_{33}nU_0}{l(p/c^E + \alpha)/\text{th}[l(p/c^E + \alpha)] + (C_a + C_e)/C_{33}} =$$

=
$$\frac{d_{33}nU_0}{1 + (C_a + C_e)/C_{33}}.$$

Тогда передаточную функцию W(p) многослойного ПА при продольном пьезоэффекте после разложения в ряд гиперболического котангенса (учитываем два члена ряда) на рабочих частотах при параллельном управлении и упругоинерционной нагрузке при $m \ll M$ (где m — масса многослойного ПА) в диапазоне рабочих частот $0 \le \omega \le 0.01 c^{E}/l$ как электромеханической системы с сосредоточенными параметрами можно записать:

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{d_{33}n}{[1 + (C_a + C_e)/C_{33}] (T_{33}^2 p^2 + 2T_{33}\xi_{33}p + 1)}.$$
 (16)

Здесь

$$= \frac{\alpha l^3 C_{33}}{3c^E \sqrt{M(C_a + C_e + C_{33})}} -$$
постоянная времени и

коэффициент затухания колебательного звена многослойного ПА при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке.

Соответственно с учетом сопротивления *R* внешней цепи и емкости С0 пьезопластины многослойного секционного ПА получим его передаточную функцию при продольном пьезоэффекте в виде

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{d_{33} \times}{[1 + (C_a + C_e)/C_{33}](\operatorname{Rn} C_0 p + 1) \times} \rightarrow \frac{\times n}{\times (T_{33}^2 p^2 + 2T_{33}\xi_{33}p + 1)}.$$
 (17)

Передаточная функция W(p) многослойного ПА при поперечном пьезоэффекте, параллельном управлении и упругоинерционной нагрузке при $m \ll M$ в диапазоне рабочих частот $0 < \omega < 0.01 c^E/l$ как электромеханической системы с сосредоточенными параметрами имеет вид

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{d_{31}l/\delta}{[1 + (C_a + C_e)/C_{11}] (T_{11}^2 p^2 + 2T_{11}\xi_{11}p + 1)}.$$
 (18)

Здесь
$$T_{11} = \sqrt{\frac{M}{C_a + C_e + C_{11}}}$$
 и $\xi_{11} =$

 $= \frac{\alpha l^2 C_{11}}{3c^E \sqrt{M(C_a + C_e + C_{11})}} -$ постоянная времени и

коэффициент затухания колебательного звена многослойного ПА при поперечном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке.

Соответственно, при рассмотрении электромеханической системы с сосредоточенными параметрами [7, 8] передаточная функция многослойного секционного ПА для упругоинерционной нагрузки при $m \ll M$ и продольном пьезоэффекте с кодовым управлением имеет вид

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{d_{33}\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}}{[1 + (C_a + C_e)/C_{33}] (T_{33}^2 p^2 + 2T_{33}\xi_{33}p + 1)}, \quad (19)$$

 $T_{33} = \sqrt{\frac{M}{C_a + C_e + C_{33}}}$ и $\xi_{33} = [1 + (C_a + C_e)/C_{33}](T_{33}^2 p^2 + 2T_{33}\xi_{33}p + 1)$ где C_a, C_e — жесткости армирующего элемента и на-грузки; $C_{33} = S_0/(s_{33}^E l)$ — жесткость многослойного секционного ПА при продольном пьезоэффекте;

$$T_{33} = \sqrt{\frac{M}{C_a + C_e + C_{33}}}, \ \xi_{33} = \frac{\alpha l^2 C_{33}}{3c^E \sqrt{M(C_a + C_e + C_{33})}} -$$

постоянная времени и коэффициент затухания колебательного звена многослойного секционного ПА.

Передаточная функция многослойного секционного ПА для упругоинерционной нагрузки при $m \ll M$ при поперечном пьезоэффекте с кодовым управлением имеет вид

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{d_{31}l_1/\delta \sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}}{[1 + (C_a + C_e)/C_{11}] (T_{11}^2 p^2 + 2T_{11}\xi_{11}p + 1)}, \quad (20)$$

где $C_{11} = S_0 / (s_{11}^E l)$ — жесткость многослойного секционного ПА при поперечном пьезоэффекте.

Переходную характеристику многослойного ПА при упругоинерционной нагрузке как электромеханической системы с сосредоточенными параметрами при малом сопротивлении ($R \rightarrow 0$) с учетом равенства (11) представим в виде

$$\xi(t) = k_c U_0 h(t) = \xi_0 h(t), \qquad (21)$$

где h(t) — нормированная переходная характеристика многослойного ПА; ξ_0 — установившееся его перемещение, определяемое по формулам:

• с параллельным управлением

$$\xi_0 = \begin{cases} \frac{d_{33}nU_0}{1 + (C_a + C_e)/C_{33}} - \\ при продольном пьезоэффекте; \\ \frac{d_{31}(l/\delta)U_0}{1 + (C_a + C_e)/C_{11}} - \\ при поперечном пьезоэффекте; \end{cases}$$

• с кодовым управлением

٢

при поперечном пьезоэффекте.

Нормированная переходная характеристика многослойного ПА имеет вид

$$h(t) = 1 - \frac{\mathbf{e}^{-\frac{\xi_{33(11)}t}{T_{33(11)}}}}{\sqrt{1 - \xi_{33(11)}^2}} \sin(\omega_{33(11)}t + \varphi_{33(11)}), \quad (22)$$

где
$$T_{33(11)} = \sqrt{\frac{M}{C_e + C_{33(11)}}}; \xi_{33(11)} =$$

$$= \frac{\alpha l^2 C_{33(11)}}{3c^E \sqrt{M(C_e + C_{33(11)})}}; \quad \omega_{33(11)} = \frac{\sqrt{1 - \xi_{33(11)}^2}}{T_{33(11)}};$$

$$\varphi_{33(11)} = \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{33(11)}^2}}{\xi_{33(11)}}\right).$$

Здесь индексы 33 относятся к соответствующим параметрам многослойного ПА при продольном пьезоэффекте, а индексы 11 — при поперечном пьезоэффекте.

Полученные механические и регулировочные характеристики пьезоактюаторов при параллельном и кодовом управлении позволяют рассчитывать статические и динамические режимы работы простых и многослойных пьезоактюаторов в зависимости от внешней нагрузки в нано- и микроманипуляторах и их физических и геометрических параметров.

Список литературы

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

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

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

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

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

6. Афонин С. М. Исследование и расчет статических и динамических характеристик пьезоактюатора нано- и микроперемещений // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 3. С. 34—41.

