

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 11(136) ✧ 2011

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

Издается с 1999 г.

Главный редактор
Мальцев П. П.

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.
Андривский 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 А. А.
Норенков И. П.
Панич А. Е.
Панфилов Ю. В.
Петросьянц 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

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Астахов М. В., Филонов М. Р., Ягодкин Ю. Д., Саркисов П. Д., Юртов Е. В.
О реализации проектов подготовки кадров в области функциональных и конст-
рукционных наноматериалов 2

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ

Белкин Л. М., Белкин М. Е. Применение оптоэлектронного подхода для преобра-
зования и размножения частот сигналов сверхвысокочастотного диапазона. 4
Васильев В. А., Чернов П. С. Диффузионная модель роста и морфология по-
верхностей тонких пленок материалов 11
Абрамов И. И., Коломейцева Н. В. Моделирование резонансно-туннельного
диода на основе Si/SiGe 16

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Соколов Л. В., Парфенов Н. М. Технологические особенности формирования
трехмерных МЭМС 19
Аверин И. А., Печерская Р. М., Пронин И. А. Особенности низкотемператур-
ной самоорганизации золей на основе двухкомпонентных систем диоксид
кремния—диоксид олова 27
Раткин Л. С. Перспективы разработки и освоения производства нано-
материалов. 30

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Сопильняк А. А., Фетисов Ю. К., Лебедев С. В., Сегалла А. Г. Пьезоэлектриче-
ский резонансный датчик магнитного поля на основе планарной биморфной
структуры с возбуждающей электромагнитной катушкой 33
**Тимошенков С. П., Плеханов В. Е., Анчутин С. А., Зарякин Н. М., Рубчиц В. Г.,
Дернов И. С., Шилов В. Ф., Кочурина Е. С.** Балансировка резонатора кольцевого
микромеханического гироскопа. 37

СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

Мальцев П. П., Матвеев О. В., Гнатюк Д. Л., Лисицкий А. П., Федоров Ю. В.
Направления развития антенн диапазона 5 ГГц с минимальным объемом 45

Информация 53

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".

ПОДПИСКА:

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

Адрес для переписки:
e-mail: nmst@novtex.ru

УДК 001.3

М. В. Астахов, д-р хим. наук, проф.,
М. Р. Филонов, Ю. Д. Ягодкин,
Национальный исследовательский
технологический университет "МИСиС",
e-mail: astahov@misis.ru,

П. Д. Саркисов, академик РАН,
Е. В. Юртов, чл.-корр. РАН, д-р хим. наук,
Российский химико-технологический
университет им. Д. И. Менделеева

О РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ В ОБЛАСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ И КОНСТРУКЦИОННЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Поступила в редакцию 18.07.2011

Рассматриваются вопросы, связанные с подготовкой и переподготовкой инженерных кадров для индустрии наносистем и материалов в рамках Федеральных образовательных стандартов третьего поколения.

Ключевые слова: инженерные кадры, наноиндустрия, наноматериалы, образовательные стандарты

Развитие нанотехнологий в России во многом будет определяться наличием высококвалифицированных кадров [1–3]. Важным шагом в решении данной задачи стало решение Министерства образования Российской Федерации (приказ № 2398 от 04.06.2003) об открытии в качестве эксперимента нового направления подготовки дипломированных специалистов "Нанотехнология" по специальностям "Наноматериалы" и "Нанотехнологии в электронике". Далее приказом Минобразования РФ № 1922 от 23.04.2004 г. было открыто направление подготовки бакалавров и магистров "Нанотехнология" и, наконец, приказом Минобрнауки РФ № 197 от 12.07.2005 направление подготовки "Нанотехнология" переведено из разряда экспериментальных в разряд действующих.

При переходе на двухуровневую систему подготовка кадров в бакалавриате для nanoиндустрии в настоящее время планируется по направлениям:

- Электроника и наноэлектроника.
- Нанотехнологии и микросистемная техника.
- Наноинженерия.

Однако в этом списке отсутствует направление "Наноматериалы", хотя наноматериалы являются основным материальным элементом всей nanoиндустрии, и подготовку кадров по данному направлению отличают более глубокие знания в области физико-химии и материаловедения, а также изучение и освоение специфических методов исследования и производства наноматериалов. Следует также отметить, что из девяти тематических направлений Национальной нанотехнологической сети (ННС), определенных Постановлением Правительства РФ от 2 августа 2007 г. № 498, пять содержат термин "наноматериалы".

НИТУ "МИСиС" и РХТУ им. Д. И. Менделеева подготовили и сдали в Федеральное агентство по образованию РФ учебно-методическую документацию по таким важнейшим тематическим направлениям ННС, как "Конструкционные наноматериалы" и "Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества". НИТУ "МИСиС" также разработаны в 2009 г. учебно-методические материалы и примерный учебный план подготовки магистров по магистерской программе "Конструкционные наноматериалы" в рамках Университета Шанхайской организации сотрудничества (ШОС) Российской Федерации по направлению подготовки "Нанотехнологии".

В подготовке кадров в области наноматериалов заинтересованы предприятия и организации ННС, а также ГК "Роснанотех". На заседаниях Учебно-методического совета по направлению "Нанотехнология" и на совещании ректоров и руководителей Научно-образовательных центров по данному направлению признано целесообразным поставить вопрос о выделении подготовки кадров в области наноматериалов в самостоятельное направление. Таким образом, чрезвычайно актуальным является вопрос об открытии направления подготовки бакалавров и магистров "Наноматериалы".

На сегодняшний день НИТУ "МИСиС" и РХТУ им. Д. И. Менделеева продолжает подготовку специалистов в рамках направления "Нанотехнология" по специальности "Наноматериалы". В этих и других российских вузах уже подготовлено более 300 специалистов. Всего таких вузов более сорока. И эта работа будет продолжаться еще в течение 5 лет. Вузами накоплен достаточный опыт в подготовке таких кадров, причем этот процесс продолжает развиваться и совершенствоваться.

Как известно, основой реформирования высшего образования нашей страны в ближайшее десятилетие, в том числе в области наноматериалов, станет внедрение в практику работы вузов компетентностного подхода [4, 5]. Конечно, компетенции выпускника вуза должны соответствовать профессиональным стандартам работников nanoиндустрии, отсутствующим в настоящее время. Разработка концепции такого стандарта — достаточно сложная, но чрезвычайно актуальная задача. Эта задача сейчас решается Госкорпорацией "Роснано" совместно с представителями научно-педагогической общественности и предприятий.

Чрезвычайно остро стоит в настоящее время и вопрос о переподготовке и повышении квалификации кадров в области наноматериалов и нанотехнологий, что является обязательным условием формирования национальной системы непрерывного образования для nanoиндустрии.

В 2005—2006 гг. ведущие российские вузы (НИТУ "МИСиС, РХТУ им. Д. И. Менделеева, СПбГЭТУ, МИЭТ) в рамках Федеральной целевой научно-технической программы (ФЦНТП) "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2002—2006 годы" выполнили Госконтракты, предусматривающие разработку новых образовательных профессиональных программ подготовки магистров и научных кадров, а также переподготовки специалистов в рамках приоритетного направления "Индустрия наносистем и материалы", а также научно-методического обеспечения апробации и распространения комплекта учебно-методической документации для подготовки кандидатов наук, магистров и переподготовки специалистов в рамках данного приоритетного направления. Таким образом, практически сформирована правовая и методическая база подготовки и переподготовки кадров в области nanoиндустрии и началась ее реализация.

В целях повышения мотивации молодежи к работам в области наноматериалов НИТУ "МИСиС" и РХТУ им. Д. И. Менделеева в 2009 и 2010 гг. провели Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов вузов в области нанотехнологий и наноматериалов по разделам "Конструкционные наноматериалы" и "Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества". В 2009 г. по заданию Департамента образования г. Москвы и Московского комитета по науке и технологиям рядом вузов, и прежде всего НИТУ "МИСиС" и РХТУ им. Д. И. Менделеева, разработаны и освоены лабораторные работы для передвигного учебного класса "Наноматериалы и нанотехнологии".

В соответствии с решением Правительства Москвы на базе НИТУ "МИСИС" при участии вузов и ведущих предприятий национальной нанотехнологической сети России создана постоянно действующая выставка "Наноматериалы и нанотехноло-

гии". Основная цель выставки — демонстрация достижений московских ученых и специалистов в области наноматериалов и нанотехнологий, а также организация информационного обмена между разработчиками, потребителями и инвесторами. Данная выставка также является чрезвычайно удобной площадкой для профессионально-ориентированных совещаний, круглых столов и семинаров, в том числе учебного характера.

Указанные выше мероприятия конечно способствуют более эффективной подготовке и переподготовке кадров в области функциональных и конструкционных наноматериалов. Однако остается и целый ряд нерешенных проблем, в частности, научно-обоснованного прогноза количественного и качественного состава необходимого рынка образовательных услуг, совершенствования материально-технической базы вузов, формирования информационно-аналитических систем nanoиндустрии, в том числе в сфере современных образовательных технологий и др. [1].

В связи с этим НИТУ "МИСиС", в качестве головной организации, совместно со специалистами других ведущих вузов (РХТУ им. Д. И. Менделеева, СПбГЭТУ, МАТИ им. К. Э. Циолковского и др.) разработал на инициативной основе проект ФГОС по направлению "Наноматериалы" для подготовки бакалавров и магистров.

Благодаря поддержке департамента образовательных программ РОСНАНО, Нанотехнологическому обществу России, учебным и научно-исследовательским институтам, промышленным предприятиям Министерство образования и науки в мае этого года приняло решение об открытии направления подготовки бакалавров и магистров "Наноматериалы", набор на которое будет осуществляться с 2012 года. Авторы искренне благодарят все организации, которые прислали письма поддержки в Министерство науки и образования РФ.

Список литературы

1. Иванов А., Корляков А., Лучинин В., Таиров Ю. Профессионально ориентированное кадровое обеспечение nanoиндустрии // Nanoиндустрия. 2009. № 4. С. 77—81.
2. Лучинин В. В. Nanoиндустрия и "человеческий капитал" // Nanoиндустрия. 2007. № 6. С. 2—9.
3. Ягодкин Ю. Д., Астахов М. В., Филонов М. Р., Аксенов А. А. Развитие кадровой и информационно-аналитической составляющей инфраструктуры nanoиндустрии // Перспективные материалы. 2008. Спец. выпуск (6), ч. 2. С. 426—429.
4. Соловьев В. П. Компетентностная модель выпускника // Высшее образование сегодня. 2007. № 9. С. 76—78.
5. Соловьев В. П., Золотарева Н. М., Ягодкин Ю. Д. Алгоритмы проектирования бакалаврских и магистерских образовательных программ нового поколения // Тр. Всерос. науч.-практич. конф. "Информационные технологии в обеспечении нового качества высшего образования (14—15 апреля 2010 г., Москва, НИТУ "МИСиС)". Кн. 2. М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2010. С. 209—214.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 621.373, 621.391.64

Л. М. Белкин, М. Е. Белкин,
Московский государственный технический
университет радиотехники, электроники и
автоматики (МГТУ МИРЭА),
e-mail: belkin@mirea.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ПОДХОДА ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И РАЗМНОЖЕНИЯ ЧАСТОТ СИГНАЛОВ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

Поступила в редакцию 23.08.2011

Теоретически и экспериментально исследуется экономичная схема построения оптоэлектронного преобразователя частоты на базе поверхностно излучающего лазера с вертикальным резонатором (VCSEL). Приводятся результаты разработки моделей, описывающих его работу в режимах преобразования (ОЭПЧ) и размножения (ОЭРЧ) частот СВЧ диапазона, и расчета ключевого параметра преобразователя частоты — потерь преобразования. Согласно результатам расчетов и близким к ним экспериментальным данным, полученным с помощью разработанных макетов S-диапазона, потери повышающего преобразования ОЭПЧ составляют около 36 дБ, а ОЭРЧ — около 45 дБ. Рассматривается пример построения на базе ОЭРЧ экономической схемы обратного канала базовой станции перспективной телекоммуникационной системы волоконно-эфирной структуры.

Ключевые слова: *сверхвысокочастотная оптоэлектроника, поверхностно излучающий лазер с вертикальным резонатором (VCSEL), оптоэлектронный преобразователь частоты, волоконно-эфирная телекоммуникационная система (RoF)*

Введение

Ключевым узлом передающих и приемных устройств современных радиосистем сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона, во многом определяющим их общие технико-экономические показатели, считается преобразователь частоты, принципиальными структурными элементами которого

являются, как известно, смеситель и гетеродин [1]. В связи с этим исследованиям теоретических и практических аспектов их функционирования, а также схем построения посвящено огромное количество публикаций в периодической и книжной научной литературе. Традиционное направление развития данного узла в СВЧ аппаратуре состоит в использовании технологии монолитных интегральных схем повышенного уровня функциональности [2, 3]. Такой подход может быть назван микроэлектронным. Перспективным альтернативным путем совершенствования принципов построения приборов и устройств СВЧ диапазона на сегодняшний день считается оптоэлектронный подход, позволяющий преодолеть фундаментальные частотные ограничения активных полупроводниковых приборов [4].

Построенный на этом принципе оптоэлектронный преобразователь частоты (ОЭПЧ) СВЧ сигналов представляет собой новый, пока еще слабо изученный, класс приборов сверхвысокочастотной оптоэлектроники [5]. Принципиальным достоинством ОЭПЧ считается предельная широкополосность, недостижимая для традиционных транзисторных и диодных преобразователей частоты СВЧ диапазона. Тем не менее, вследствие чрезмерно высоких потерь преобразования ОЭПЧ пока не может конкурировать с существующими преобразователями частоты даже в монолитном исполнении. Наибольший выигрыш ОЭПЧ по сравнению с преобразователями на МИС можно ожидать в диапазоне крайне высоких частот (КВЧ: 30...300 ГГц) и в терагерцевом диапазоне (0,3...3 ТГц), где традиционные преобразователи частоты на СВЧ диодах и транзисторах имеют существенно худшие технико-экономические показатели по сравнению с более низкими частотными диапазонами [4]. Однако в настоящее время оптоэлектронная компонентная база с такими сверхширокими полосами пропускания находится на уровне лабораторных исследований, поэтому представляет интерес исследование фундаментальных свойств ОЭПЧ данного класса для преобразования частоты в нижней части СВЧ диапазона.

Цель данной статьи — анализ существующих схем построения ОЭПЧ, моделирование и экспериментальное исследование наиболее экономичной схемы ОЭПЧ с использованием нелинейности

характеристики электрооптического преобразования полупроводникового лазерного излучателя (ПЛИ), а также его упрощенного варианта построения, названного оптоэлектронным размножителем частот (ОЭРЧ) СВЧ диапазона.

Анализ схем построения оптоэлектронного преобразователя частоты

Принцип преобразования частоты в ОЭПЧ остается традиционным: за счет смешения на нелинейном элементе входного сигнала и сигнала опорного генератора. На начальном этапе исследований были сделаны попытки формирования радиосигнала за счет смешения в фотодетекторе двух немодулированных сигналов лазерных излучателей с разностью частот оптических несущих в СВЧ диапазоне [6]. Однако при реализации ОЭПЧ данного типа на полупроводниковых лазерах возникают значительные технико-экономические трудности, поэтому в настоящее время в качестве входного и опорного сигналов предпочтительно используются сигналы СВЧ генераторов соответствующих частот [5]. Анализ существующих схем построения ОЭПЧ показывает, что для генерации продуктов нелинейного смешения в них исследованы следующие эффекты:

- прямая модуляция ПЛИ [7];
- внешняя модуляция пассивного электрооптического модулятора [8, 9];
- управление характеристикой передачи полупроводникового лазерного усилителя [10];
- управление характеристикой оптико-электрического преобразования фотодиода [11];
- комбинация указанных выше эффектов [5, 10].

В свою очередь, проведенный анализ результатов экспериментальных исследований показал, что среди известных схем ОЭПЧ наиболее простой для реализации является схема с использованием внешнего модулятора, а наибольшую эффективность по критерию параметры/цена имеет подход с использованием прямой модуляции по интенсивности излучения ПЛИ, особенно в случае применения поверхностно-излучающего лазера с вертикальным резонатором типа VCSEL [12].

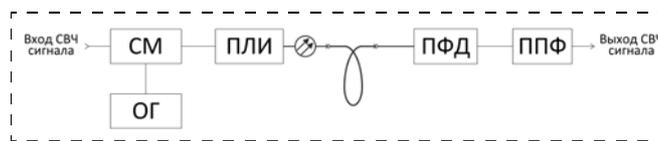


Рис. 1. Структурная схема оптоэлектронного преобразователя частоты СВЧ сигнала с использованием нелинейности лазерного излучателя

Моделирование оптоэлектронного преобразователя частоты сигналов СВЧ диапазона

Структурная схема варианта ОЭПЧ с использованием в качестве нелинейного элемента полупроводникового лазерного излучателя представлена на рис. 1.