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

8. Ленк А. Электромеханические системы. Системы с сосредоточенными параметрами. М.: Мир, 1978. 284 с.

УДК 621.363

В. А. Королева, инженер-исследователь, e-mail: KorolevaVA@bk.ru, Д. В. Болтунов, инженер-исследователь, А. А. Жуков, д-р техн. наук, доц., зам. начальника центра по науке, ОАО "Российская корпорация ракетнокосмического приборостроения и информационных систем", Москва

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОРАЗМЕРНЫХ СЛОИСТЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСТРОЙСТВ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Поступила в редакцию 10.11.2011

Проведена расчетно-экспериментальная оценка характеристик подвижных исполнительных элементов электростатических актюаторов: деформации от нагрузки, с последующим расчетом их изгибной жесткости, модуля Юнга конструкционного материала, электрического напряжения срабатывания. Показано, что с увеличением толщины слоя никеля возрастают расчетно-экспериментальные значения изгибной жесткости конструкции. Установлено, что напряжение срабатывания уменьшается при уменьшении толщины слоя никеля. Измеренные значения превышают расчетные, что может быть связано с особенностями технологии изготовления.

Ключевые слова: микросистемная техника, изгибная жесткость исполнительного элемента, деформация, измерительное динамическое индентирование, зависимость "нагрузка — деформация"

Введение

Устройства микросистемной техники представляют собой набор микроструктур, объединяющих механические и электронные компоненты, изготовленные, как правило, в едином технологическом цикле. Механическими компонентами устройств микросистемной техники служат деформируемые или недеформируемые мембранные и консольные исполнительные элементы с необходимым числом степеней свободы [1]. При создании устройств микросистемной техники на этапах моделирования. проектирования и практической реализации возникает необходимость количественного измерения и интерпретации физико-механических характеристик исполнительных элементов — самых критичных узлов устройств микросистемной техники, формируемых методами поверхностной или объемной микрообработки, чаще всего на основе многослойных структур [2—7]. Исследование физико-механических характеристик материалов, применяемых при изготовлении исполнительных элементов и контактов устройств микросистемной техники, является актуальной задачей, поскольку от них напрямую зависят электрофизические характеристики, надежность и долговечность микроэлектромеханических устройств.

Ранее в работе [8] была проведена экспериментальная оценка изгибной жесткости микроразмерных исполнительных элементов на основе монокристаллического кремния и структуры "ванадий никель" путем сравнения зависимостей "нагрузка деформация", измеренных на жестком конструкционном материале и подвижном исполнительном элементе из того же материала. Показано, что экспериментальные значения изгибных жесткостей исполнительных элементов близки к расчетным. При этом в работе не было уделено внимание исследованию влияния толщины исполнительного элемента на жесткость конструкции и электрическое напряжение срабатывания, а также исследованию свойств гальванически осажденного материала.

Целью настоящей работы являлась оценка физико-механических и электрофизических характеристик микроразмерных слоистых исполнительных элементов устройств МСТ на основе гальванически сформированных металлов.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили исполнительные элементы электростатических устройств МСТ, изготовленные по технологии поверхностной микрообработки с применением "жертвенных" слоев, представляющие собой мембраны на четырех упругих элементах, выполненных в форме меандра (рис. 1, 2).



Рис. 1. Объект исследования:

a — недеформированный исполнительный элемент: (1 — мембрана, 2 — упругий элемент); δ — исполнительный элемент, деформированный под действием нагрузки (P — заданная нагрузка, h — деформация)



x, y, z — направления координатной плоскости; a — длина соединительного звена меандра; b — длина основного звена меандра; w — ширина меандра

– НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 4, 2012 –

Исполнительные элементы были сформированы на основе многослойной структуры "золото никель—золото", полученной методом гальванического осаждения металлов. Пленки золота применялись в качестве функциональных слоев исполнительного элемента для получения покрытий с высокими электрофизическими характеристиками, а пленки никеля — для обеспечения требуемой прочности и изгибной жесткости. Толщина слоя золота составляла $1 \pm 0,02$ мкм, толщина никеля варьировалась от 0,5 до 3,5 мкм с шагом 0,5 мкм, диаметр мембраны 400 мкм, длина меандра упругого элемента 592 мкм.

Оценку изгибной жесткости и деформации проводили методом, представленным в работе [8].

Оценка физико-механических характеристик подвижных исполнительных элементов включает в себя измерение зависимостей деформации исполнительных элементов от нагрузки, создаваемой индентором, с дальнейшим расчетом их изгибной жесткости, исследование модуля Юнга конструкционного материала. Также в работе проводили исследование электрического напряжения срабатывания, при котором исполнительный элемент замыкал контакт, сформированный на подложке.

Изгибная жесткость *S* в произвольной точке *I* зависимостей "нагрузка — деформация" исполнительного элемента при нагружении и разгрузке рассчитывали по формуле

$$S = \left(\frac{dP}{dh}\right)_{I},\tag{1}$$

где *P* — значение приложенной нагрузки; *h* — прогиб исполнительного элемента.

Изгибную жесткость исполнительных элементов рассчитывали исходя из геометрии упругих элементов и свойств конструкционных материалов. На рис. 2 представлен общий вид упругого элемента в форме меандра.

Изгибную жесткость *S*_{расч} исполнительного элемента рассчитывали по формуле [9]

$$S_{\text{pacy}} = n \frac{8N^3 a^3 + 2Nb^3}{3EI_x} + \frac{abN[3b(2N+1)(4N+1)a]}{3GJ} - \frac{Na^2 \left[\frac{2Na}{EI_x} + \frac{(2N+1)b}{GJ}\right]^2}{2\left(\frac{a}{EI_x} + \frac{b}{GJ}\right)} - \frac{Nb^2}{2} \left(\frac{a}{GJ} + \frac{b}{EI_x}\right)^{-1}, \quad (2)$$

где n — число упругих элементов; N — число меандров в упругом элементе; a —длина соединительного звена меандра; b — длина основного звена меандра; E = 110 ГПа — модуль Юнга материала; J — постоянная кручения; G — цилиндрическая жесткость; I_x — момент инерции в направлении x.

Момент инерции I_{x} [9]

$$I_x = \frac{wt^3}{12},\tag{3}$$

где w — ширина меандра; t — толщина меандра. Постоянная кручения J [9]

$$J = 0,413I_p,$$
 (4)

где *I_p* — полярный момент инерции. Полярный момент инерции *I_p* [9]

 I_p

$$=I_{x}+I_{z},$$
 (5)

где I_z — момент инерции в направлении *z*. Момент инерции I_z [9]

$$I_z = \frac{tw^3}{12}.$$
 (6)

Цилиндрическая жесткость G [9]

$$G = \frac{E}{2(1+\gamma)},\tag{7}$$

где $\gamma = 0,35$ — коэффициент Пуассона материала. Напряжение срабатывания $V_{\rm cp}$ исполнительно-

го элемента рассчитывали по формуле [9]

$$V_{\rm cp} = \sqrt{\frac{8S_{\rm pacy}g^3}{27\varepsilon_0 A}},\tag{8}$$

где g — расстояние между подвижным исполнительным элементом и электродом управления; ε_0 — диэлектрическая проницаемость воздуха; A — площадь электродов.

Результаты и их обсуждение

По результатам оценки физико-механических характеристик образцов получены экспериментальные зависимости смещения (деформации) исполнительных элементов от нагрузки. На рис. 3 представлена типичная зависимость "нагрузка — деформация" исполнительных элементов при нагружении и разгрузке.

Экспериментальная кривая "нагрузка—деформация" определяется свойствами конструкции исполнительного элемента и носит характер упругой деформации.

Расчетно-экспериментальные значения деформации и изгибной жесткости исполнительных элементов, определенные по формулам (2)—(7) и на основании анализа кривых "нагрузка — деформация" по формуле (1), а также экспериментальные значения модуля Юнга никеля обобщены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, экспериментальные значения изгибных жесткостей превышают расчетные, что объясняется влиянием малых размеров микроструктур и специфических методов их изго-



Рис. 3. Типичная зависимость "нагрузка — деформация" исполнительного элемента

Таблица 1

Физико-механические характеристики исполнительных элементов с различной толщиной слоя никеля и свойства конструкционного материала

Nº	Толщина	Жестк конструг кН,	сость сции <i>S</i> , /м	Дефор-	Модуль Юнга	
об- разца	елоя никеля, мкм	Экспери- менталь- ные зна- чения	Расчет- ные значения	мация h, мкм	слоя никеля, ГПа	
1	0.5	19.4	13.4	1 10	91	
2	1.1	43.1	36.8	0.49	90	
3	1,5	76,2	61,5	0,41	89	
4	2,1	105,3	115,4	0,33	95	
5	2,5	171,7	164,6	0,30	85	
6	3,0	248,3	241,5	0,25	97	
7	3,4	311,2	317,3	0,27	101	

товления на механические свойства материалов и конструкций.

На рис. 4 представлены расчетно-экспериментальные значения изгибных жесткостей при различной толщине исполнительного элемента. На рис. 4 видно, что с увеличением толщины слоя никеля возрастают расчетно-экспериментальные значения изгибной жесткости конструкции. При этом отношение изменения жесткости к соответствующему изменению толщины исполнительного элемента dS/dt также увеличивается, что в свою очередь указывает на уменьшение отношения изменения жесткости к соответствующему изменению деформации исполнительного элемента dS/dh.

Измеренные значения модуля Юнга никеля составили 93 ± 8 ГПа. Физико-механические свойства гальванически осажденного никеля изменяются в широких пределах в зависимости от природы электролита, состава и условий осаждения (известно, что модуль Юнга никеля может изменяться в пределах от 10 до 220 ГПа [10, 11]).

В табл. 2 представлены расчетно-экспериментальные значения напряжения срабатывания исполни-



тельного элемента

Таблица 2

Измеренные и рассчитанные напряжения срабатывания при различной толщине слоя никеля

No	Толщина	Напряжение срабатывания, В				
образца	слоя никеля, МКМ	Экспериментальные значения	Расчетные значения			
1	0,5	16	13			
2	1,1	21	17			
3	1,5	26	20			
4	2,1	30	25			
5	2,5	34	28			
6	3,0	39	32			
7	3,4	41	36			
L						

тельного элемента. Как видно из табл. 2, напряжение срабатывания уменьшается на 4...5 В при уменьшении толщины слоя никеля на 0,5 мкм. Однако измеренные значения превышают расчетные, что связано с технологическими проблемами изготовления.

Заключение

Проведена оценка физико-механических характеристик подвижных исполнительных элементов на основе многослойной структуры "золото — никель золото", основанная на измерении зависимостей деформации исполнительных элементов от нагрузки, создаваемой индентором, с последующим расчетом их изгибной жесткости. При толщинах слоя никеля от 0,5 до 3,4 мкм экспериментальные значения изгибной жесткости составили от 19,4 до 311,2 кН/м, расчетные — от 13,4 до 317,3 кН/м. С увеличением толщины слоя никеля возрастают расчетно-экспериментальные значения изгибной жесткости конструкции. При этом отношение изменения жесткости к соответствующему изменению толщины исполнительного элемента dS/dt также увеличивается, что в свою очередь указывает на

уменьшение отношения изменения жесткости к соответствующему изменению величины деформации исполнительного элемента *dS/dh*.

Проведено исследование модуля Юнга конструкционного материала. Измеренные значения модуля Юнга никеля составили 93 ± 8 ГПа.

Проведено расчетно-экспериментальное исследование электрического напряжения срабатывания, при котором исполнительный элемент накоротко замыкал контакт, сформированный на подложке. При толщинах слоя никеля от 0,5 до 3,4 мкм экспериментальные напряжения срабатывания составили от 16 до 13 В, расчетные — от 13 до 36 В. Напряжение срабатывания уменьшается на 4...5 В при уменьшении толщины слоя никеля на 0,5 мкм. Однако измеренные значения превышают расчетные, что может быть связано с технологическими особенностями изготовления.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 10-02-01336_офи-а).

Список литературы

1. Располов В. Я. Микромеханические приборы. М.: Ма-шиностроение, 2007. 400 с.

2. Бабаевский П. Г., Гринькин Е. А., Жуков А. А. и др. Электромеханические преобразователи сенсорных микро-



и наносистем: физические основы и масштабные эффекты. Часть 1. Чувствительные механические элементы и актюаторы // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 11. С. 32—44.

3. Бабаевский П. Г., Гринькин Е. А., Жуков А. А. и др. Электромеханические преобразователи сенсорных микрои наносистем: физические основы и масштабные эффекты. Часть 2. Детекторы, источники и характеристики шумов // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 12. С. 27–37.

4. Варадан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение. М.: Техносфера, 2004. 528 с.

5. Oliver W. C., Pharr G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology // J. Mater. Res. 2004. Vol. 19. N 1. P. 3.