На приведенной схеме входной сигнал и сигнал от опорного генератора (ОГ) смешиваются в пассивном сумматоре мощности (СМ). Смешанный СВЧ сигнал поступает на управляющий вход ПЛИ. Модулированное им оптическое излучение передается с помощью короткого отрезка волокна и детектируется полупроводниковым фотодетектором (ПФД). Сигнал преобразованной частоты выделяется из спектра радиосигналов с помощью полосно-пропускающего фильтра (ППФ).

Моделирование характеристик схемы ОЭПЧ проводилось с помощью специализированной оптоэлектронной САПР *VPItransmission Maker™* фирмы *VPI Systems*. В данной САПР общую модель устройства можно разработать, выбирая из библиотеки встроенные модели необходимых для построения его схемы оптоэлектронных, оптических либо электронных элементов, что значительно сокращает время и упрощает процесс моделирования. Реализация схемы ОЭПЧ (рис. 1) на базе ПЛИ типа VCSEL в данном программном пакете представлена на рис. 2.

В процессе моделирования рассчитывался ключевой параметр преобразователя частоты — потери преобразования. В данном случае это разность мощностей в децибелах на модулирующем

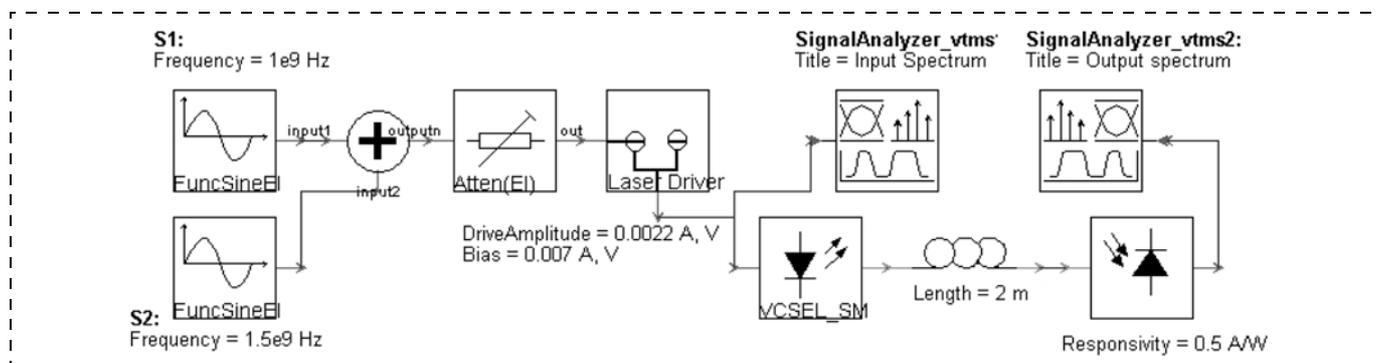


Рис. 2. Реализация модели ОЭПЧ с использованием нелинейности характеристики электрооптического преобразования лазера типа VCSEL в программном пакете *VPItransmission Maker™*

Моделирование оптоэлектронного размножителя частоты СВЧ диапазона

В целях дальнейшего повышения экономичности исследуемого в данной работе ОЭПЧ на базе лазера типа VCSEL был предложен и исследован его упрощенный вариант, названный оптоэлектронный размножитель частот (ОЭРЧ). Схема его реализации представляет собой ОЭПЧ (см. рис. 1), в котором отсутствуют опорный генератор и сумматор мощности. Суть предложенного подхода заключается в использовании известного в лазерной физике эффекта удвоения периода [14] при модуляции полупроводникового лазера мощным синусоидальным сигналом. При этом в спектре его излучения помимо основной частоты модуляции и ее высших гармоник появляются субгармоники и продукты их смешения с основной частотой и гармониками. Путем моделирования нам удалось подобрать такой режим работы лазера, чтобы уровни сигналов основной модулирующей частоты F , субгармоники $0,5F$ и продукта на частоте $1,5F$ получились примерно одинаковыми и достаточной величины, чтобы обеспечить требуемое в системах радиосвязи отношение сигнал/шум. Для наблюдения эффекта удвоения периода необходимо, чтобы лазер модулировался в режиме сверхбольшого сигнала: с отсечкой тока накачки, что подобно режиму класса C в электронном усилителе. При этом рабочую точку надо выбирать либо в припороговой области, либо на начальном участке квазилинейной области ВТАХ лазера.

Аналитическая модель VCSEL в режиме сверхбольшого модулирующего сигнала. Как известно [15], работа одномодового полупроводникового квантоворазмерного лазера, в данном случае исследуемого VCSEL, стандартно описывается системой скоростных уравнений количества носителей заряда в активной области, количества носителей заряда в барьерных слоях и количества фотонов на выходе лазера. Эти уравнения были решены в программном пакете MathCAD с помощью распространенного BDF-метода¹ путем варьирования геометрических, электро- и оптико-физических параметров лазерного кристалла. Данный метод является предпочтительным для так называемых жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений с большим числом шагов дифференцирования и малым шагом по времени. Решениями данной системы являются временные зависимости числа зарядов в активной и запирающей областях VCSEL и числа фотонов на выходе лазера. Последняя зависимость преобразуется в выходную оптическую мощность, и далее, с помощью быстрого преобразования Фурье, в ее спектральную характеристику. Для удобства сравнения с другими аналогичными результатами частота модулирующего сигнала нормируется по частоте электрон-фотонного резонанса исследуемого лазерного излучателя.

¹ Backward Differentiation Formula.

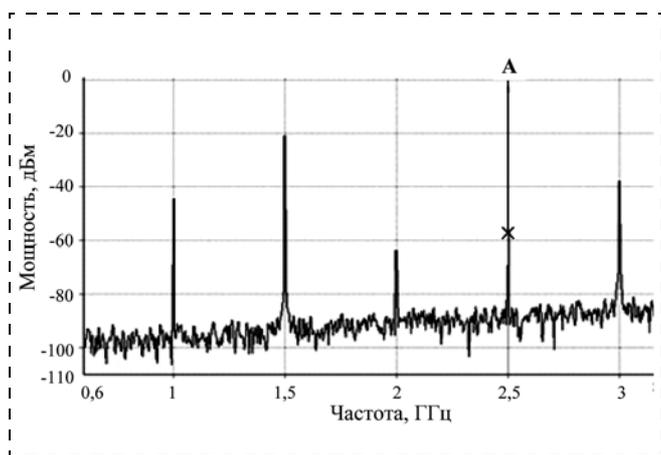


Рис. 3. Спектр сигналов на выходе ОЭПЧ S-диапазона с использованием нелинейности ПЛИ на базе VCSEL

входе ПЛИ на частоте входного сигнала и мощности на выходе фотодетектора на частоте выходного сигнала. С учетом полосы модуляции VCSEL [12] потери преобразования исследовали для выходных частот в дециметровом диапазоне волн. А именно, входной сигнал подавался на частоте 1 ГГц с мощностью -20 дБм, а гетеродинный сигнал — на частоте 1,5 ГГц с мощностью 6 дБм.

Рассчитанные спектры сигналов на выходе исследуемого ОЭПЧ представлены на рис. 3. Как следует из рисунка, мощность преобразованного выходного сигнала (маркер A) составляет -56 дБм на частоте 2,5 ГГц. То есть потери преобразования составили 36 дБ.

Таким образом, оптоэлектронный преобразователь частоты сигналов СВЧ диапазона имеет существенно большие потери преобразования по сравнению с традиционными устройствами на основе СВЧ транзисторов и диодов. Однако благодаря его принципиальной широкополосности (определяется исключительно полосой модуляции лазера и фотодетектора) в ОЭПЧ отсутствует свойственный микроэлектронным преобразователям частоты СВЧ диапазона эффект увеличения потерь по мере повышения рабочей частоты. Данный постулат подтверждается результатами теоретических и экспериментальных исследований ОЭПЧ X-диапазона (8...12 ГГц) с использованием традиционного типа полупроводникового лазера с горизонтальным каналом и торцевым излучением [13]. А именно, подтвержденные экспериментом расчетные потери получились даже несколько меньше: 33 дБ на 10 ГГц. Однако, чтобы реализовать такие потери, для последнего варианта требуется на 14 дБ (в 25 раз) большая мощность гетеродина. Достоинством ОЭПЧ также является универсальность применения вследствие одинаковых схем повышающего и понижающего преобразователей частоты.

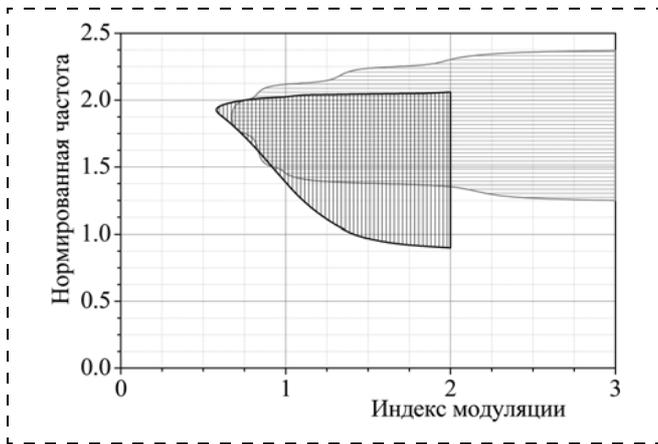


Рис. 4. Диаграмма для определения границ области эффективного режима размножения частот модуляции

По результатам модельных экспериментов на рис. 4 приведена двумерная диаграмма, характеризующая область эффективного режима размножения² частот модуляции (горизонтальная штриховка) в координатах "нормированная частота модуляции — индекс токовой модуляции" (здесь это отношение амплитуды переменной составляющей модулирующего тока к постоянному току смещения). Как следует из рисунка, эффективный процесс удвоения периода с уровнями близких субгармоник и продуктов смешения одного порядка с уровнем фундаментальной частоты возникает в ограниченном диапазоне токов постоянного смещения, а также амплитуд тока (мощности) и частот модулирующего сигнала. Причем он генерируется на частотах модуляции, превышающих частоту электрон-фотонного резонанса (и полосу модуляции) лазера, при индексах модуляции около либо более 1. Полученные результаты соответствуют известным данным. В частности, на том же рисунке представлены результаты моделирования эффекта удвоения периода (область с вертикальной штриховкой) для лазера с торцевым излучением [14]. Относительно большая область перекрытия³ свидетельствует о корректности разработанной модели.

Объектно-ориентированная модель ОЭРЧ. Полученные по результатам моделирования в пакете MathCAD данные о границах области эффективного режима размножения частот модуляции исследуемого VCSEL послужили основой для моделирования работы ОЭРЧ сигналов СВЧ диапазона с помощью использованной при моделировании ОЭПЧ САПР *VPTransmission Maker*TM. Разработанная модель представлена на рис. 5.

² Разница мощностей сигналов основной модулирующей частоты F , субгармоники на частоте $0,5F$ и продукта смешения на частоте $1,5F$ — не более 10 дБ.

³ В цитируемой статье исследование ограничено индексом модуляции 2.

Согласно рисунку в состав модели ОЭРЧ входят модель исследуемого лазера, модель фотодетектора, представляющего собой $p-i-n$ -фотодиод, полоса пропускания которого существенно больше верхней частоты рабочей полосы частот ОЭРЧ, и модель соединительного оптического тракта Att, в данном случае описывающая только потери при стыковке лазера и фотодетектора с коротким волокном. Для обеспечения соответствующего режима работы по постоянному и переменному токам лазерный диод смещается в прямом направлении с помощью модели лазерного драйвера. Через этот драйвер к лазеру подсоединена модель генератора синусоидального сигнала соответствующей амплитуды и частоты. Выход ОЭРЧ связан с моделью анализатора спектра радиочастотного диапазона. Для моделирования лазерного излучателя выбрана специальная библиотечная модель VCSEL, основанная так же, как и наша аналитическая модель, на одномодовых скоростных уравнениях. Однако в отличие от последней в ней дополнительно учитываются термодинамические эффекты, шумы, различные рекомбинационные модели, что делает ее более корректной.

С помощью описанной выше модели был проведен комплекс модельных экспериментов по исследованию характеристик ОЭРЧ при различных токах смещения, амплитудах и частотах модулирующего сигнала в границах области, обозначенной на рис. 4, целью эксперимента был выбор оптимального режима работы данного устройства. Пример результатов численного моделирования спектра на выходе исследуемого ОЭРЧ при частоте входного сигнала $f_m = 3$ ГГц представлен на рис. 6.

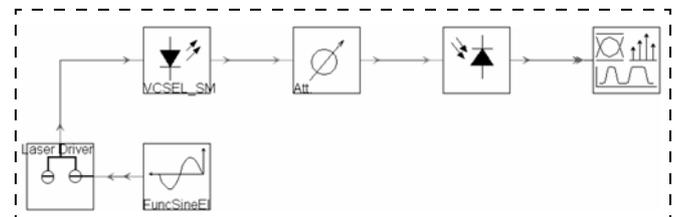


Рис. 5. Модель оптоэлектронного размножителя частот сигналов СВЧ диапазона

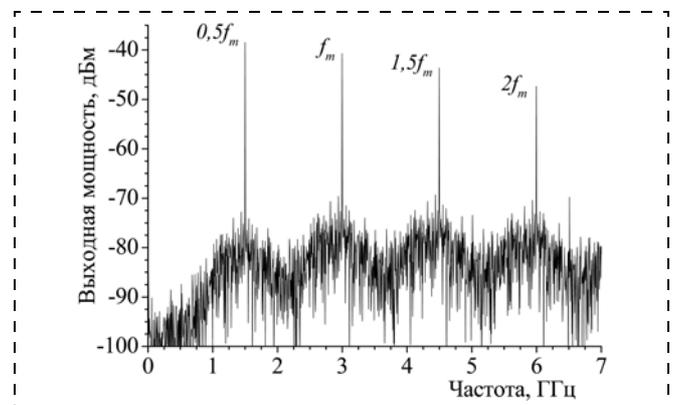


Рис. 6. Рассчитанная с помощью САПР *VPTransmission Maker* спектральная характеристика исследуемого оптоэлектронного размножителя частот СВЧ диапазона

Как следует из рисунка, в спектре помимо основной частоты и ее второй гармоники ($2f_m$) также наблюдаются отклики на частотах субгармоники ($0,5f_m$) и продукта смещения основной частоты и субгармоники ($1,5f_m$). Причем мощность сигнала субгармоники примерно на 3 дБ выше, а мощность на частоте $1,5f_m$ примерно на 3 дБ ниже мощности выходного сигнала основной частоты. Поскольку рассматриваемый ОЭРЧ представляет собой разновидность оптоэлектронного преобразователя частоты, то правомерно считать, что его ключевым параметром также являются потери преобразования. В показанной на рис. 6 реализации мощность входного (модулирующего) сигнала составляла около 0 дБм. Следовательно, потери двукратного понижающего преобразования получаются 38 дБ, а потери 1,5-кратного повышающего преобразования — около 44 дБ. Учитывая результаты других измерений в границах частот модуляции и амплитуд модулирующих токов, соответствующих рис. 4, можно обобщить: потери преобразования ОЭРЧ находятся в диапазоне 35...45 дБ.

Экспериментальное подтверждение

Для верификации результатов моделирования было проведено макетирование и экспериментальное исследование описанных выше оптоэлектронных преобразователя и размножителя частот СВЧ диапазона. Для обоих макетов использовался работающий в спектральном диапазоне в районе 1,3 мкм бескорпусной VCSEL сплавной конструкции производства фирмы *BeamExpress, SA*, Швейцария⁴ и фотодиодный модуль (ФДМ) $p-i-n$ -типа с полосой 50 ГГц производства фирмы *u2t Photonics*, Германия⁵. Структурная схема измерительной установки соответствует схеме на рис. 1, ее общий вид представлен на рис. 7. В схеме соответствующие СВЧ сигналы подаются на модулирующий вход ПЛИ либо через сумматор мощности СМ, либо непосредственно. Постоянный ток смещения на VCSEL подводится с помощью коаксиального адаптера питания (АП). Для обеспечения эффективной электрической связи с входными СВЧ сигналами и оптической связи с ФДМ кристалл VCSEL устанавливается в специальную измерительную камеру, закрепленную на юстировочном столике. Детали конструкции макета ПЛИ описаны в работе [16]. Введенный в волокно модулирован-

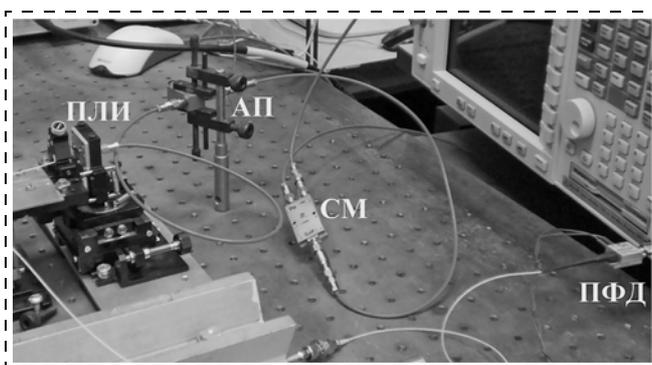


Рис. 7. Общий вид установки для измерения параметров макетов ОЭПЧ и ОЭРЧ

| | | | |
|------|---------------|-------|--------|
| ОЭПЧ | Моделирование | 36 дБ | Рис. 3 |
| | Эксперимент | 37 дБ | Рис. 8 |
| ОЭРЧ | Моделирование | 44 дБ | Рис. 6 |
| | Эксперимент | 46 дБ | Рис. 9 |

ный оптический сигнал детектируется в ПФД и поступает на вход радиочастотного анализатора спектра. В целях повышения информативности эксперимента показанный на рис. 1 полосовой фильтр не использовался.