6. Ma Q., Tran Q., Tsung-Kuan A. C., Heck J., Bar H., Kant R. Metal contact reliability of RF MEMS switches // Proc. SPIE. 2007. Vol. 6463. P. 646305-646305-13.

7. Yang Z., Lichtenwalner D., Morris A., Menzel S., Nauenheim C., Gruverman A., Krim J. A new test facility for efficient evaluation of MEMS contact materials // J. Micromech. Microeng. 2007. Vol. 17. P. 1788–1795.

8. Королева В. А., Капустян А. В., Жуков А. А., Гоголинский К. В., Усеинов А. С. Оценка изгибной жесткости и деформации микроразмерных исполнительных элементов устройств микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 1. С. 39—42.

9. Fedder G. K. Simulation of microelektromechanical systems // Ph. D. dissertation. Dept. Elect. Eng. Comput. Sci., Univ. California at Berkeley, Berkeley, CA. 1994.

10. Садаков Г. А. Гальванопластика: справочное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2004. 400 с.

11. Гамбург Ю. Д. Гальванические покрытия: Справочник по применению. М.: Техносфера, 2006. 215 с.

УДК 621.396.677.3

П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф., директор,

- О. С. Матвеенко, канд. техн. наук, мл. науч. сотр.,
- Д. Л. Гнатюк, мл. науч. сотр.,
- А. П. Лисицкий, канд. техн. наук, зав. лаб.,

Ю. В. Федоров, зав. лаб.,

- С. Л. Бунегина, патентовед,
- Д. В. Крапухин, патентовед,

Институт сверхвысокочастотной

полупроводниковой электроники РАН, e-mail: liant2@yandex.ru

ОБЗОР РЕАЛИЗАЦИЙ ПЛАНАРНЫХ АНТЕНН *Х*-ДИАПАЗОНА С ДВУМЯ СЛОЯМИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Поступила в редакцию 05.02.2012

Рассмотрены результаты разработки планарных антенн с двухсторонней металлизацией для UWB-систем. Рассмотрена реализация планарных диполей и антенн типа Уда—Яги, применение фрактальных топологий и метаматериалов. Показано, что наиболее эффективным направлением уменьшения размеров антенны является оптимизация топологии излучателя и земляного проводника. **Ключевые слова:** сверхширокополосная антенна, X-диапазон, планарная антенна, монополь, копланарная линия, антенна Уда—Яги, фрактал, метаматериалы

Введение

Планарные антенны *X*-диапазона с двумя слоями металлизации как дешевые и технологичные разрабатываются для следующих систем:

- Ultra-Wide band (UWB)-систем (рабочий диапазон частот не менее 3,1...10,6 ГГц);
- систем спутникового телевидения.

В данной работе используется терминология обзора [1]. Полоса оценивается по уровню коэффициента стоячей волны (КСВ) < 2 или по уровню S11 < -10 дБ.

Особенностями UWB-антенн являются:

- необходимость изоляции канала (полосы режекции) в узких полосах непропускания (notch band) в пределах рабочей полосы, что обеспечивается высоким рассогласованием входа антенны на данных частотах;
- равномерное распределение излучения в азимутальной плоскости, т. е. минимальные требования к коэффициенту усиления диаграммы направленности (ДН).

Развитие встроенных антенн на основе монополя

Обзор реализованных планарных антенн на основе монополей, копланарных, вибраторных антенн различных топологий диапазона 12 ГГц приведен в работах [2, 3].

Поиск оптимальной формы в настоящее время не может быть выполнен средствами машинного проектирования, поэтому разработчики применяют различные эмпирические приемы, породившие значительное число реализаций монополей, из которых рассмотрены наиболее характерные, обеспечивающие UWB-полосу.

Как правило, в антеннах *Х*-диапазона требуется изолировать диапазон в районе 5,4 ГГц. Характерным примером использования монополя является работа [4]. В ней описан излучатель (рис. 1) с дополнительным шлейфом, соединенным с монополем щелевым резонатором в месте присоединения подводящей линии и монополя, что обеспечивает согласование в полосах 1,4...4,8 и 6...11 ГГц (с одной полосой непропускания). Антенна имеет значительные размеры — 72 × 66 мм, что связано с обеспечением рабочей полосы до 1,4 ГГц; диэлектрическую проницаемость $\varepsilon = 4,4$; толщину диэлектрика h = 1,6 мм.

В работе [5] методами машинного моделирования исследована антенна с эллиптическим монополем. Топология, показанная на рис. 2, обеспечивает уникальную полосу 2...21 ГГц при размерах 44×20 мм; $\varepsilon = 4,7$; h = 1,5 мм.

Антенна, модифицированная парами электродинамически связанных щелевых резонаторов для эллиптического монополя (рис. 3), имеет полосы с высоким отражением (полосы режекций) 3,4...3,69, 5,15...5,825, 8,5...9,5 ГГц.

Более глубокой модификации подвергнут эллиптический монополь в работе [6] (рис. 4). Получена рабочая полоса 2,2...11 ГГц с исключением по-



Рис. 1. Излучатель с дополнительным Рис. 2. Антенна с эллиптическим моношлейфом, соединенным с монополем щелевым резонатором в месте присоединения подводящей линии и монополя



Рис. 3. Антенна с эллиптическим монополем с парой электродинамически связанных щелевых резонаторов



Рис. 4. Модификация эллиптического монополя



Рис. 5. Реализация антенны с оптимизированной формой проводников излучателя и земляного проводника

лос частот 3,3...3,8 и 5,1...5,85 ГГц при размерах 20 × 20 мм и ε = 4,4; *h* = 1,0 мм.

В работе [7] описана реализация антенны с оптимизированной формой проводников излучателя

> и земляного проводника (рис. 5). Экспериментально получено согласование в полосе 3,2...14 ГГц. Размеры антенны 36 × 30 мм; ε = 4,4, *h* = 1,6 мм.

> Компактные щелевые резонаторы введены в монополь и в земляной проводник (рис. 6) [8]. Достигнуто согласование в полосе 2,75...11,3 ГГц с исключением полос 3,25...4,20 ГГц и 5,23...6,10 ГГц при размерах 35×35 мм и $\varepsilon = 4,4$; h = 1,6 мм.

Монополь со щелью (рис. 7) имеет рабочую полосу 3,1...11 ГГц при размерах 23,5 × 23 мм и ε = 3,38; *h* = = 0,508 мм [9].

Планарная антенна может быть выполнена несимметричной (рис. 8) [10]. Получена рабочая полоса 3,2...15,54 ГГц с режекцией полосы 4,7...5,8 ГГц при



Рис. 6. Лицевой и земляной проводники антенны с компактными щелевыми резонаторами Рис. 7. Антенна на основе диполя со щелью



Рис. 10. Излучатель-монополь из кольцевых резонаторов

размерах 14,5 × 14,5 мм и ε = 4,6; *h* = 1,6 мм, что является наилучшим соотношением полоса/габаритные размеры.

Круговые резонаторы, выполненные на стороне земляного проводника, обеспечивают рабочие полосы 2,8...3,8 и 8,3...10,1 ГГц (рис. 9) [11]. Размеры структуры — 48×40 мм; $\varepsilon = 10,2$; h = 0,635 мм.

Пара резонансных колец использована в монополе (рис. 10) с согласованием в виде кольцевых резонаторов на обратной стороне [12]. Полоса со-



Рис. 11. Форма U-образного оптимизированного монополя



Рис. 12. Топология лицевой (*a*) и земляной (*б*) металлизации антенны со ступенчатой формой

ставляет 3,05...23,8 ГГц с полосами режекции 3,4...4,0 и 4,92...6,0 ГГц, размеры пластины 30×30 мм; $\varepsilon = 4,4; h = 1,6$ мм.

Обеспечение точной полосы режекции может решаться как самостоятельная задача для разработанной широкополосной антенны. Так, в работе [13] описана численная оптимизация топологии монополя (рис. 11) с целью устранить прием сигнала в полосе 5,15...5,825 ГГц.



Более сложная топология со ступенчатой формой (рис. 12) устраняет полосу 5...5,86 ГГц при рабочей полосе 2,9...14,5 ГГц [14]. Размеры монополя с подводящей линией — 26×25 мм; $\varepsilon = 4,4$; h = 1,6 мм.

Введение пары щелевых резонансов в монополь (рис. 13) устранит две полосы: 3,0...3,6 и 5,0... 6,0 ГГц [15].

Широкополосная антенна с эллиптическим монополем, выполненным несимметрично на стороне земляного проводника и соединенным с подводящей линией через сквозное соединение (рис. 14), обеспечивает полосу 3...11 ГГц без дополнительного согласования при размерах антенны 40×22 мм; $\varepsilon = 2,33; h = 0,508$ мм [16].

Эта антенна, дополненная щелями (рис. 15), обеспечивает подавление полосы режекции в окрестности 5,25 ГГц [16].

Подавление полос 5,15...5,96 и 5,27...5,94 ГГц для эллиптического монополя (рис. 16) реализовано подстроечными площадками с одной и с двух сторон от подводящей линии [17]. Размеры антенны — 40 × 38 мм; ε = 4,5; h = 1,0 мм. Полоса составляет 3...11,5 ГГц.



Рис. 16. Антенна на основе эллиптического монополя с дополнительным согласованием



Введение одного или пары резонаторов в U-образный монополь (рис. 17) приводит к подавлению

разный монополь (рис. 17) приводит к подавлению полосы 4,98...6,03 ГГц [18]. Проведено моделирование топологии и ее модификаций (рис. 18), обеспечивающих подавление полосы 5...6 ГГц [19].

Вариант монополя, расположенного на границе диэлектрика, который обеспечивает рабочую полосу 2,97...12,77 ГГц (с подавлением полосы 5,15...5,825 ГГц) (рис. 19), предложен в работе [20]. Достигнуты размеры 28×30 мм при $\varepsilon = 3,5$; h = 1,52 мм.

В работе [21] описан широкополосный излучатель с монополем круглой формы (рис. 20) с полосой 2,8...10,66 ГГц, размером 25 × 25 мм; ε = 4,4; h = 1,6 мм. Введение в монополь П-образной щели создает подавление полосы 3,73...6,15 ГГц.

Антенна-монополь с подстройкой шлейфами на земляном проводнике (рис. 21) представлена в работе [22]. При размерах 30×30 мм; $\varepsilon = 4,4$; h = 1,6 мм обеспечена полоса 3,07...10,66 ГГц. Исследована возможность "включения — выключения" полосы режекции 5,01...5,89 ГГц при введении переключающих ріп-диодов в шлейфы земляного проводника.







устранения выброса КСВ

Рис. 19. Вариант топологии для Рис. 20. Широкополосный излучатель с монополем круглой формы

двух полос

Рис. 21. Антенна с подстройкой шлейфами на земляном проводнике



Рис. 22. Антенна-монополь с минимальными размерами





Рис. 24. Антенна на основе квадратного монополя со щелями с обеих сторон



В работах [23-26] предложены варианты широкополосных антенн с подавлением полосы 5,4 ГГц. В работе [27] описан компактный монополь, обеспечивающий размеры антенны 17 × 16 мм при ε = 4,4; *h* = 1,6 мм (рис. 22). Характерно, что две щели обеспечивают одну полосу режекции.

Антенна, показанная на рис. 23, с размерами 30×25 мм; $\varepsilon = 4,4$; h = 1,5 мм обеспечивает режекцию принимаемого сигнала в двух 4,85...5,35 полосах ΓГш И 5,65...6,08 ГГц при общей полосе 3,08-12 ГГц [28]. Каждая кольцевая щель обеспечивает одну полосу

режекции. Реализованы и исследованы также топологии с одной и тремя полосами режекции.

Антенна на основе квадратного монополя размером 15×10 мм; $\varepsilon = 4,4$; h = 1,0 мм с щелями в обоих проводниках (рис. 24) описана и промоделирована в работе [29]. Получена полоса 3...13 ГГц с двумя полосами режекции.

Антенна на основе монополя с фигурными щелями в монополе и земляном проводнике, показанная на рис. 25, обеспечивает подавление трех полос 3,3...3,9, 5,2...5,35, 5,8...6,0 ГГц. Размеры антенны — 36×34 мм; $\varepsilon = 2,65$; h = 1,0 мм [30].

Для устранения нежелательной полосы может быть примерен фильтр в подводящей линии (рис. 26) [31]. Рабочая полоса 3-11 ГГц при полосе режекции 4,9...5,9 ГГц. Размеры антенны 27×27 MM, $\varepsilon = 3,2$; h = 1,52 MM.

Оптимизация топологии в рамках допустимой площади путем введения набора щелей, шлейфов в верхний и нижний проводники может привести к топологии с весьма сложным видом излучателя. В патенте [32] защищается планарная антенна, имеющая монополь с оптимизированными вырезами в обоих проводниках (рис. 27). Достигнута полоса 3...10,8 ГГц.