Выходные спектры макетов ОЭПЧ и ОЭРЧ при аналогичных моделированию мощностях и частотах входных сигналов представлены соответственно на рис. 8 и 9.

Сравнение результатов моделирования и экспериментального исследования потерь преобразования макетов повышающих ОЭПЧ и ОЭРЧ приведено в таблице.

Близкое соответствие расчетных и экспериментальных данных свидетельствуют о корректности разработанных моделей ОЭПЧ и ОЭРЧ.

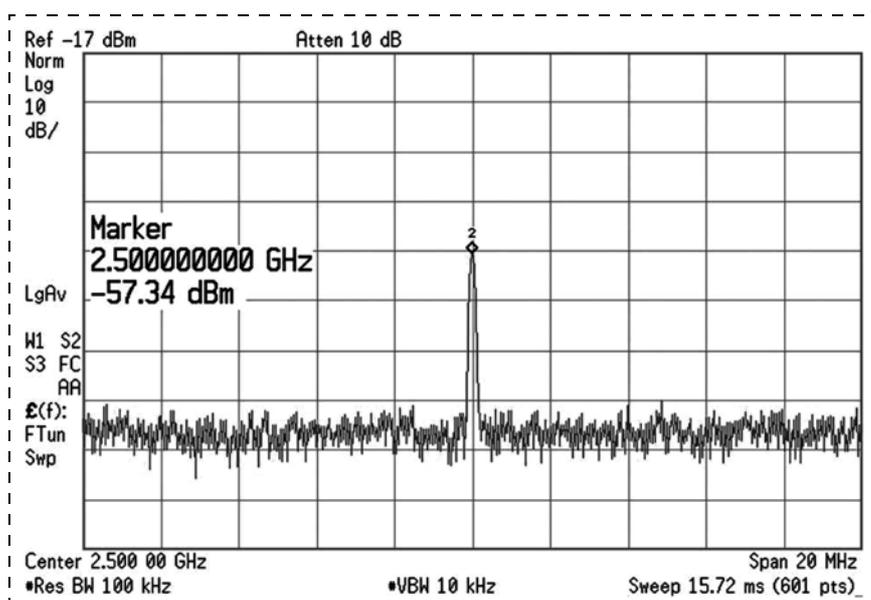


Рис. 8. Измеренный выходной спектр ОЭПЧ на VCSEL

⁴ www.beamexpress.com

⁵ www.u2t.com

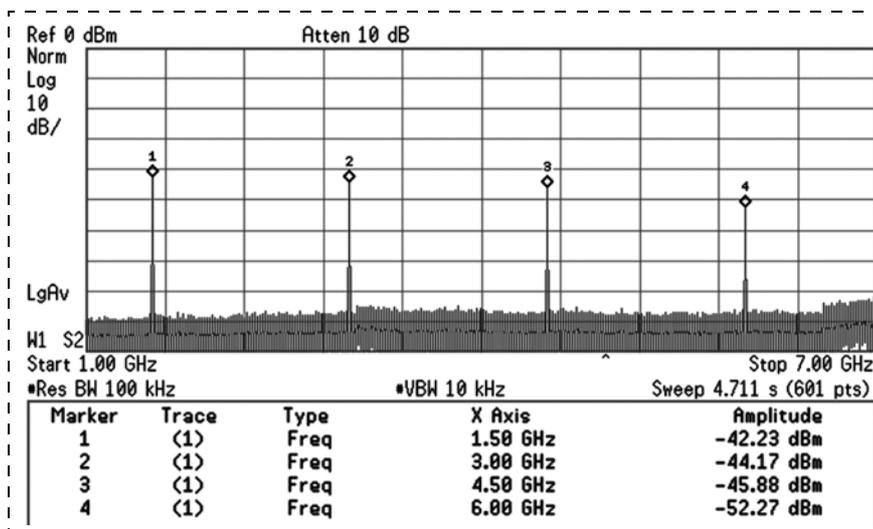


Рис. 9. Измеренный выходной спектр ОЭРЧ на VCSEL

Вариант применения оптоэлектронного размножителя частот

В отличие от преобразователя частоты практическое применение разработанного ОЭРЧ не очевидно, поэтому рассмотрим этот вопрос отдельно. Например, он может быть использован для упрощения схемы, улучшения экономических характеристик и упрощения требований к стабильности частоты местного гетеродинного сигнала в аппаратуре обратного канала базовой станции (БС) перспективных волоконно-эфирных телекоммуникационных систем, построенных на базе технологии RoF (*Radio-over-Fiber*) [17]. Пример реализации схемы обратного канала БС с использованием ОЭРЧ представлен на рис. 10 [17].

Основными элементами предложенной схемы обратного канала БС, в котором осуществляется преобразование радиосигнала от абонента сети в посылаемый на центральную станцию (ЦС) сигнал оптического диапазона, являются: антенна 1, принимающая от абонентского терминала модулированный СВЧ сигнал с несущей частотой 12 ГГц; смеситель с субгармонической накачкой [3] 2, выходной сигнал промежуточной частоты которого частотой $f_{\text{ПЧ}} = 3$ ГГц фильтруется с помощью по-

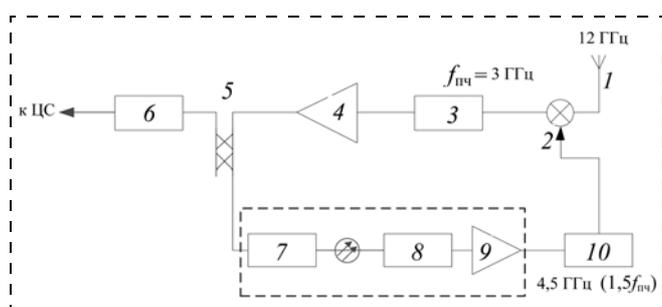


Рис. 10. Структурная схема построения обратного канала базовой станции системы класса RoF с использованием ОЭРЧ [17]

лосно-пропускающего фильтра 3, усиливается в усилителе промежуточных частот 4 и поступает на вход направленного ответвителя 5. Сигнал с отвода ответвителя 5 поступает на модулирующий вход служащего для ретрансляции оптического сигнала в направлении ЦС первого лазера 6, рабочая точка которого для уменьшения нелинейных искажений устанавливается в середине линейного участка его ватт-амперной характеристики. Сигнал с выхода ответвителя 5 поступает на вход ОЭРЧ, содержащий согласно приведенному выше описанию второй лазер 7, отрезок оптического волокна, фотодетектор 8 и полосовой усилитель 9, назначением которого является выделение и усиление

сигнала частотой $1,5f_{\text{ПЧ}} = 4,5$ ГГц. Выходной сигнал ОЭРЧ поступает на вход настроенной на частоту 4,5 ГГц схемы восстановления несущей 10, которая представляет собой стандартный узел приемного тракта цифровой радиосистемы и обычно строится на базе схемы фазовой автоподстройки (ФАП). Восстановленный в схеме 10 сигнал несущей подается на гетеродинный вход смесителя 2, в котором согласно принципу его работы [3] смешение осуществляется на частоте, в 2 раза большей частоты гетеродина.

Заключение

В данной статье теоретически и экспериментально были исследованы варианты устройств преобразования сигналов СВЧ диапазона, построенных на базе оптоэлектронного подхода, точнее на принципах сверхвысокочастотной оптоэлектроники. Принципиальным преимуществом оптоэлектронного преобразователя частоты считается предельная широкополосность, недостижимая для традиционных транзисторных и диодных преобразователей частоты СВЧ диапазона. В рамках исследования ключевого параметра ОЭПЧ — потерь преобразования, проведено моделирование с помощью САПР *VPItransmission Maker*TM, наиболее экономичного варианта его схемы с использованием нелинейности характеристики электрооптического преобразователя частоты полупроводникового лазерного излучателя, в качестве которого использован перспективный поверхностно излучающий лазер с вертикальным каналом (VCSEL). В целях дальнейшего повышения экономичности ОЭПЧ был предложен и исследован его упрощенный вариант, названный оптоэлектронным размножителем частот (ОЭРЧ), в котором используется известный в лазерной физике эффект удвоения периода при модуляции полупроводникового лазера мощным си-

нусоидальным сигналом. Согласно результатам расчетов и близким к ним экспериментальным данным, полученным с помощью разработанных макетов ОЭПЧ и ОЭРЧ S-диапазона, потери повышающего преобразования ОЭПЧ составляют около 36 дБ, а ОЭРЧ — около 45 дБ. Таким образом, оптоэлектронный преобразователь частоты сигналов СВЧ диапазона пока имеет существенно большие потери преобразования по сравнению с традиционными устройствами на основе СВЧ транзисторов и диодов. Однако благодаря его широкополосности, которая определяется исключительно полосой модуляции лазера и фотодетектора, в ОЭПЧ отсутствует свойственный микроэлектронным преобразователям частоты СВЧ диапазона эффект увеличения потерь по мере повышения рабочей частоты. Достоинством ОЭПЧ также является универсальность применения вследствие одинаковых схем повышающего и понижающего преобразователей частоты. Все сказанное свидетельствует о перспективности рассмотренного оптоэлектронного подхода для построения радиоаппаратуры сверхширокополосных систем телекоммуникационного и радиолокационного назначений, например пассивной радиолокации, а также измерительной техники.

Настоящая работа выполнена в рамках проекта по аналитической ведомственной целевой программе Минобрнауки "Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2011 годы)".

Список литературы

1. Гассанов Л. Г., Липатов А. А. и др. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи. М.: Радио и связь, 1988. 288 с.
2. Gunnarsson S. E., Ferndahl M., Zirath H. A 60 GHz compact single-chip sub-harmonically pumped receiver MMIC // Proc. of the 2nd European Microwave Integrated Circuits Conference. 2007. P. 8—11.
3. Белкин М. Е., Белкин Л. М. Особенности построения резистивных смесителей диапазона крайне высоких частот // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2010. Вып. 1(224). С. 98—104.
4. Seeds A. J., Fice M. J., Pozzi F. et al. Photonic-Enabled Microwave and Terahertz Communication Systems // Proc. of

International Conference on Optical Fiber Communication, OFC 2009. OtuE6. P. 1—3.

5. Yao J. Microwave Photonics // IEEE Journal of Lightwave Technology. 2009. Vol. 27, N 3. P. 314—335.

6. Robertson W. M. Optoelectronic Techniques for Microwave and Millimeter-Wave Engineering. Artech House, 1995. 244 p.

7. Constant S. B. et al. Low-cost all-optical up-conversion of digital radio signals using directly modulated 1550-nm emitting VCSEL // IEEE Technology Letters. 2008. Vol. 20, N 2. P. 120—122.

8. Lindsay A. C., Knight G. A., Winnall S. T. Photonic Mixers for Wide Bandwidth RF Receiver Applications // IEEE Transactions on MTT. 1995. Vol. 43, N 9. P. 2311—2317.

9. Polo V. et al. Millimetre-wave Optical Harmonic Mixer Employing a Single Mach-Zehnder Electro-Optic Modulator // Proc. of 28th European Microwave Conference, Amsterdam. 1998. P. 81—86.

10. Cabon B. et al. Photonic mixing in RF modulated optical link // In: Laser and Electro-Optic Symposium Proceedings, LEOS 2006. P. 408—409.

11. Malyshev S. A., Chizh A. I. P-i-n Photodiodes for Frequency Mixing in Radio-over-Fiber Systems // IEEE Journal of Lightwave Technology. 2007. Vol. 25, N 11. P. 3236—3243.

12. Белкин Л. М., Белкин М. Е. Бесструктурная модель поверхностно излучающего лазера с полосой модуляции в СВЧ диапазоне // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 10. С. 9—17.

13. Белкин М. Е., Белкин Л. М. Исследование оптоэлектронного преобразователя частоты сигналов СВЧ диапазона // Материалы IX научно-технической конференции "Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА", Звенигород, 1—3 декабря 2010. — М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2010. С. 68—72.

14. Hemery E., Chusseau L., Lourtioz J.-M. Dynamic Behaviors of Semiconductor Lasers under Strong Sinusoidal Current Modulation: Modeling and Experiments at 1.3 μm // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1990. Vol. 26, N 4. P. 633—641.

15. Piprek J., Bowers J. E. Analog modulation of semiconductor lasers // In book: RF Photonic Technology in Optical Fiber Links / Ed. by W. S. C. Chang. Cambridge University Press, 2002. P. 57—79.

16. Белкин М. Е., Белкин Л. М. Исследование характеристики времени задержки включения поверхностно-излучающего лазера с вертикальным резонатором // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 11. С. 51—54.

17. Способ построения базовой станции волоконно-эфирной телекоммуникационной системы распределенной структуры и модуль для его осуществления. — Заявка на изобретение / Авторы: Белкин М. Е., Белкин Л. М. Регистрационный № 2011128089. Приоритет от 11.07.2011 г.

В. А. Васильев, д-р техн. наук, проф.,
e-mail: opto@bk.ru,

П. С. Чернов, аспирант,

Пензенский государственный университет

ДИФФУЗИОННАЯ МОДЕЛЬ РОСТА И МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТОНКИХ ПЛЕНОК МАТЕРИАЛОВ

Поступила в редакцию 05.07.2011

Дан обзор моделей роста поверхностей материалов. Предложена оригинальная модель роста поверхности тонких пленок, представляющая собой стохастический клеточный автомат и учитывающая диффузию частиц. Она позволяет исследовать влияние температуры подложки, скорости и времени осаждения на параметры, характеризующие морфологию поверхности. Представлены результаты сравнения экспериментальных данных, полученных с помощью атомно-силовой микроскопии, и теоретических, полученных путем моделирования с использованием предложенной диффузионной модели.

Ключевые слова: поверхность, тонкие пленки, стохастический клеточный автомат, морфология поверхности

Поверхностные эффекты оказывают значительное влияние на характеристики устройств нано- и микросистемной техники. В связи с этим большой интерес вызывают проблема получения поверхностей тонких пленок материалов с заданными характеристиками и связанная с ней задача изучения процесса роста поверхности. Благодаря развитию методов сканирующей зондовой и электронной микроскопии рост поверхностей тонких пленок интенсивно изучается экспериментально. Математическое моделирование предоставляет альтернативу экспериментальным методам изучения и имеет ряд преимуществ как с теоретической, так и с экономической точек зрения.

Теоретически процесс роста поверхности тонких пленок изучается в основном тремя путями:

- аналитическим решением дифференциальных уравнений, описывающих процесс роста;
- численным решением этих уравнений;
- компьютерным моделированием дискретных моделей [1–4].

Одними из первых моделей, получивших широкое распространение, являются модели роста поверхности, основанные на стохастических дифференциальных уравнениях. В моделях данного типа дифференциальное уравнение описывает динамику роста поверхности в терминах скалярной непрерывной функции $h(\mathbf{x}, t)$ — толщины пленки. Так,

модель Эдвардса—Вилкинсона описывается следующим дифференциальным уравнением [5]:

$$\frac{\partial h(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = v_0 + \mu(\mathbf{x}, t) + v\nabla^2 h(\mathbf{x}, t), \quad (1)$$

где $h(\mathbf{x}, t)$ — толщина пленки в точке \mathbf{x} в момент времени t ; v_0 — скорость осаждения; $\mu(\mathbf{x}, t)$ — шум с нормальным распределением; v — скорость диффузии.

Шум имитирует поступление частиц к поверхности пленки. Слагаемое $v\nabla^2 h(\mathbf{x}, t)$ отражает процесс сглаживания поверхности и играет роль поверхностного натяжения.

Уравнение (1) является простейшим линейным дифференциальным уравнением, описывающим процесс роста поверхности. Впоследствии Кардар, Паризи и Занг предложили нелинейное уравнение для описания процесса роста поверхности [6]:

$$\frac{\partial h(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = v_0 + \mu(\mathbf{x}, t) + v\nabla^2 h(\mathbf{x}, t) + \frac{\lambda}{2} [\nabla h(\mathbf{x}, t)]^2, \quad (2)$$

где λ — коэффициент, характеризующий степень нелинейности.

Наличие нелинейного слагаемого в уравнении (2) приводит к отклонению от гауссова распределения толщин тонких пленок, характерного для модели Эдвардса—Вилкинсона, и к получаемым в результате моделирования поверхностям, более соответствующим экспериментальным данным.

В связи со сложностью решения стохастических дифференциальных уравнений при исследовании роста поверхности получили распространение модели, представляющие собой клеточный автомат [7–9]. Большинство таких моделей включают в себя простые детерминированные правила осаждения и диффузии осаждаемых частиц по поверхности. Наиболее изученной моделью этого класса является модель случайного осаждения.

Случайное осаждение представляет собой простейшую модель роста поверхности. В рамках этой модели осаждаемые частицы попадают в случайно выбранные точки поверхности, закрепляются там и не имеют возможности диффундировать в соседние точки. Частица, попавшая в определенную точку поверхности, увеличивает ее толщину на одну относительную единицу. Математически эта модель сходна с моделью броуновского движения частиц и интенсивно изучается аналитическими и численными методами.

Недостатками моделей, основанных на стохастических дифференциальных уравнениях, являются сложность их анализа, связанная со сложностью решения уравнений, и невозможность исследования влияния температуры подложки, оказывающей значительное влияние на морфологию расту-

щей поверхности. В отличие от моделей, являющихся детерминированным клеточным автоматом, предлагается модель, представляющая собой стохастический (вероятностный) клеточный автомат. В отличие от детерминированных клеточных автоматов, состояние которых в следующий момент времени однозначно определяется состоянием в предыдущий момент времени, динамика стохастического клеточного автомата определяется на основе вычисляемых вероятностей. Предлагаемая диффузионная модель роста поверхностей тонких пленок заключается в следующем:

- поверхность тонкой пленки в модели представляет собой прямоугольную сетку из L^2 точек, где L — линейный размер поверхности;
- на границы сетки накладываются периодические граничные условия;
- новые частицы считаются идентичными и места их осаждения выбираются случайно, а скорость осаждения частиц F определяется числом частиц, попавших на поверхность за один шаг моделирования (шаг Монте-Карло) и измеряется в единицах [монослой/шаг Монте-Карло (МС/МК)];
- для каждой из точек поверхности $[i, j]$, в которую попадает новая частица, и ее ближайших соседних точек $[i \pm 1, j \pm 1]$ вычисляются вероятности p_{ij} диффузии частицы;
- для каждой из вновь попавших на поверхность частиц генерируется случайное число и осуществляется диффузия частицы в соответствии с вычисленными вероятностями p_{ij} ;
- после осуществления диффузии попавших на поверхность частиц происходит переход к следующему шагу Монте-Карло (осаждение новых частиц и повторение описанных действий).

Вероятность p_{ij} диффузии частицы в соседнюю точку $[i, j]$ определяется по формуле

$$p_{ij} = \rho \exp\left(\frac{\alpha \Gamma_{ij}(t)}{kT}\right), \quad (3)$$

где $\Gamma_{ij}(t)$ — коэффициенты, зависящие от толщины поверхности h в точке $[i, j]$ и ближайших к ней точек; ρ — нормирующий коэффициент, обеспечивающий равенство единице суммы вероятностей; α — коэффициент, зависящий от осаждаемого материала; k — постоянная Больцмана; T — температура. На рис. 1 показаны точки, для которых вычисляются вероятности по формуле (3).

Коэффициенты $\Gamma_{ij}(t)$ включают в себя два члена:

$$\Gamma_{ij}(t) = \Gamma_{ij}^1 + \Gamma_{ij}^2. \quad (4)$$

Первое слагаемое определяется по формуле

$$\Gamma_{ij}^1 = h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + h_{i,j+1} + h_{i,j-1} - 4h_{i,j}. \quad (5)$$

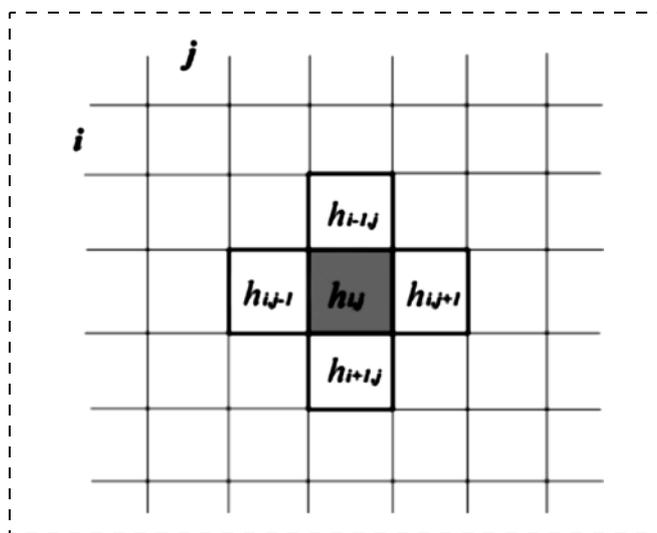


Рис. 1. Точки возможной диффузии частицы

Оно соответствует конечно-разностному выражению, аппроксимирующему лапласиан $\nabla^2 h$. Его физическим смыслом является сила поверхностного натяжения, обеспечивающая сглаживание поверхности. Второе слагаемое является конечно-разностной аппроксимацией квадрата градиента $\lambda/2(\nabla h)^2$:

$$\Gamma_{ij}^2 = \frac{\lambda}{2} [(h_{i+1,j} - h_{i-1,j})^2 + (h_{i,j+1} - h_{i,j-1})^2]. \quad (6)$$

Это слагаемое вносит нелинейность в модель, степень которой характеризуется коэффициентом λ .

Предложенная модель роста поверхности представляет собой стохастический клеточный автомат, поскольку правила перехода в следующее состояние не детерминированы, а имеют вероятностный характер. Морфология поверхности в следующий момент времени зависит от ее состояния в данный момент времени, а также выбираемых случайным образом мест осаждения новых частиц и вычисленных вероятностей диффузии частиц.

Для компьютерного моделирования процесса роста поверхности тонких пленок и последующего анализа поверхностей были разработаны алгоритм и программа [10] моделирования роста тонких пленок согласно описанной модели. Алгоритм моделирования роста тонких пленок, разработанный на основе предложенной модели, представлен на рис. 2. На рис. 3 (см. третью сторону обложки) показан вид поверхности тонкой пленки, полученный с помощью разработанных алгоритма и программы.

Основным количественным параметром морфологии пленок, характеризующим неоднородность поверхности, является шероховатость W , оп-

ределяемая как отклонение толщины пленки h от своего среднего значения \bar{h} [11]:

$$W = \left[\frac{1}{L^d} \sum_i (h_i - \bar{h})^2 \right]^{1/2}, \quad (7)$$

где L — линейный размер поверхности; d — размерность моделируемой поверхности; h_i — толщина пленки в i -й точке; \bar{h} — пространственная средняя толщина поверхности, определяемая по формуле

$$\bar{h} = \frac{1}{L^d} \sum_i h_i. \quad (8)$$

Зависимость шероховатости поверхности, полученной численным моделированием процесса роста согласно предложенной модели и модели случайного осаждения, от времени осаждения представлена на рис. 4.

Известно, что шероховатость поверхностей, получаемых в рамках модели случайного осаждения, пропорциональна квадратному корню от времени осаждения [11]. В логарифмическом масштабе эта зависимость представляет собой прямую линию (штриховая линия на рис. 4). Шероховатость поверхностей, получаемых согласно предложенной модели, в отличие от модели случайного осаждения, не растет безгранично, а стремится к определенному значению — шероховатости насыщения. Это происходит благодаря учитываемой моделию поверхностной диффузии осажденных на поверхность частиц.

Для анализа поверхностей, получаемых при моделировании процесса роста, целесообразно использовать аппарат Фурье-анализа. При анализе дискретных моделей удобно использовать алгоритм быстрого преобразования Фурье. Преобразование Фурье поверхности можно представить в виде амплитудно-частотной характеристики, усредненной по всем направлениям.

На рис. 5 представлен результат усредненной по всем направлениям Фурье-преобразования поверхности, полученной численным моделированием согласно модели случайного осаждения (рис. 5, а) и предложенной модели (рис. 5, б), учитывающей поверхностную диффузию частиц. Штриховая линия на рисунках представляет собой линейную аппроксимацию данных по методу наименьшего квадратичного отклонения.

Из полученных графиков ясно видно различие Фурье-преобразований поверхностей. В случае метода случайного осаждения частиц (рис. 5, а) поверхность представляет собой шум со всеми частотами, о чем свидетельствует близкий к нулю угол наклона прямой наименьшего квадратичного отклонения. Прямая среднеквадратичного отклонения Фурье-преобразования поверхности, полученной согласно предложенной модели (с учетом поверхностной диффузии частиц), напротив, имеет угол наклона (рис. 5, б), свидетельствующий о том, что поверхность представляет собой более сложную структуру.

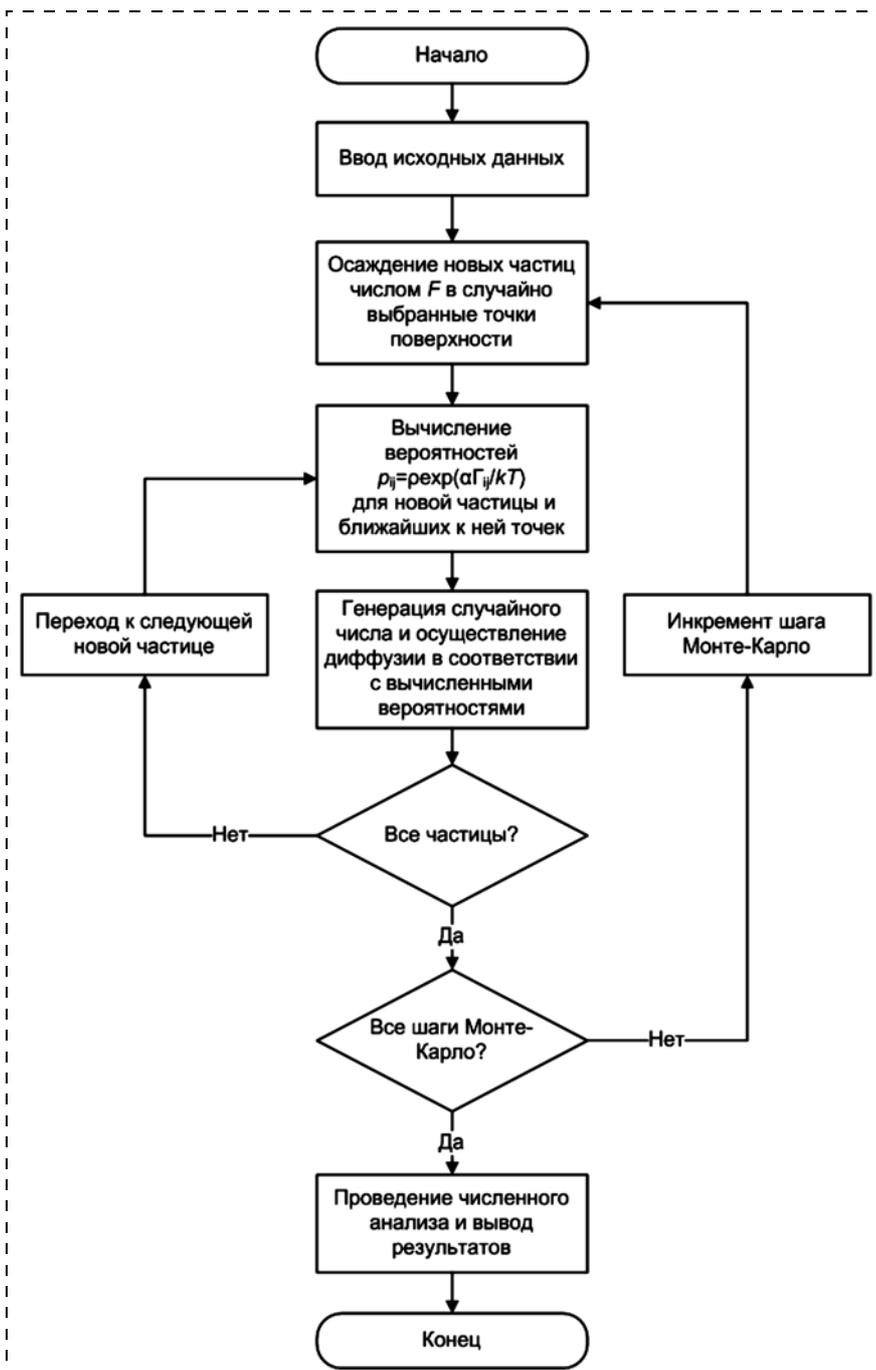


Рис. 2. Алгоритм моделирования роста тонких пленок

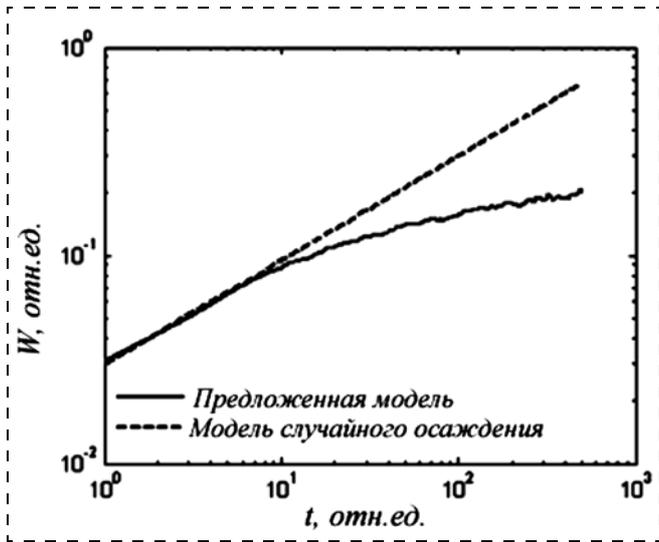


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности от времени осаждения:
 $L = 50, F = 0,1$ МС/МК

Поверхность тонкой пленки представляет собой пример случайного фрактала, поэтому важной ее характеристикой является фрактальная размерность. Наклон прямой, аппроксимирующей усредненное по направлениям Фурье-преобразование поверхности в логарифмическом масштабе, связано с фрактальной размерностью d структуры формулой [12]

$$d = 2 - s, \quad (9)$$

где s — наклон прямой наименьшего квадратичного отклонения. Фрактальную размерность можно также получить, вычисляя наклон прямой по каждому из направлений и затем усредняя по всем направлениям.

Известны три основных процесса, определяющих морфологию получаемых поверхностей: адсорбция, десорбция, или реиспарение, и поверхностная диффузия. Преобладание того или иного процесса зависит от микроскопических свойств осаждаемого материала, таких как энергия связи и диффузионный барьер. Эти параметры не могут

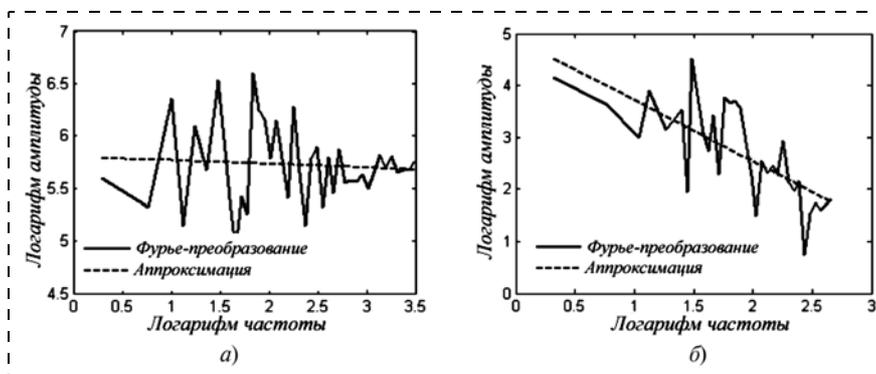


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики поверхности:
 а — модель случайного осаждения; б — предложенная модель, учитывающая поверхностную диффузию

быть изменены в процессе осаждения (за исключением изменения состава осаждаемого материала).

В технологическом процессе напыления тонких пленок основными контролируемыми параметрами при заданном составе осаждаемого материала и методе напыления являются температура подложки, время и скорость осаждения. Изменяя эти параметры, можно получить большое разнообразие морфологий — от послойного роста, который приводит к гладким поверхностям, до возникновения фрактальных структур. Исследование зависимостей параметров, характеризующих морфологию поверхности от температуры подложки, скорости и времени осаждения, открывает возможность получения поверхностей тонких пленок с заданной морфологией.

Зависимости характеристик поверхности различных материалов от режимов получения интенсивно изучаются [13, 14]. В работе [13] представлены АСМ-изображения поверхностей пленок алюминия, легированного оксидом цинка, осажденных при различных температурах подложки, из которых видно, что шероховатость поверхности возрастает при увеличении температуры. Зная зависимость шероховатости поверхности от температуры и времени осаждения, представляется возможным получать поверхности тонких пленок с заданной морфологией. Так, например, если пленка предназначена для формирования пленочных резисторов, то крупнозернистая структура с большей шероховатостью будет предпочтительнее, поскольку она более стабильна при колебаниях температуры в процессе эксплуатации данных резисторов. Мелкозернистая структура при повышенных температурах эксплуатации резисторов подвержена влиянию процессов рекристаллизации, приводящих к изменению электрофизических свойств пленки. В других случаях предпочтительнее может оказаться малая шероховатость.