Рис. 26. Монопольный излучатель с фильтром



Рис. 27. Топология излучателя с набором шлейфов и щелей



Рис. 28. Топология излучателя с набором шлейфов и щелей (а) и его частотная зависимость КСВ (б)



Рис. 29. Диаграмма направленности антенны рис. 28. Непрерывная линия — *Е*-координата; штриховая линия — *Н*-плоскость

Излучатели подобного вида описаны в работе [33]. Топология и частотная зависимость КСВ показаны на рис. 28. Важным достоинством данной антенны является высокая направленность (рис. 29). Полоса 2,93...10,67 ГГц (по уровню КСВ < 2). Размеры антенны 30×20 мм; $\varepsilon = 10,2$; h = 1,27 мм. К рассмотренным антеннам на основе монополя близки антенны с монополем на стороне копланарной линии (лицевой металлизации). Такая антенна в самой простой реализации (рис. 30) есть излучатель-монополь, который окружен земляным проводником.

Копланарная антенна, показанная на рис. 30, имеет рабочие частоты 5,12...12,31 ГГц, при размерах 120 × 100 мм; $\varepsilon = 4.9$; h = 0.8 мм [34].

Излучатель может быть выполнен на стороне, обратной подводящей копланарной линии (рис. 31). В этой структуре разрыв входной копланарной линии на обратной стороне металла создает дополнительные резонансы, что позволяет получить сравнительно высокий коэффициент усиления антенны (7 дБ на 10 ГГц) при узкополосном согласовании 4 % для 10 ГГц [35]. Размеры излучателя — $18 \times 10,5$ мм; $\varepsilon = 2,17$; h = 0,508 мм.



Рис. 30. Модификация топологии копланарной антенны



Рис. 31. Вид антенны с излучателем на стороне, обратной подводящей линии

Расширения щелей копланарной линии могут образовывать щелевые вибраторы. Антенны на основе данных щелевых вибраторов представлены на рис. 32 (см. вторую сторону обложки) [36]. Получена полоса 7,5...11,3 ГГц. Размеры излучателя $l = 30 \times 12$ MM; $\varepsilon = 3,38$; h = 0,508 MM.

Развитие вибраторных антенн Х-диапазона

Подобно оптимизации формы планарного монополя, целесообразна оптимизация топологии планарного балансного диполя (PBD) (рис. 33). Реализация данной структуры показала согласование в полосе 2,9...15,0 ГГц при размерах 45 × 40 мм [37].

Разрабатываются планарные реализации антенны типа Уда—Яги с парой диполей и пассивными вибраторами, сужающими главный максимум ДН и тем самым повышающими коэффициент усиления ДН (рис. 34) [38]. Рабочая полоса 8...12 ГГц. При коэффициенте усиления ДН 3,4...7,4 дБ размеры антенны — $29 \times 19,2$ мм; $\varepsilon = 10,2$; h = 0,64 мм.

Пример реализации антенны типа Уда-Яги с фазосдвигателем в одном из вибраторов показан на рис. 35 [39]. Размеры излучателя — 16×16 мм; $\varepsilon =$ = 10,2; *h* = 0,635 мм, полоса 4,5 ГГц при центральной частоте 10 ГГц.

В работе [40] описана антенна, в которой один вибратор выполнен на верхнем проводнике, второй вибратор — на земляном (рис. 36). Достигнута полоса 5.3...14.2 ГГ μ : размеры антенны 30 × 29 мм: ε = 10,2; *h* = 1,27 мм.





Рис. 34. Топология планарной вибраторной антенны Яги



Рис. 35. Антенна типа Яги с фазосдвигателем в одном из вибраторов



Применение фрактальных структур

Фрактальные структуры позволяют распределять электромагнитное поле на плоскости проводника с большей анизотропностью, чем для непрерывного проводящего слоя, что, в частности, создает в изучаемом поле компоненты обоих ортогональных поляризаций. Примером фрактальной реализации земляного проводника планарной антенны является излучатель круговой поляризации (рис. 37, см. вторую сторону обложки) с размерами 20×20 мм и $\varepsilon = 3,5$; h = 0,76 мм [41]. Получены полоса 8,6...11,4 ГГц, и сравнимые по значению интенсивности ортогональных компонент излучаемого поля.

Монопольный излучатель с фрактальной топологией отверстий (рис. 38) обеспечивает полосы 1,5...3; 6,0...12; 13,5...20 ГГц при размерах 70 × 60 мм; ε = 3,38; *h* = 1,5 мм [42].

Использование метаматериалов

Метаматериалы в *X*-диапазоне применяют как модификацию земляного проводника планарной антенны.

В работе [43] описана оптимизация топологии монополя и земляного проводника для достижения максимальной широкополосности. На первом этапе оптимизировалась форма монополя и непрерывного земляного проводника (рис. 39, см. вторую сторону обложки), на втором этапе исследованы следующие модификации: частые межслойные перемычки, образующие электродинамический эквивалент вертикальной стенки; EBG-







Рис. 41. Сечение ЕВG-структуры

структуру (electromagnetic band-gap) земляного проводника; спираль (рис. 40, см. вторую сторону обложки). Сечение EBG-структуры показано на рис. 41.

Самое широкополосное согласование получено для спирали (полоса 3...32 ГГц). Размеры подложки — 40 × 40 мм; $\varepsilon = 4,4$; h = 1,6 мм.

В работе [44] рассмотрена антенна с зонтовидным монополем (см. рис. 39, *г*, на второй стороне обложки) и с металлизацией земляного проводника в форме спирали трех видов (рис. 42, *а*—*в*, см. вторую сторону обложки). Обнаружено, что спираль второго вида обеспечивает меньший уровень S11. Спираль вызвала высокую изрезанность формы ДН.

Заключение

В результате поисков оптимальной топологии антенны UWB получено большое число вариантов, различающихся по размерам. Использование фрактальных структур и метаматериалов не приносит значительного снижения габаритных размеров антенны. Достижение большей направленности планарными антеннами типа Уда—Яги сопровождается снижением рабочей полосы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по государственному контракту 16.426.11.0031 от 31 мая 2011 г. 1. Мальцев П. П., Матвеенко О. С., Гнатюк Д. Л., Лисицкий А. П., Федоров Ю. В. Обзор реализаций встроенных антенн диапазона 5 ГГц с излучателем монополем // Нанои микросистемная техника. 2011. № 9. С. 34—44.

2. Zhong S., Yan X., Liang X. UWB planar antenna technology // Front. Electr. Electron. Eng. China. 2008. 3 (2). P. 136–144.

3. **Zhong S., Xianling L.** Progress in ultra-wideband planar antennas // Journal of Shanghai University (Engl. Ed.). 2007. 11 (2). P. 95–101.

4. Lin H. N., Shao C. M., Chen J. L. Design of Ultra-wideband Monopole Antenna with Band-notched and GPS Circular Polarization Characteristics // Progress In Electromagnetics Research Symposium, Hangzhou, China. 2008. P. 151–156.

5. Zainud-Deen S. H., Al-Essa R. A., Ibrahem S. M. M. Ultrawideband Printed Elliptical Monopole Antenna With Four Band-Notch Characteristics // Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). 2010. P. 1–4.

6. **Behjati Z., Azarmanesh M. N.** Dual band-notched semi-elliptical monopole antenna with two branch feed line // Progress In Electromagnetics Research Letters. 2009. V. 12. P. 69–78.

7. **Khalilpour R., Nourinia J., Ghobadi C.** An Optimized Monopole Microstrip Patch Antenna with Gradual Steps for Ultrawideband Applications // PIERS Proceedings, Xi'an, China, 2010. March 22–26. P. 1072–1076.

8. Sun J.-Q., Zhang X.-M., Yang Y.-B., Guan R., Jin L. Dual band-notched ultra-wideband planar monopole antenna with m- and w-slots // Progress In Electromagnetics Research Letters. 2010. V. 19. P. 1–8.

9. **Białkowski M. E., Abbosh A. M.** Design of UWB Planar Antenna With Improved Cut-Off at the Out-of-Band Frequencies // IEEE antennas and wireless propagation letters. 2008. V. 7. P. 408–410.

10. Azim R., Islam M. T., Misra N. Printed Planar Antenna for Wideband Applications // J. Infrared Milli Terahz Waves. 2010. 31. P. 969–978.

11. **Ren Y. J., Chang K.** Broadband Dual-frequency CPW-fed Annual-ring Antenna // Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). 2010. P. 3601–3604.

12. **Zhang M., Zhou X., Guo J., Yin W.** A novel ultra-wideband planar antenna with dual band-notched performance // Microwave and Optical Technology Letters. 2010. V. 52, N 1. P. 90–92.

13. Yang X., Sheng J. Optimization of band-notched UWB antenna using micro-genetic algorithm combined with FDTD // Shanghai Univ (Engl. Ed.). 2009. 13 (5). P. 375–378.

14. Cho Y. J., Kim K. H., Hwang S. H., Park S. O. Miniature UWB Planar Monopole Antenna with 5 GHz Band-Rejection Filter // The European Conference on Wireless Technology. 2005. P. 511–514.

15. **Chu Q. X., Yang Y. Y.** A Compact Ultrawideband Antenna With 3,4/5,5 GHz Dual Band-Notched Characteristics // IEEE transactions on antennas and propagation. 2008. V. 56, N 12. P. 3637–3644.

16. **Bahadori K., Rahmat-Samii Y.** A Miniaturized Elliptic-Card UWB Antenna With WLAN Band Rejection for Wireless Communications // IEEE transactions on antennas and propagation. 2007. V. 55, N. 11. P. 3326–3332.

17. **Peng L., Cheng-Li R.** UWB Band-Notched Monopole Antenna Design Using Electromagnetic-Bandgap Structures // IEEE transactions on microwave theory and techniques. 2011. V. 59, N 59. P. 1074–1081.

18. **Ryu K. S., Kishk A. A.** UWB Antenna With Single or Dual Band-Notches for Lower WLAN Band and Upper WLAN Band //

IEEE transactions on antennas and propagation. 2009. V. 57, N 12. P. 3942-3950.

19. **Rajesh D., Sahu P. K.** Compact UWB notch filter parasitic microstrip antenna // International Workshop on Antenna Technology (iWAT). 2011. P. 278–281.

20. **Bao X. L., Ammann M. J.** Printed Band-Rejection UWB Antenna with H-shaped Slot // International Workshop on Antenna Technology: Small and Smart Antennas Metamaterials and Applications, IWAT '07. 2007. P. 319–322.

21. Panda J. R., Kshetrimayum R. S. A Compact CPW-Fed Monopole Antenna With An U-Shaped Slot For 5 GHz 6 GHz Band-Notched Ultrawideband Applications // A Workshop on Advanced Antenna Technology, 2010 Indian Antenna Week. 2010. P. 1-4.

22. Sim C.-Y.-D., Chung W.-T., Lee C.-H. Planar uwb antenna with 5ghz band rejection switching function at ground plane // Progress In Electromagnetics Research. 2010. V. 106. P. 321–333.

23. **Kang Y., Jinping X.** Compact Ultra-wideband Monopole Antenna with Band-Stop Characteristic // International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. 2008. P. 1174–1176.

24. Chawanonphithak K., Phongcharoenpanich C., Kosulvit S., Krairiksh M. 5,8 GHz Notched UWB Bidirectional Elliptical Ring Antenna Excited by Circular Monopole with Curved Slot // Microwave Conference. APMC 2007. 2007. P. 1–4.

25. Kalteh A. A., Fallahi R., Roozbahani M. G. A Novel Microstrip-Fed UWB Circular Slot Antenna with 5-GHz Band-Notch Characteristics // Proceedings of the 2008 IEEE international conference on ultra-wideband (ICUWB2008). 2008. V. 1. P. 117–120.

26. Kalteh A. A., Fallahi R., Roozbahani M. G. 5-GHz Band-Notched UWB Elliptical Slot Antenna Fed by Microstrip Line // Microwave Symposium (MMS). 2010. P. 444–447.

27. Tang I. T., Lin D. B., Liou G. H., Horng J. H. Miniaturized 5.2 GHz Notched UWB CPW-fed Antenna Using Dual Reverse Split Trapezoid Slots // Microwave and Optical Technology Letters. 2008. V. 50, N. 3. P. 652–655.

28. Tang M. C., Xiao S., Deng T., Wang D., Guan J., Wang B., Ge G. D. Compact UWB Antenna With Multiple Band-Notches for WiMAX and WLAN // IEEE transactions on antennas and propagation. 2011. V. 59, N 4. P. 1372–1376.

29. **Panda J. R., Kshetrimayum R. S.** A Compact 3,5/5,5 GHz Dual Band-Notched Monopole Antenna For Application In UWB Communication Systems With Defected Ground Structure // A Workshop on Advanced Antenna Technology. 2010 Indian Antenna Week. 2010. P. 1–7.

30. Li W. T., Shi X. W., Hei Y. Q. Novel Planar UWB Monopole Antenna With Triple Band-Notched Characteristics // IEEE antennas and wireless propagation letters. 2009. V. 8. P. 1094—1098.