На рис. 6 представлены зависимости шероховатости поверхности от числа шагов Монте-Карло для различных относительных температур T . Видно, что при увеличении температуры шероховатость W поверхности увеличивается. С физической точки зрения это можно объяснить уменьшением влияния силы поверхностного натяжения, имеющей тенденцию к сглаживанию поверхности, вследствие увеличивающихся температурных флуктуаций, повышающих энтропию системы. Согласно предложенной модели, при увеличении температуры показатель экспоненты в выражении (3) стремится к нулю, значение экспоненты к единице, а сами вероятности оказываются равными друг другу. Увеличение температуры приводит к приближению предложенной модели к модели случайного осаждения и, соответственно, к увеличению шероховатости. При больших температурах T поступаю-

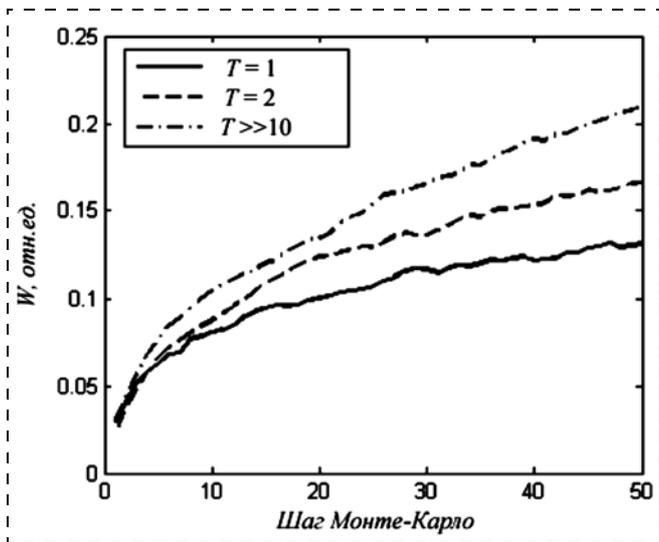


Рис. 6. Зависимость шероховатости поверхности от числа шагов Монте-Карло для различных относительных температур

щие на поверхность частицы диффундируют равновероятно в любом из направлений, что с учетом случайного выбора мест осаждения частиц эквивалентно отсутствию диффузии.

Следует отметить, что при высоких температурах диффузионная длина велика (в предложенной

модели принимается равной одному межатомному расстоянию) и возрастает вероятность процесса десорбции. При таких условиях в отсутствие примесей и сверхвысоком вакууме возможен послойный рост поверхности (например, в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии). В таком случае шероховатость не превышает толщины нескольких монослоев. Наоборот, при очень низких температурах диффузионная длина имеет очень малое значение, меньшее межатомного расстояния. В таком пределе процесс роста поверхности определяется только процессом осаждения атомов, так как процессы поверхностной диффузии и десорбции чрезвычайно малы. Такой ситуации наиболее соответствует модель случайного осаждения, и шероховатость поверхности в таком случае растет как \sqrt{t} .

Применение предложенной модели не ограничивается случаем осаждения на идеальную гладкую поверхность. Если осаждение пленки происходит на подложку или предыдущий слой, шероховатость которого превышает значение шероховатости насыщения при данной температуре подложки, то происходит постепенное сглаживание поверхности. Результат моделирования такого процесса при различных температурах представлен на рис. 7, а (см. третью сторону обложки). Увеличение скорости осаждения, напротив, имеет тенденцию к уменьшению шероховатости. Результаты, полученные в результате численного моделирования процесса осаждения при различных скоростях осаждения, представлены на рис. 7, б (см. третью сторону обложки).

Для сопоставления результатов математического моделирования роста поверхности тонких пленок с экспериментальными данными атомно-силовой микроскопии исследовались образцы тонких пленок хрома и никеля, полученные при различных температурах подложки, скоростях и времени осаждения методом магнетронного напыления [15].

На рис. 8 представлены экспериментальные данные и аппроксимирующие кривые зависимостей шероховатости поверхности от тока разряда магнетрона и фрактальной размерности пленок хрома. Из рисунка видно, что шероховатость поверхности уменьшается при увеличении тока разряда, являющегося мерой скорости осаждения.

На рис. 9 представлены гистограммы толщин пленок хрома при различных токах разряда. Из рисунка видно, что при увеличении тока разряда магнетрона уменьшается

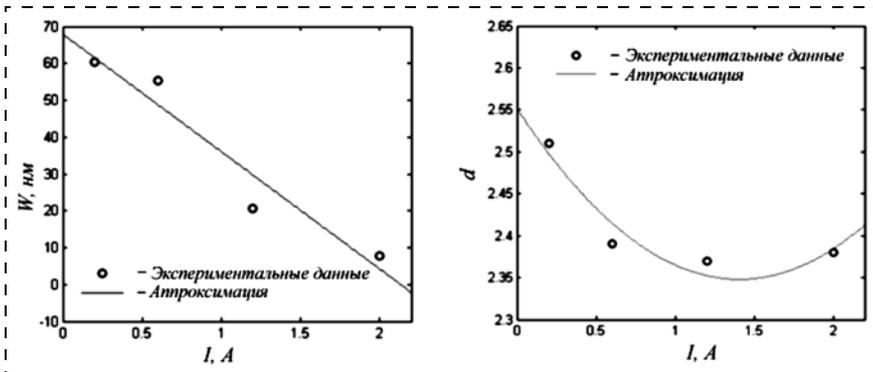


Рис. 8. Шероховатость поверхности пленки хрома (слева) и фрактальная размерность (справа) как функции тока разряда

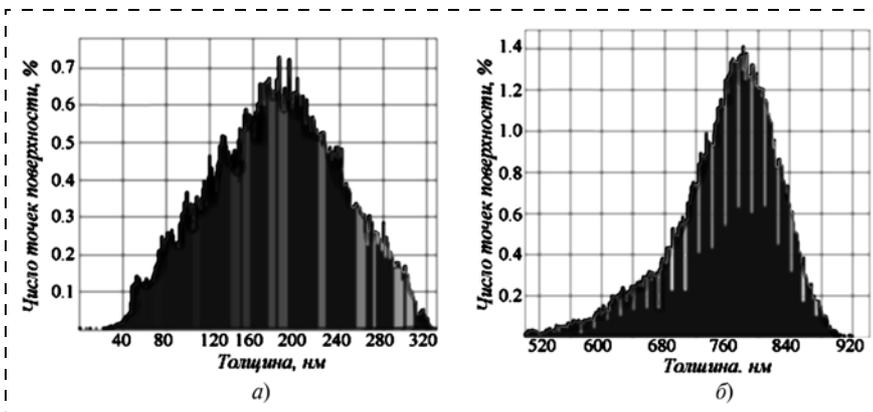


Рис. 9. Гистограммы толщин поверхностей хрома: а — $I = 0,2$ А; б — $I = 0,6$ А

толщина и увеличивается острота пиков гистограммы, свидетельствующие о сглаживании поверхности.

На рис. 10, *a* (см. третью сторону обложки) показана фрактальная размерность по направлениям и средняя фрактальная размерность участка поверхности образца хрома, полученная с помощью программы обработки АСМ-изображений. На рис. 10, *b* (см. третью сторону обложки) показана фрактальная размерность по направлениям поверхности, полученной численным моделированием осаждения хрома в соответствии с предложенной моделью. Из рисунков видно хорошее соответствие экспериментальных и теоретических данных.

Как показали исследования, разработанная диффузионная модель роста поверхности тонких пленок позволяет исследовать влияние температуры подложки, скорости и времени осаждения. Анализ изображений поверхностей, полученных численным моделированием и атомно-силовой микроскопией, показал достаточно хорошее их сходство. Предложенная модель может быть использована для моделирования процесса осаждения и исследования влияния физических параметров осаждения на морфологию поверхности тонких пленок материалов.

Список литературы

1. **Venables J.** Introduction to Surface and Thin Film Processes. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 372 p.
2. **Oura K., Lifshits V. G., Saranin A. A., Zotov A. V., Katayama M.** Surface Science: An Introduction. Springer, 2010. 440 p.

3. **Hans B., Krause D.** Thin Films on Glass (2nd Edition). Springer, 2010. 432 p.

4. **Mahan J. E.** Physical Vapor Deposition of Thin Films. Wiley-Interscience. 2000. 336 p.

5. **Wilkinson S. F., Eswards D. R.** The Surface Statistics of a Granular Aggregate // Proc. R. Soc. 1982. Vol. 381. P. 17–31.

6. **Kardar M., Parisi G., Zhang Y.-C.** Dynamic Scaling of Growing Interfaces // Phys. Rev. Lett. 1986. Vol. 56. P. 889–892.

7. **Vicsek M., Vicsek T.** Fractal Growth Models // ERCIM News. 1997. N 29. P. 36.

8. **Mattos T. G., Moreira J. G., Atman A. P. F.** A discrete method to study stochastic growth equations: a cellular automata perspective // J. Phys. A: Math. Theor. 2007. Vol. 40.

9. **Bhattacharyya P.** Growth of Surfaces Generated by Probabilistic Cellular Automata // International Journal of Modern Physics C. 1999. N 1. P. 165–181.

10. **Васильев В. А., Чернов П. С.** Алгоритм и программа "Моделирование роста поверхности тонких пленок" // Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 15561 от 07.04.2010 г. Зарегистрировано в Объединенном фонде электронных ресурсов "Наука и образование", ИНИМ РАО, г. Москва.

11. **Barabasi A. L., Stanley H. E.** Fractal concepts in surface growth. Cambridge University Press, 1995. 388 p.

12. **Russ J. C.** The Image Processing Handbook (6 edition). Boca Raton, Florida, USA, CRC Press, 2011. 885 p.

13. **Jeung H. P., Chae-Ryung C.** Deposition-Temperature Effects on AZO Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering and Their Physical Properties // Journal of the Korean Physical Society. 2006. Vol. 49. P. 584–588.

14. **Dikovska A. Og., Atanasov P. A., Vasileva C., Dimitrov I. G., Stoyanchoy T. R.** Thin ZnO Films Produced by Pulsed Laser Deposition // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. 2005. Vol. 7, N 3. P. 1329–1334.

15. **Тимаков С. В.** Системы управления технологическими режимами магнетронного нанесения тензорезистивных пленок. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Пенза: ПензГУ, 2011. 22 с.

УДК 621.382

И. И. Абрамов, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Н. В. Коломейцева, науч. сотр.,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, Минск,
Республика Беларусь,
e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА НА ОСНОВЕ Si/SiGe

Поступила в редакцию 23.06.2011

Показано, что с помощью разработанной комбинированной двухзонной модели резонансно-туннельных диодов могут быть получены удовлетворительные результаты согласования расчетов вольт-амперной характеристики с экспериментальными данными для структуры на основе Si/SiGe.

Ключевые слова: резонансно-туннельный диод, численное моделирование, комбинированная двухзонная модель

Введение

Практически важным направлением развития нанoeлектроники является исследование и разработка резонансно-туннельных диодов (РТД), транзисторов и схем на их основе [1, 2]. Заметим, что в настоящее время интенсивные экспериментальные исследования РТД проводятся и в кремниевой нанoeлектронике [3]. При этом для успешного развития рассматриваемой области высокая актуальность разработки численных моделей РТД повышенной адекватности моделирования. В работе [2] были сформулированы основные направления повышения адекватности моделей РТД общих формализмов квантовомеханического

подхода [1]. Одна из главных проблем здесь заключается в чрезвычайно высокой чувствительности задачи к влиянию различных факторов. К сожалению, выделенные основные направления пока трудно реализуемы в комплексе на практике. Кроме того, их реализация будет, как правило, приводить к падению экономичности моделей, иногда к существенному. В связи с изложенным выше и отмеченными в работах [2, 4] другими причинами многолетние попытки ученых по созданию более или менее универсальных моделей РТД к настоящему времени не привели к успеху. В сложившейся ситуации нами был обоснован следующий подход [4]: создание модели РТД, которая была бы достаточно адекватна и в то же время экономична лишь для определенной системы (систем) материалов.

Цель данной работы — иллюстрация эффективности предложенного подхода с помощью разработанной комбинированной двухзонной модели РТД на основе перспективной системы материалов Si/SiGe.

Модель

Рассмотрим сущность предложенной модели.

Модель основана на полуклассическом и квантовомеханическом (формализм волновых функций) подходах и относится к классу комбинированных моделей. Она позволяет рассчитывать волновые функции, заряд и потенциал, коэффициент прохождения, вольт-амперные характеристики (ВАХ) в зависимости от конструктивно-технологических и электрофизических параметров приборной структуры. Ее главная особенность — возможность учета влияния на транспорт в РТД не только зон проводимости, но и валентных зон.

В модели структура представляется в виде трех областей: контакты, приконтактные области и активная область. К активной области относятся барьеры и расположенная между ними квантовая яма.

Так же, как и комбинированная двухзонная модель [5, 6], позволяющая учитывать взаимодействие различных классических и квантовомеханических областей и влияние Г—Х-междолинного рассеяния, описываемая численная модель реализуется в два этапа.

На первом этапе находится самосогласованный потенциал в результате решения уравнений Шредингера и Пуассона для зон проводимости структуры (см., например, [6]).

Для учета влияния валентных зон в модели на втором этапе после нахождения самосогласованного потенциала решается система уравнений Шредингера следующего вида [7]:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m_0} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + E_c \right] \psi_c + \frac{\hbar}{i} p \frac{\partial \psi_v}{\partial x} = E \psi_c; \quad (1)$$

$$\left[\frac{\hbar^2}{2m_0} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + E_v \right] \psi_v + \frac{\hbar}{i} p \frac{\partial \psi_c}{\partial x} = E \psi_v.$$

Здесь \hbar — постоянная Планка, деленная на 2π ; m_0 — масса покоя электрона; E_c, E_v — высота барьеров в зоне проводимости и валентной зоне соответственно; ψ_c, ψ_v — волновые функции зоны проводимости и валентной зоны (легкие дырки); E — энергия электрона; i — мнимая единица; p — матричный элемент, который вычисляется согласно [8]:

$$m^* = \left(\frac{1}{m_0} + \frac{2p^2}{E_g} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где m^* — эффективная масса; E_g — ширина запрещенной зоны. Ток рассчитывается по формуле Тсу—Есаки [9] на основе коэффициента прохождения.

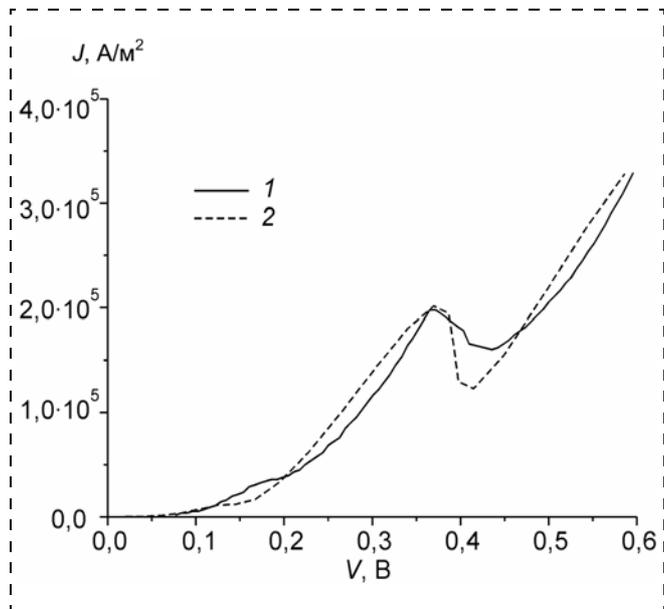
Учет сопротивлений приконтактных областей осуществляется по методике, описанной в работе [10].

Предложенная модель включена в новую версию системы моделирования нанoeлектронных приборов NANODEV [11], предназначенную для ПЭВМ.

Результаты моделирования

В качестве примера осуществлялся расчет ВАХ РТД [12] на основе Si/Si_{1-x}Ge_x с $x = 0,35$ при температуре $T = 80$ К. В активную область прибора входят два потенциальных барьера шириной 6 нм и расположенная между ними квантовая яма шириной 2,5 нм. Спейсерные слои имеют ширину 17,5 нм. Протяженные приконтактные области легированы донорной примесью $N_d^+ = 7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Необходимые для моделирования параметры кремниевых структур рассчитывались по формулам работы [13].

На рисунке приведены экспериментальные данные (кривая 1) и результаты расчета по предложенной комбинированной двухзонной модели (кривая 2). Характеристика приведена для плотно-



Сравнение ВАХ РТД на основе Si/SiGe:

1 — экспериментальные данные; 2 — расчет с использованием двухзонной модели

сти полного тока. В данном случае согласующими параметрами являлись: сопротивление приконтактных областей $R = 42$ Ом и расстояние $L = 5,5$ нм от барьеров до границ "сшивки" решений уравнений Шредингера в эмиттере и коллекторе [6].

Как следует из рисунка, согласование результатов расчета с экспериментальными данными неплохое. Здесь лишь заметим, что на настоящий момент времени нам неизвестны работы, в которых приводилось бы сравнение результатов расчета по ВАХ с экспериментальными данными для РТД на основе Si/SiGe с более или менее их удовлетворительным согласованием.

Заключение

Показано, что предложенная комбинированная двухзонная модель РТД может использоваться для расчетов ВАХ структур на перспективной для нанoeлектроники системе материалов Si/SiGe.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Ф10-081.

Список литературы

1. **Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники. IV. Квантовомеханические формализмы // Нано- и микро-системная техника. 2007. № 2. С. 24—32.
2. **Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники. V. Резонансно-туннельные структуры // Нано- и микро-системная техника. 2007. № 3. С. 57—70.
3. **Silicon nanoelectronics** / Ed. by S. Oda and D. Ferry. Boca Raton: Taylor & Francis. 2006. 304 p.
4. **Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломейцева Н. В.** Моделирование резонансно-туннельных диодов на основе GaAs/AlAs с использованием комбинированной двухзонной модели // Нано- и микро-системная техника. 2009. № 3. С. 10—13.
5. **Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломейцева Н. В.** Комбинированная двухзонная модель гетероструктуры с одним туннельным переходом и протяженными приконтактными областями // Микро-системная техника. 2004. № 9. С. 36—40.
6. **Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломейцева Н. В.** Комбинированная двухзонная модель резонансно-туннельного диода // Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41. Вып. 11. С. 1395—1400.
7. **Borgioli G., Frosali G., Zweifel P. F.** Wigner approach to the two-band Kane model for a tunneling diode // Transport Theory. Stat. Phys. 2003. V. 32, N 3/4. P. 347—366.
8. **Yang R. Q., Sweeny M., Day D., Xu J. M.** Interband tunneling in heterostructure tunnel diodes // IEEE Trans. Electron. Dev. 1991. V. 38, N 3. P. 442—446.
9. **Tsu R., Esaki L.** Tunneling in a finite superlattice // Appl. Phys. Lett. 1973. V. 22, N 11. P. 562—564.
10. **Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломейцева Н. В.** Комбинированная модель резонансно-туннельного диода // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. Вып. 9. С. 1138—1145.
11. **Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolomejtseva N. V., Bely Y. L., Shcherbakova I. Y.** A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities // Proc. of SPIE. 2010. V. 7521. P. 75211E (11 p.).
12. **Matutinović-Krstelj Ž., Liu C. W., Xiao X., Sturm J. C.** Symmetric Si/Si_{1-x}Ge_x electron resonant tunneling diodes with an anomalous temperature behavior // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62, N 6. P. 603—605.
13. **Yang L., Walting J. R., Wilkins R. C. W., Boriçi M., Barker J. R., Asenov A., Roy S.** Si/SiGe heterostructure parameters for device simulation // Semicond. Sci. Technol. 2004. V. 19. P. 1174—1182.

УДК 621.3.049.77.002:537.5

Л. В. Соколов, д-р техн. наук, проф.,
НИИ авиационного оборудования,
e-mail: sokolov@niiao.com,
Н. М. Парфенов, канд. техн. наук, доц.,
Московский авиационный институт,
e-mail: pnm334@mai.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МЭМС

Поступила в редакцию 16.06.2011

Обобщены и проанализированы современные достижения в области исследований и разработки различных физико-химических процессов травления монокристаллического кремния для формирования объемных микромеханических структур, показаны основные тенденции развития сенсоров и МЭМС-устройств.

Ключевые слова: современные технологии, микромеханические структуры, МЭМС-устройства

К одной из базовых технологий можно отнести технологию избирательного травления кремния для формирования микромеханических структур и создания изделий микроэлектроники, а также высокоинтегрированных сенсорных микросистем.

В настоящее время большинство кремниевых датчиков и актюаторов изготавливают по технологии анизотропного травления [1, 2], в том числе — трехмерные сенсоры давления и акселерометры. К достоинствам таких приборов следует отнести высокие прочностные и упругие характеристики, обусловленные применением монокристаллического кремния и кремниевых микромеханических структур, сформированных анизотропным химическим травлением (АХТ).

В 1982 г. К. Петерсон (фирма IBM) в статье [4] обратил внимание на появление новых направлений, базирующихся на использовании полупроводниковой технологии и кремния как конструктивного материала для формирования микромеханических структур [5, 6].

Исследования различных способов сухого и жидкостного травления кремния при изготовлении кремниевых датчиков давления и устройств

микроэлектромеханических систем (МЭМС) приведены в известных работах [8—13].

В связи с успешным развитием МЭМС-технологии значительно возрос интерес исследователей к разработке и совершенствованию прецизионных кремниевых микромеханических структур [3].

Способы и механизм защиты углов трехмерных микроструктур при химическом травлении

Несмотря на интенсивные многолетние исследования механизм химического травления не понятен до сих пор. Появляющиеся после травления структурные изменения в кремнии не могут быть удовлетворительно объяснены на основе известных сегодня моделей [10]. В этом состоит одна из главных причин трудностей в моделировании микромеханических структур при формировании их методами жидкостного анизотропного травления. В частности, в случае использования Si(100) возникают проблемы травления выпуклых углов, проектирования требуемой топологии и структуры маски для компенсации травления углов. В данном случае исследован механизм формирования микропирамид при травлении Si(100) в растворе КОН и условия, необходимые для предотвращения их образования.

В работе [10] описана безмаскирующая технология травления. Такое название является условным. Безмаскирующая технология травления представляет собой двухэтапный процесс, где на первом этапе проводится травление с маской, а на втором — без нее. Безмаскирующее травление — более быстрый процесс, обеспечивающий четкие формы объемной микроструктуры, по сравнению с традиционной технологией анизотропного травления кремния. На первом этапе при анизотропном травлении кремния в растворе низкой концентрации КОН + изопропиловый спирт (5 %) применялись маски. Полученную асимметрию углов можно объяснить расовещением маски относительно направления (110). При более точном позиционировании маски удалось снизить эффект асимметрии углов. Второй этап травления проводился уже без маски. В этом случае были получены более качественные объемные микроструктуры. Особенность технологии заключается в необходимости корректировки концентрации анизотропного травителя. Наилучшие результаты были получены через 15 мин после начала травления — все четыре угла объемной микроструктуры имели прямоугольную форму.

При травлении до 10 мин получались закругленные формы.

Применение изопропилового спирта улучшает морфологию травленной поверхности — сглаживаются неровности и шероховатости. Экспериментальные исследования влияния температуры, концентрации раствора КОН + изопропиловый спирт на качество травления проводили на кремниевых пластинах. Раствор готовили в следующем порядке: сначала КОН растворяли в деионизованной воде, а затем добавляли изопропиловый спирт. Концентрацию воды и КОН измеряли с точностью $\pm 5\%$. Доля изопропилового спирта составляла 5 % в весовых частях.

В качестве маски использовали термический оксид Si толщиной 150 нм. Топология маски содержала квадратные окна 140×140 мкм с ориентацией вдоль направления [100]. Травление проводили в тefлоновой ванночке, помещенной в термостат, крышка которого охлаждалась проточной водой в целях минимизации испарений раствора, температура которого контролировалась с точностью ± 1 °C. В процессе травления раствор постоянно перемешивался. Перемешивание значительно увеличивает вертикальную скорость травления.

В работе [9] были исследованы процессы химического травления Si(110) в растворах КОН или тетраметиламониума (ТМАН) на сверхбольшие глубины (более 500 мкм). При этом наблюдалась деградация травления, обусловленная ростом кристаллов, вследствие выпадения в осадок кислородосодержащих соединений, а также увеличения неровностей на поверхностях (111) и (110). Эти эффекты значительно уменьшались при температуре 1300 °C, наблюдалось также уменьшение выпадения в осадок на больших глубинах травления.

Отмечалось [2], что одним из недостатков химического травления в растворе КОН является низкая скорость травления. Но при травлении Si(100) в установке с микроволновым источником на частотах 2,45 и 2,54 ГГц скорость травления увеличивалась в 6 раз по сравнению с традиционным травлением. Показано, что подтрав выпуклых углов может быть уменьшен при пошаговом травлении и применении защитных масок.

Особенности формирования многоуровневых микроструктур при химическом травлении

При формировании структур чувствительного элемента датчика КНИ монолитного тензопреобразователя (ЧЭД КНИ-МТ) многоуровневые микроструктуры имеют высокую степень интеграции и перекрывают большой диапазон по чувствительности, но при формировании таких структур возникают трудности, обусловленные многократным повторением последовательности операций "осаждение—фотолитография—травление", так как сложно трансформировать одну и ту же маску на различные

глубины травления, а также обеспечить нанесение фоторезиста [11]. Возможен другой неэффективный путь — использование множества масок для формирования рисунка на подложке перед травлением.

Авторами [15] разработана технология "скрытых масок", базирующаяся на использовании типовых процессов планарной фотолитографии, которая позволяет формировать в пластинах монокристаллического кремния многоуровневые трехмерные структуры с высокой точностью воспроизведения их линейных размеров. Для реализации данной технологии была разработана математическая модель процесса травления. Линейные размеры топологического рисунка маски рассчитывали с помощью этой модели. Применение технологии "скрытых масок" позволило формировать не только три, но и более глубокие рельефы с обеих сторон пластин. Для формирования глубоких рельефов в пластинах КЭФ-4,5 с ориентацией поверхности (100) использовали технологию жидкостного анизотропного химического травления в 33 %-ном растворе КОН при температуре 97 ± 2 °C, обеспечивающую изготовление сложных объемных фигур травления с высокой точностью. Расчетная погрешность воспроизведения линейных размеров составила менее 3 % от номинала для фигур травления, ограниченных плоскостями (100) и (110), и менее 1 % от номинала для фигур травления, ограниченных плоскостями (111).

Известно, что формирование многоуровневых структур с использованием технологии "разориентированных V-каналов" не позволяет провести точный контроль отклонения от линии базового среза пластины, которое непосредственно определяет высоту каждой из "террас". Эта проблема была решена при использовании технологии объемного травления, включающей как травление с маской, так и без нее в растворе КОН [10]. Сначала проводилось традиционное травление с маской на необходимую глубину. После удаления маски травление возобновлялось до момента окончательного травления трехмерной микроструктуры. Таким способом можно формировать многоуровневые, имеющие разную толщину структуры, подобно показанным на рис. 1. На этом рисунке показаны поперечные сечения образца (на основе Si) в процессе его микромеханической обработки, маршрут изготовления трехмерной структуры по схеме двухэтапного травления. Обрезание выпуклых углов в процессе безмаскирующего травления мало отличается от обычного травления. Тем не менее, при проектировании рисунка маски с компенсирующими элементами рекомендуется учитывать изменение контура обрезания.

В результате травления без маски достигнуто структурное совершенство формируемых углов от верхней до нижней плоскостей. Главная причина структурного совершенства, возможно, обусловлена

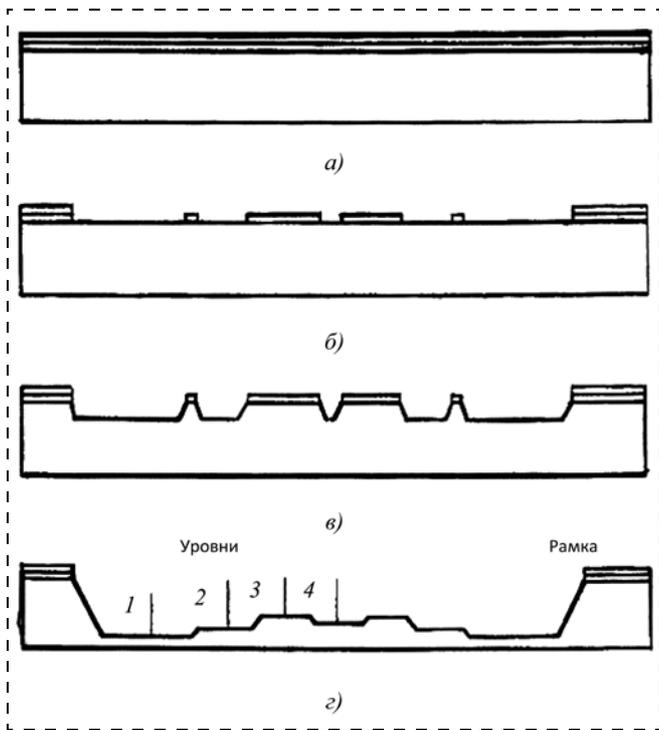


Рис. 1. Маршрут формирования многоуровневой трехмерной структуры по схеме двухэтапного травления с маской и без маски. Показано поперечное сечение образца:
a — формирование маски; *б* — вскрытие окон; *в* — травление с маской; *г* — травление без маски

очень быстрым движением плоскости поглощения (311) по сравнению с относительно малой скоростью травления других плоскостей — эффект углового подтравливания. Также установлено, что если при глубинном травлении без маски подтравливание углов на этапе применения маски большое, то необходимо обеспечить уменьшение углового подтравливания на втором этапе травления без маски. В случае, когда выпуклые углы формировались травлением с маской без компенсации, подтравливание на верхней плоскости уменьшало размеры углов. Уменьшение углов происходило также на протяжении всего последующего процесса травления без маски. При этом скорость уменьшения углов не изменялась.

Динамика подтравливания верхнего ребра приведена на рис. 2, где показаны зависимости подтравки U от глубины травления без маски. Измеренная глубина травления составляла 48,5 мкм. В результате подтравки в течение 6,5 ч размер верхнего ребра сократился со 160 до 135 мкм. Тем не менее, подтрав U в нижней плоскости угла еще более возрастает на первом этапе травления без маски. Полученные результаты позволяют проектировать необходимую для угловой компенсации топологию маски, а также выделить две области травления — верхнюю и нижнюю, образовавшиеся вследствие эффекта подтравливания углов.

Теоретические и экспериментальные исследования двухстадийного анизотропного травления в водном

растворе КОН в целях создания трехмерных микромеханических структур сенсорных матриц давления и ускорения конфигурации разной толщины описаны в работе [14]. Такие микроструктуры имеют высокую степень интеграции и перекрывают большой диапазон по чувствительности (при давлении >100 кПа чувствительность составляет около $0,27\ \%/^{\circ}\text{C}$). Таким образом, при создании многоуровневых структур с высокой степенью интеграции возможны следующие пути решения технологических задач:

- совершенствование технологии "скрытых масок";
- широкое применение двухстадийного анизотропного травления.

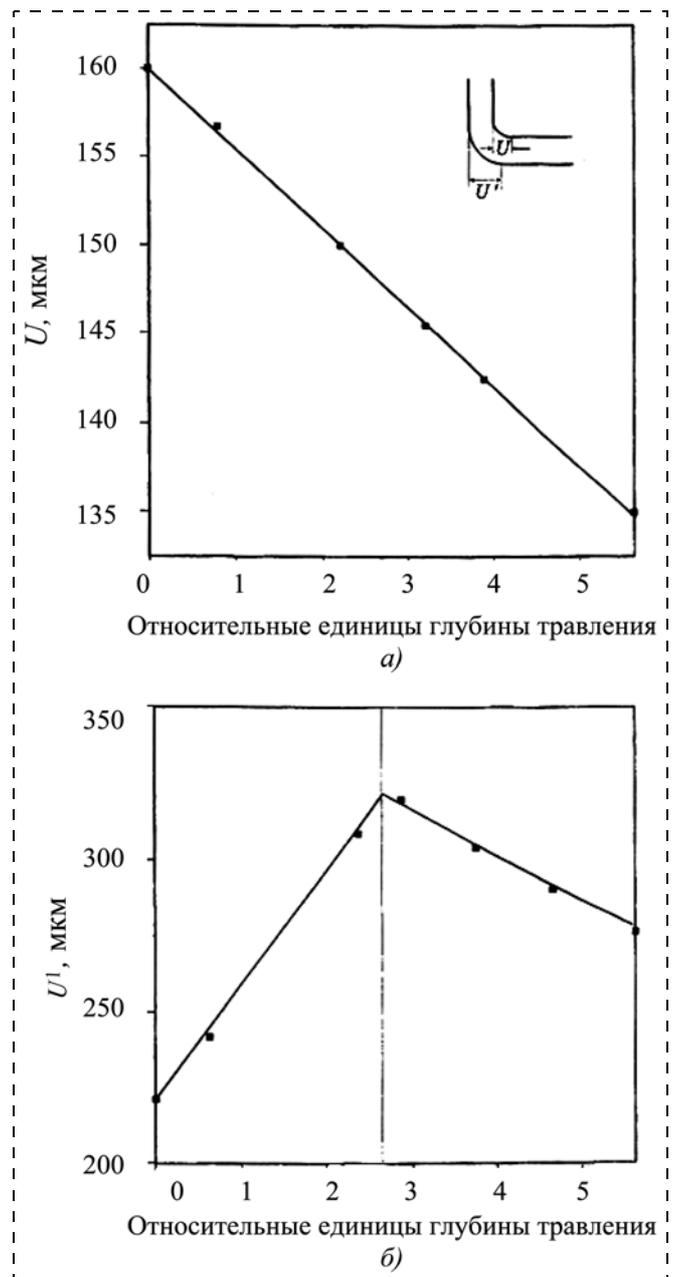


Рис. 2. Экспериментальные результаты по динамике подтравки U , U^1 в зависимости от глубины безмаскирующего травления:
a — для верхнего края структуры (U); *б* — для нижней плоскости угла (U^1)

Электрохимическое анизотропное травление

В последнее время наряду с известными исследованиями процесса травления в растворе КОН появился интерес исследователей к раствору гидроксида тетраметиламониума (ТМАН) [13]. Влияние предварительной химической обработки было изучено в работе [1]. Обработка кремниевых пластин (100) *p*-типа в 5 % (в весовых частях) проводилась в гидроксиде ТМАН при двух различных температурах. Для определения динамики изменения различных параметров в процессе травления с увеличением времени травления использовали вольтметрический мониторинг. В зависимости от способа предварительной химической очистки исследование изменений в морфологии поверхности кремния проводили с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ).