31. **Abbosh A. M.** Design of a CPW-Fed Band-Notched UWB Antenna Using a Feeder-Embedded Slotline Resonator // Hindawi Publishing Corporation International, Journal of Antennas and Propagation. 2008. Article ID 564317. P. 1–5.

32. **EBDONATERT EP1684382A1.** Small ultra wideband antenna having unidirectional radiation pattern / Kwon D.-H. / 26.07.2006.

33. Kwon D.-H., Balzovsky E. V., Buyanov Y. I., Kim Y., Koshelev V. I. Small Printed Ultra-Wideband Antennas Combining Electric- and Magnetic-Type Radiators // Ultra-Wideband, Short Pulse Electromagnetics. 2010. 9. Part 8. P. 425–431.

34. Lu Z., Cheng-Li R., Shi-Wei Q. A Novel Broad-band Slot Antenna Fed by CPW // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2006. P. 2583–2586. 35. Li K., Kurltat D., Tong K. F., Matsui T. Back-Fed Coplanar Patch Antennas // Proc. of 33rd European Microwave Conference — Munich, 2003. P. 1381–1384.

36. **Abbosh A. M., Białkowski M. E.** Uniplanar CPW-fed slot/microstrip antenna dor X-band applications // Antennas and Propagation Society International Symposium, AP-S. 2008. P. 1–4.

37. Roblin C., Laheurte J. M., D'Errico R., Gati A., Lautru D., Alvès T., Terchoune H., Bouttout F. Antenna design and channel modeling in the BAN context — part I: antennas // Ann. Telecommun. 2011. N 66. P. 139—155.

38. Kan H. K., Waterhouse R. B., Abbosh A. M., Bialkowski M. E. Simple Broadband Planar CPW-Fed Quasi-Yagi Antenna // IEEE antennas and wireless propagation letters. 2007. V. 6. P. 18–20.

39. Weinmann F. Planar 9-Element Quasi-Yagi Antenna Array for X-Band Application // European Conference on Wireless Technologies (ECWT). 2005. P. 539–542.

40. Eldek A. A., Elsherbeni A. Z., Smith C. E. Wide-Band Modified Printed Bow-Tie Antenna With Single and Dual Polarization for C- and X-Band Applications // IEEE transactions on antennas and propagation. 2005. V. 53, N 9. P. 3067–3072.

41. El-Damak A. R., Ghali H., Ragaie H. F. Circularly Polarized Fractal Slot Antenna // European Microwave Conference. 2005.

42. **Naghshvarian-Jahromi M.** Novel Wideband Planar Fractal Monopole Antenna // IEEE transactions on antennas and propagation. 2008. V. 56, N 12. P. 3844–3849.

43. Elsheakh D. N., Elsadek H. A., Abdallah E. A., Elhenawy H., Iskander M. F. Enhancement of Microstrip Monopole Antenna Bandwidth by Using EBG Structures // IEEE antennas and wire-less propagation letters. 2009. V. 8. P. 959–962.

44. Elsheakh D. N., Elsadek H. A., Abdallah E. A., Iskander M. F., Elhenawy H. Ultrawide Bandwidth Umbrella-Shaped Microstrip Monopole Antenna Using Spiral Artificial Magnetic Conductor (SAMC) // IEEE antennas and wireless propagation letters. 2009. V. 8. P. 1255–1258.

45. Мальцев П. П., Матвеенко О. С., Гнатюк Д. Л., Лисицкий А. П., Федоров Ю. В. Обзор реализаций планарных встроенных антенн диапазона 5 ГГц с минимальным объемом // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 10. С. 39—46.

46. Мальцев П. П., Матвеенко О. С., Гнатюк Д. Л., Лисицкий А. П., Федоров Ю. В. Направления развития антенн диапазона 5 ГГц с минимальным объемом // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 11. С. 45—53. **Keywords:** nanobioinformation system, fluorescent nanobiomarkers, nanoparticle, diagnosis of tumors, the semiconductor nanocrystals

Rathkeen L. S. *Nanotechnological Schools of Russia: Stages of Development & International Cooperation*. 15 October 5–7, 2011 at Academician physical-technological university – scientific & educational centre of nanotechnologies of Russian academy of sciences (Sankt-Petersburg) under the Chairmanship of the President of Russian nanotechnological society (RNS) Victor A. Bykov, Doctor of Science (Tech.), was organized scientific & practical conference of RNS "Russian nanotechnologies on world market: experience of success & cooperation, problems & prospective", on which were presented reports by different directions of brunch development in Russia.

Keywords: Russian academy of sciences (RAS), Russian nanotechnological society (RNS), nanomaterials, nanotechnologies, nanoeducation, nanoindustry, surface-active meanings (SAM), nanotubes, nanoparticles, nanocomposites

Keywords: thin-film nano- and microelectromechanical systems (NaMEMS), time stability, temperature, deformation, criterion, pressure sensor, identical tensometric element

Implentation of gyro-free inertial navigation system (INS) on basis of distributed set of 12 accelerometers is proposed. If compared to the classic INS implemented on basis of 6-sensors model the proposed 12-sensors variant has more accurate characteristics of navigation parameters calculation (coordinates and angle velocity).

Keywords: inertial navigation systems, gyro-free inertial navigation systems

Mechanical and regulational characteristics for simple and composite a piezoactuators for parallel and coded control are proposed. Transfer functions of a piezomotors for parallel and coded control are obtained. **Keywords:** mechanical and regulational characteristics, simple and composit a piezoactuator, parallel and coded control, transfer functions

Keywords: microsystem technics, bending rigidity of an executive element, deformation, measuring dynamic indentation, dependence "loading-deformation"

Maltsev P. P., Matveenko O. S., Gnatyuk D. L., Lisitskiy A. P., Fedorov Yu. V., Bunegina S. L., Krapuchin D. V. *Review of Implementation of Planar X-Band Antennas with Two Metallization Layers* . . 45 Development results of flat antennas with double-sided metallization for ultra wide band systems are examined. Realization of flat dipoles and Uda—Yagi antennas is analyzed. It is demonstrated that the most effective way to reduce antenna size is optimization of topology of patch and ground conductor.

Keywords: UWB antenna, X-band, planar antenna, monopole, coplanar, Uda—Yagi antenna, fractal, metamaterial

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 Е. В. Комиссарова

Сдано в набор 20.02.2012. Подписано в печать 22.03.2012. Формат 60×88 1/8. Заказ МС412.

Цена договорная Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнз».

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