Результаты исследования [12] показали, что режим травления в ТМАН и окончательная структура Si(100) *p*-типа после травления зависят от исходного состояния поверхности кремния (гидрофильной или гидрофобной). Увеличение шероховатости после непродолжительного времени травления в ТМАН объясняется [8] увеличением смачиваемости поверхности кремния по сравнению с исходным состоянием. Шероховатая поверхность наблюдалась также в случае обработки при высокой температуре. Это объясняется тем, что катионы ТМАН не обладают каталитическими свойствами.

В последнее время уделяется особое внимание контролю за свойствами поверхности кремния в процессе различных операций по ее очистке. Это особенно важно в условиях возрастающей интеграции микросхем и функций на одном чипе.

Для очистки перед жидкостным травлением или удалением оксида кремния широко используется раствор плавиковой кислоты (HF). Такая очистка приводит к адсорбции водорода на поверхности Si и является пассивирующим от окисления на воздухе, а также стабилизирующим и гидрофобным. При этом шероховатость поверхности — микроскопическая. Критерием чистоты поверхности является ее смачиваемость. Смачиваемость поверхности определялась через контактный угол смачиваемости (КУС) как отношение гидрофильности к гидрофобности. Большой КУС свидетельствует о наличии гидрофобной поверхности, а маленький угол — о ее гидрофильности. Обработанная в растворе HF поверхность кремния (100) *p*-типа гидрофобная, и КУС составляет почти 90°, а для поверхности кремния (111) — угол смачиваемости составляет 80°. Установлено, что если на поверхности присутствует кислород или углерод, то даже гидрофобная поверхность имеет невысокое качество.

Благодаря относительно низкой токсичности и совместимости с КМОП-технологией появился интерес исследователей к использованию раство-

ров типа КОН или ТМАН для жидкостного анизотропного травления кремния. Однако при низкой концентрации ТМАН и высокой температуре травления на поверхности кремния образуются пирамидальные выступы или холмики, которые граничат с плоскостью (111), в направлении которой скорость травления низкая [16]. Возникшая в результате этого процесса шероховатость является критичным параметром при изготовлении мембран чувствительных элементов давления (ЧЭД), на которых не должны формироваться пирамиды и холмики. В целях ограничения таких микроструктурных формирований на кремниевых мембранах в раствор ТМАН добавляли персульфат аммония, снижающий концентрацию раствора ТМАН [25].

В одной из работ исследовали три способа очистки Si(100) *p*-типа (удаление SiO₂):

- а) в буферном HF(BF);
- б) в NH₄BF₄;
- в) ТМАН (NBF).

Электрохимическое травление использовалось для подтверждения, что на изменение соотношения гидрофильность/гидрофобность или на выбор способа химической обработки (очистки) первоначальной поверхности влияют физические и химические аспекты процесса травления кремния в ТМАН. При этом морфология поверхности кремния после травления (при различных способах очистки) исследовали с помощью АСМ.

Исследования проводили на образцах 8 × 8 мм Si(100) *p*-типа с удельным сопротивлением 2...30 Ом · см. На рис. 3 показана схема установки (типовая) для экспериментальных исследований процесса травления. Для травления использовалась термостатированная травильная ванна (тип Ecoline, E100 или Lauda). Электрод, изготовленный из сплава Ag/AgCl (тип Dolmen 24), позиционировался вблизи горизонтально расположенного образца под некоторым углом. Платиновый элект-

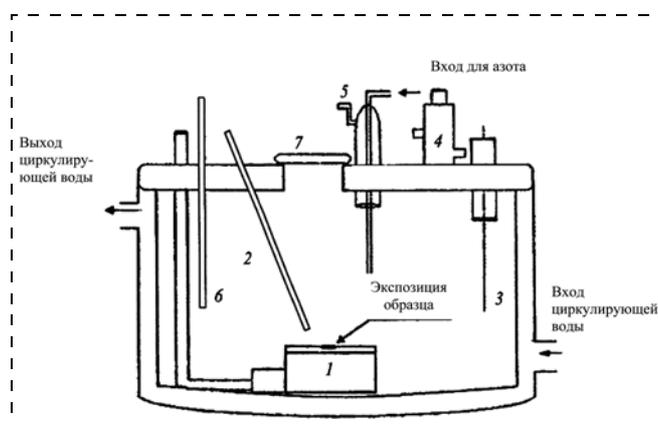


Рис. 3. Схема установки для экспериментальных исследований процесса травления:

1 — горизонтальный держатель образца; 2 — электрод мониторинга; 3 — электрод счетчика; 4 — устройство для конденсации травителя; 5 — устройство газового обмена; 6 — термометр; 7 — тефлоновая крышка

трод счетчика был установлен вдали от рабочего электрода и электрода для контроля процесса травления. Для нейтрализации кислорода в растворе травителя использовали азот, а для уменьшения потери травителя использовали конденсер.

Процесс электрохимического травления контролировали непрерывно во времени. Для этого использовали потенциостат типа Solart 1287, который управлялся персональным компьютером. Полученные данные обрабатывались и анализировались с помощью программы Solartron Corrware и Corrview.

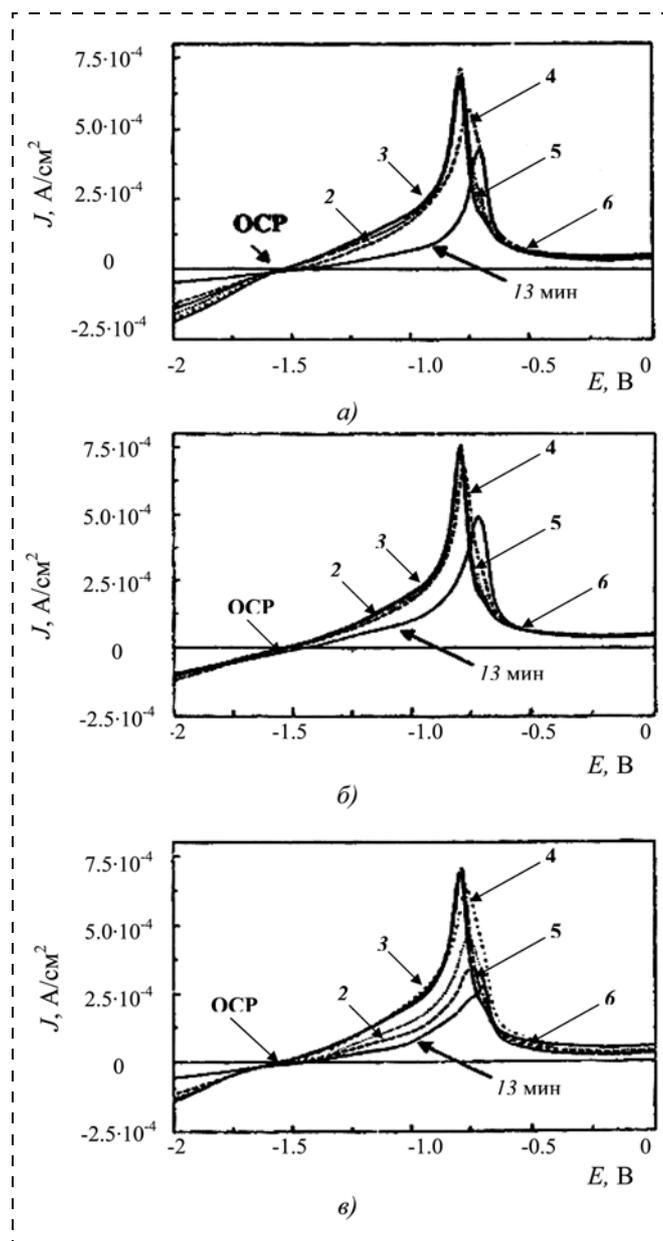


Рис. 4. Вольтограммы как функции времени кремниевых образцов Si(110) *p*-типа при 52 °С при заданных интервалах времени и скорости сканирования 20 мВ/с: а — очистка в буферном-HF(BF); б — очистка в NH₄BF₄; в — очистка в NBF. Время содержания в растворе в минутах: 1 — 13, 2 — 50, 3 — 75, 4 — 120, 5 — 159, 6 — 210

Для образцов кремния *p*-типа приложенный потенциал изменялся в течение травильного цикла от -3 В до 0 со скоростью 20 мВ/с. Результирующие вольтограммы записывались в установленные интервалы времени.

Типовые вольтограммы как функция времени для каждого из трех типов травителя HF(BF), NH₄BF₄ и NBF показаны на рис. 4. Они представляют собой типовые зависимости плотности тока *J* от потенциала *E* на электроде для контроля процесса травления. Как видно из графиков, с увеличением напряжения относительно ОСП (open circuit potential — устойчивый потенциал, при котором ток в цепи равен нулю) ток нарастает до пикового значения, соответствующего пиковому потенциалу пассивации. Заметное расхождение раствора NBF начинается после обработки образцов в течение 13 мин, а для раствора BF — после обработки в течение 120 мин [16].

По завершении травления исследовали такие параметры, как шероховатость поверхности образцов и скорость травления. Для измерения шероховатости поверхности после 30 мин травления в ТМАН использовали АСМ.

Скорость травления определяли на покрытых маской образцах кремния *p*-типа при времени травления — один час.

Результаты исследований сведены в таблицу [16].

Из данных таблицы следует, что при температуре травления 52 °С в зависимости от способа очистки скорость травления увеличивается следующим образом: BF < NH₄BF₄ < NBF. Кроме этого, скорость травления возрастает с увеличением температуры травления. Результаты измерений максимума пиковой высоты (МПВ) пирамиды и холмика на травленной поверхности образцов, а также фотографии морфологии их поверхности после травления в 5 %-ном растворе ТМАН в течение 30 мин при температуре 52 °С показали, что МПВ в зависимости от способа очистки имеет ту же самую тенденцию: BF < NH₄BF₄ < NBF.

Как следует из таблицы, оптимальным травителем для очистки поверхности кремния является травитель BF.

Влияние способа химической очистки поверхности Si(100) *p*-типа и температуры на скорость травления и шероховатость поверхности при анизотропном травлении в 5 %-ном растворе ТМАН

| Травители | Температура, °С | Шероховатость, нм | Скорость травления, мкм/ч |
|---------------------------------|-----------------|-------------------|---------------------------|
| BF | 52 | 146 | 4,1 |
| NH ₄ BF ₄ | 52 | 294 | 6,0 |
| NBF | 52 | 474 | 6,2 |
| BF | 82 | 757 | 20,6 |
| NBF | 82 | 938 | 28,6 |

Ионно-реактивное травление

Основой технологии формирования кремниевых микроструктур МЭМС наряду с жидкостным является глубинное сухое анизотропное травление, поскольку максимальную чувствительность обеспечивают микромеханические структуры с высоким аспектным отношением, т. е. с маленькими зазорами и большой высотой. Дополнительное преимущество — совместимость с КМОП-технологией, что создает условия для интеграции чувствительных элементов с электронной схемой преобразования сигнала. Универсальность травления и профилирования одновременно — еще одно преимущество сухого травления, так как микроструктурные элементы МЭМС имеют существенную разницу в размерах (от нанометров до микрометров в одной структуре).

Сухое травление объединяет преимущества поверхностной микрообработки кремния (высокая степень интеграции) и объемной микромеханики (высокая чувствительность). При сухом травлении были получены следующие параметры: аспектное отношение — более 50, глубина травления — сотни микрометров, скорость травления — несколько микрометров в минуту. При микрообработке кремния в реактивной плазме устанавливается баланс между входящим потоком ионов и радикалов и уходящим потоком продуктов реакции. Эти потоки обусловлены кинетикой травления, но находятся также в зависимости от топографии конкретной микроструктуры [17].

Для технологии МЭМС формирование изолирующих слоев и межсоединений в микроструктурах имеет специфические особенности, так как помимо электрических функций выполняются одновременно и механические функции. Новая технология изоляции для процессов объемной микрообработки кремния, основанная на методах глубинного ионно-реактивного травления, и технологии сращивания кремниевых пластин исследовались в работе [13].

Ионно-реактивное травление образцов проводили в индуктивно связанной плазме (ICP). В качестве материала маски использовали металлическое покрытие из алюминия, а для тонких микромеханических структур — фоторезист. Известно, что для DRIE-технологии (глубинного ионно-реактивного травления) характерен эффект запаздывания, который проявляется после травления при одних и тех же условиях (глубина узкой канавки меньше, чем широкой). По результатам эксперимента глубина канавки с шириной 3, 4 и 5 мкм после DRIE-травления составляла 19, 21 и 23 мкм соответственно, что подтверждает эффект запаздывания. Этим эффектом можно управлять путем изменения условий и скорости травления.

В работах [17, 18] описано локальное прецизионное травление фокусированным и остросфокусированным ионным пучком. Прецизионное травление может быть применено при изготовлении интегральных микросхем и МЭМС. Используемое оборудование позволяет фокусировать ионный пучок до диаметра 5 нм при напряжении ускорения 30 кВ, относительно малая глубина проникновения ионов в твердое тело 25 ± 8 нм способствует сохранению свойств обрабатываемого материала. Способность ионного пучка взаимодействовать с веществами в газообразном состоянии дала возможность проводить ионно-стимулированное химическое травление и осаждение различных материалов. Технологические операции с применением остросфокусированного ионного пучка [17] позволили решать такие задачи, как формирование 2D- и 3D-областей с минимальными геометрическими размерами, максимальным аспектным отношением и высоким латеральным пространством для создания микро- и наноразмерных изделий. Было установлено, что при ионно-лучевом травлении материалов остросфокусированным пучком основным параметром является ток ионного пучка.

Сухое травление имеет существенное преимущество по сравнению с жидкостным, поскольку объединяет технологии поверхностной обработки и объемной микрообработки.

Травление в плазме высокой плотности

В современных системах плазменного травления интенсивно используют галогены и их газовые смеси. Из группы галогенов наиболее широкое применение получили хлор и газы на основе фтора. Процессы травления, основанные на фторсодержащих газах, имеют такие преимущества, как высокая скорость травления, селективность и аспектное отношение, поэтому они используются при формировании микроструктур для МЭМС. Однако атомы F, вступая самопроизвольно в реакцию с кремнием, обуславливают анизотропность травления и подтрав кремния под маской [19].

При определении скорости плазменного травления эффект ионной бомбардировки, по мнению авторов, является критичным параметром. Бомбардирующие ионы получают энергию посредством области пространственного заряда, который формируется между кремниевой пластиной и областью плазмы. Область пространственного заряда в современных реакторах высокоплотного плазменного травления поддерживается ускоряющим внешним напряжением радиочастоты. Современная тенденция плазменного травления заключается в высокой анизотропности травления с минимальным разрушением поверхности, подвергающейся травлению. Создание нового направления МЭМС вызвало потребность в глубинном травле-

нии кремния на 300 мкм и более. Для получения этой глубины в настоящее время используют установки травления таких фирм, как Alkatel, Applied Materials и Surface Technology Systems [20]. Эти установки позволяют реализовать управляемый процесс травления, т. е. возможно независимое травление энергией ионов, а также управление анизотропией травления.

Плотность потока ионов в таких установках на порядок выше, чем в установках реактивного ионного травления. На этих установках изготавливаются такие элементы МЭМС, как интегральные сенсоры давления и микроакселерометры. Существенное уменьшение подтрав под маску обеспечивает технология фирмы Bosh, объединяющая в одном цикле процессы травления и пассивации [19]. Механизм этого цикла рассматривается как многократный процесс переключения со стадии травления кремниевой пластины в SF_6 на стадию пассивации вытравленных боковых стенок, обусловленную осаждением C_4F_8 и предотвращающую подтрав под маску.

Вторым способом подавить спонтанное травление кремниевой пластины фтором является снижение температуры пластины в процессе травления [31]. Однако необходимое для этой цели оборудование, создающее сверхнизкие температуры, усложняет конструкцию травильной системы в целом и увеличивает ее цену. Даже при интенсивном охлаждении в случае высокого аспектного отношения подтрав под маску был большим и наблюдалось значительное увеличение бокового подтрав вблизи маски.

Для травления кремния также широко используется Cl_2 . На основе его разработаны хорошо управляемые процессы травления для формирования вертикальных стенок с гладкой поверхностью. Такие процессы, обеспечивающие также и высокое аспектное отношение, применяются для формирования микроструктур МЭМС-устройств. Вертикальный профиль может быть легко получен при травлении в Cl_2 без пассивации полимерами и без применения интенсивного охлаждения кремниевой пластины. Недостатками травления в плазме на основе Cl_2 являются низкая скорость травления и плохая селективность к маске. Поэтому для объемной микрообработки кремниевых структур МЭМС-устройств, когда вытравливаются относительно большие объемы пластины, целесообразно применение травителей на основе F, которые позволяют формировать глубокие канавки с высоким аспектным отношением и высокой селективностью к маске. И, наоборот, для травления малых объемов с высоким аспектным отношением и вертикальным профилем при поверхностной и объемной микрообработке кремния целесообразно использовать Cl_2 .

При использовании травителя на основе F могут возникать проблемы появления шероховатости боковых стенок. Так, в процессе циклов травления

и пассивации возникают неровности боковых стенок в форме гребешковых структур. Была выявлена зависимость шероховатости от времени травления, материала маски и вскрываемой площади на пластине. При использовании никеля в качестве маскирующего покрытия была сформирована при травлении гладкая поверхность. Даже при относительно большой вскрываемой для травления на пластине площади, но при более продолжительном травлении шероховатость уменьшалась.

Для получения высокой степени анизотропности используют в основном два способа [20]. Первый — это способ осаждения полимерного материала при комнатной температуре. Полимер защищает боковые стенки от травления и препятствует спонтанному боковому травлению. Этот способ широко используют при производстве МЭМС-устройств.

Второй, криогенный способ, обеспечивает уменьшение спонтанного бокового травления за счет очень низкой температуры на поверхности пластины (ниже $-100\text{ }^\circ\text{C}$). Кроме этого, пассивирующий газ, например кислород, добавляется в смесь газов для создания тонкого слоя SiO_xF_y , который защищает боковые стенки от травления. Этот способ обеспечивает высокую скорость травления и высокую анизотропию.

Исследовалось влияние температуры на профиль травления (температурный эффект). Использовались кремниевые пластины *n*-типа проводимости диаметром 125 мм и удельным сопротивлением $35\text{ Ом}\cdot\text{см}$, на которые экспонировался рисунок канавок шириной от 1,2 до 100 мкм. В качестве маски использовался оксид кремния.

Путем оптимизации скорости и анизотропии травления получен высокоанизотропный профиль травления глубиной 50 мкм в канавках шириной 2 мкм, сформированных на кремниевых пластинах толщиной 210 и 375 мкм при скорости травления 5 мкм/мин. При травлении на большую глубину (более 50 мкм) с длительным временем травления наблюдалось ухудшение профиля травления из-за подтрав под маску и появлялся небольшой уклон (после 10 мин травления) [19]. Эти два эффекта можно свести к минимуму оптимизацией потока кислорода, ускоряющего напряжения, температуры подложки и давления в реакторе. При повышении ускоряющего напряжения увеличивается энергия ионов и направленность пучка ионов. Установлено, что низкие температуры уменьшают подтрав без применения компенсаторов [20]. Итак, травление в плазме высокой плотности показало, что:

- процесс травления с применением фтора может быть использован для травления больших объемов структур с высокими аспектным отношением и селективностью к маске, а также с высокой скоростью травления;

- травление с применением хлора может быть рекомендовано для формирования вертикальных стенок и малых структур, высоким аспектным отношением, но малой скоростью травления.

Выводы

- ♦ Анализ технологии травления показал, что механизм жидкостного анизотропного травления непонятен до сих пор. Результаты травления в структурах кремния не могут быть удовлетворительно объяснены на основе известных сегодня моделей. В этом состоит одна из главных причин известных трудностей в моделировании микромеханических структур при формировании их методами жидкостного анизотропного травления. В частности, в случае использования Si(100) возникает проблема стравливания выпуклых углов, а поэтому появляется необходимость проектирования топологии и структуры маски, обеспечивающей дополнительно (помимо основного назначения) компенсацию стравливания углов.
- ♦ Технология анизотропного травления кремния в растворе КОН является одной из базовых технологий объемной микромеханики и обеспечивает высокие точности изготовления сложных микромеханических структур из монокристаллического кремния. Для формирования вертикальных стенок в кремнии ориентации (100) необходима высокая концентрация КОН, а для наклонных стенок — низкая.
- ♦ В настоящее время большинство кремниевых датчиков и актюаторов изготавливают по технологии анизотропного травления. Главное достоинство таких приборов заключается в высоких технических характеристиках, обеспечиваемых совершенством кремниевых микромеханических структур.
- ♦ Наиболее сложным с непонятым до конца механизмом является процесс глубинного анизотропного травления полупроводниковой подложки при формировании объемных микромеханических структур.
- ♦ Основными тенденциями в изготовлении твердотельных кремниевых микроприборов и микроструктур являются:
 - более широкое применение двухстадийного анизотропного травления;
 - при применении фтора наблюдается возрастание объема плазменных процессов травления;
 - снижение температуры (ниже $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$) кремниевой пластины при плазменном травлении.

Список литературы

1. Васильев А., Лучинин В., Мальцев П. Микросистемная техника. Материалы, технологии, элементная база // Электронные компоненты. 2000. № 4. С. 3—9.
2. Мальцев П. П. Микросистемная техника — расширение возможностей микроэлектроники // Микроэлектроника. 2001. Т. 30, № 1. С. 32—34.
3. Wise K. D. Scanning the special Issue on Integrated Sensors, Microactuators and Microsystems (MEMS) // Proc. of the IEEE. 1988. V. 86. N 8. P. 1531—1533.
4. Петерсон К. Э. Кремний как механический материал // ТИИЭР. 1982. Т. 70. № 5. С. 11—15.
5. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983. С. 64—75.
6. Соколов Л. В. Полупроводниковые пьезорезистивные датчики давления // Зарубежная электронная техника. 1990. № 4. С. 68—95.
7. Соколов Л. В. Сенсорные твердотельные микроприборы и микросистемы на основе MEMS-технологии // Зарубежная электронная техника. 1999. № 1. С. 93—115.
8. Сауров А. Н., Зимин В. Н., Уманцев А. В. и др. Микродатчики давлений и микросистемы на их основе. // Датчики и системы. 1999. № 4. С. 28—30.
9. Scroder H., Obermeier E. A new model for Si{100} convex corner undercutting in anisotropic KOH etching // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2000. V. 10, N 2. P. 163—170.
10. Li X., Lin R., Bao J., Miao M. Study on convex-corner undercutting formed by masked-maskless etching in aqueous KOH // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2000. V. 10. N 3. P. 309—313.
11. Li X., Bao M. Micromachining of multi-thickness sensor-array structures with dual-stage etching technology // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2001. V. 11, N 3. P. 239—244.
12. Conway E. M., Cunnane V. J. Effects of chemical pretreatments on the etching process of p(100) Si in tetra-methyl ammonium hydroxide // Journal of Micromechanics and Microengineering, 2001. V. 11, N 3. P. 245—256.
13. Powell O., Harrison H. B. Anisotropic etching of {100} and {110} planes in (100) silicon // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2001. V. 11, N 3. P. 217—220.
14. Kramer T., Poul O. Postbuckled micromachined square membranes under differential pressure // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2002. V. 12, N 4. P. 475—478.
15. Тимошенко С. П., Рубиц В. Г. Моделирование процесса прецизионного травления вибрационной системы датчика угловой скорости // Микросистемная техника. 2002. С. 3—7.
16. Ashruf C. M., French P. J., Sarro P. M. et al. Galvanic etching for sensor fabrication // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2000. V. 10, N 4. P. 505—515.
17. Лучинин В. В., Савенко А. Ю. Технология локального прецизионного травления фокусированным ионным пучком // Вакуумная техника и технология. 2008. Т. 16, № 3. С. 191—195.
18. Кузнецова М. А., Лучинин В. В., Савенко А. Ю. Физико-технологические основы применения наноразмерной ионно-лучевой технологии изделий микро- и наносистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 8. С. 24—32.
19. Lee Y. D., Chang H. Y., Chang C. S. Si etching rate calculation for low pressure high density plasma source using Cl_2 gas // Journal of Vacuum Science Technology. 2000. V. 18, N 5. P. 224—229.
20. Aachbhun S., Ranson P., Hilbert C. et al. Cryogenic etching of deep trenches in silicon // Journal of Vacuum Science Technology. 2000. V. 18, N 4. P. 1848—1852.

И. А. Аверин, д-р техн. наук, зав. каф.,
Р. М. Печерская, д-р техн. наук, декан факультета,
И. А. Пронин, студент,
e-mail: pronin_i90@mail.ru, micro@pnzgu.ru,
Пензенский государственный университет

ОСОБЕННОСТИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ ЗОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ ДИОКСИД КРЕМНИЯ— ДИОКСИД ОЛОВА

Поступила 12.07.2011

Представлены физико-химические закономерности процессов охлаждения золь-гелей ортокремниевой кислоты ниже точки фазового перехода. Объяснено формирование строго упорядоченных кластеров, обладающих радиальной симметрией. Результаты моделирования подтверждены экспериментальными исследованиями.

Ключевые слова: золь-гель-технология, самоорганизация, спинодаль, бинадаль, фракталы

Синергетические эффекты в коллоидных системах позволяют создавать материалы с уникальной структурой, находящие применение в приборах нано- и микроэлектроники. Широкое распространение сегодня получает золь-гель-технология, с помощью которой возможна реализация двух противоположных продуктов — совершенных, обладающих радиальной симметрией агрегатов, и неупорядоченных перколяционных структур. Первые могут использоваться для реализации топологии приборов наноэлектронной техники, вторые уже применяют в наносенсорике.

Синергетические эффекты ярко наблюдаются при спинодальном распаде коллоидных растворов (рис. 1). Под поверхностью спинодали находятся абсолютно неустойчивые фазы, склонные к распаду. Этого можно достичь двумя способами — охлаждением или полимеризацией раствора золя. Умеренное охлаждение приводит к сборке лабиринтных структур (рис. 2), а охлаждение ниже точки фазового перехода позволяет синтезировать упорядоченные структуры.

В работе пленочные структуры на основе диоксида кремния в условиях спинодального распада при физическом охлаждении получали из растворов-золь, охлажденных до температуры жидкого азота.

На рис. 3 приведены типичные изображения полученных структур, иллюстрирующие области с высокой и низкой концентрацией наночастиц порядка десятка нанометров. Плотнупакованные

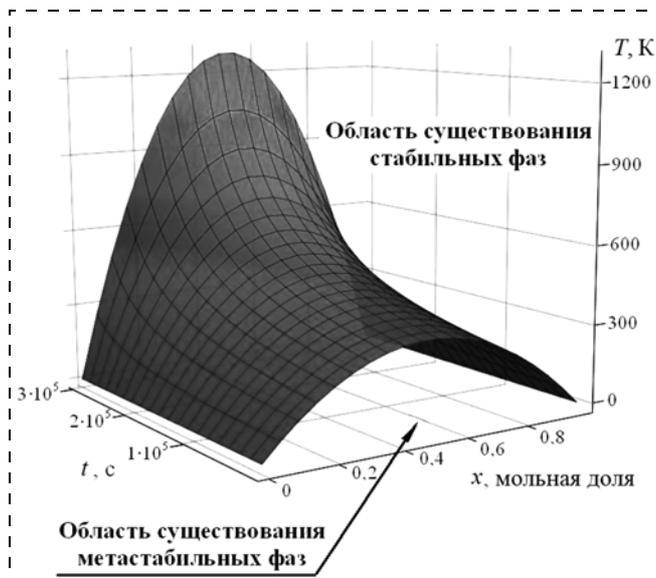


Рис. 1. Поверхность спинодали

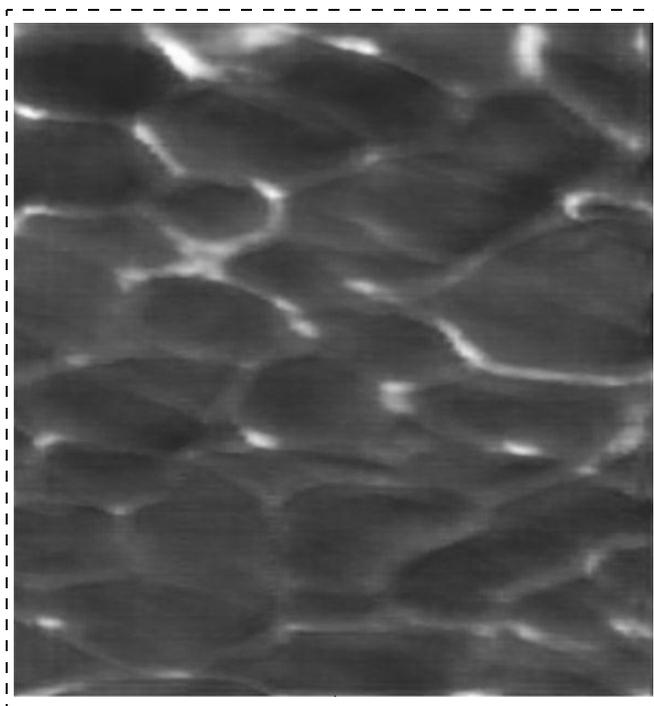


Рис. 2. Лабиринтные структуры

образования с высокой концентрацией веретенообразных наночастиц представляют самоорганизующиеся сферические области.

Для анализа полученных данных, сделаем ряд гипотез:

- рост самоорганизованного агрегата происходит при переходном процессе нагревания золя от температуры плавления $T_{пл}$ до комнатной $T_{комн}$;
- агрегат собирается из кластеров, собравшихся на стадии приготовления золя при комнатной температуре;

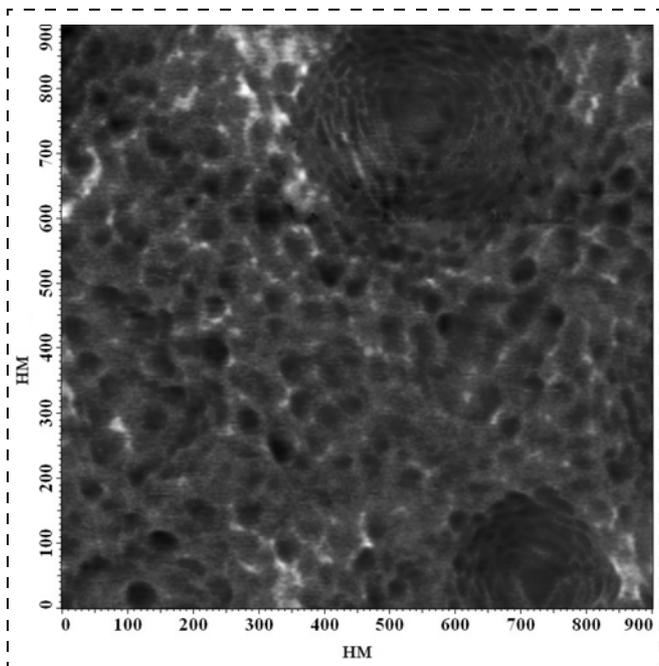
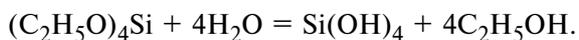


Рис. 3. Морфология поверхности пленочных наноструктур, полученных из растворов-золей, предварительно охлажденных до температуры жидкого азота

- в ходе переходного процесса нагревания фрактальная размерность самоорганизованного агрегата уменьшается от 3 до значения размерности фрактала Жульена.

Положим, что реакция гидролиза тетраэтоксисилана идет по следующей схеме:



Это значит, что в нулевой момент времени в растворе золя мы имеем одномолекулярные образования ортокремниевой кислоты. Ее начальная концентрация определяется выражением

$$c_0 = \frac{N}{V} = \frac{vN_A}{V} = \frac{\rho V_{TЭОС} N_A}{M V}, \quad (1)$$

где N — число молекул ортокремниевой кислоты в V — объеме раствора; v — количество вещества ортокремниевой кислоты; ρ — плотность золя; $V_{TЭОС}$ — объем тетраэтоксисилана; M — молярная масса ортокремниевой кислоты в нулевой момент времени; N_A — число Авогадро.

Для типичных, исследованных нами растворов начальная концентрация составляла $c_0 = 9 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Перед заморозкой золя происходит его агрегация при комнатной температуре в течение 1...2 мин. Найдем размеры полученных кластеров, воспользовавшись законом быстрой коагуляции Смолуховского:

$$c(\tau) = c_0 - Kc_0^2\tau. \quad (2)$$

Здесь $c(\tau)$ — концентрация в произвольный момент времени τ ; K — константа коагуляции, определяемая соотношением

$$K = \frac{4kT}{3\eta}\psi,$$

где k — постоянная Больцмана; T — температура; η — динамическая вязкость раствора; ψ — параметр, характеризующий эффективную вероятность соударения.

Руководствуясь принципом фрактальной агрегации, найдем зависимость диаметра d агрегата от времени его созревания в известных условиях. Положим, что при комнатной температуре получаемые агрегаты достаточно точно описываются фракталом Жульена. Тогда кинетика роста фрактального агрегата при комнатной температуре будет иметь вид, представленный на рис. 4.

Как видно из рисунка, при среднем времени коагуляции 1...2 мин при комнатной температуре ориентировочный размер кластера будет составлять 25...40 нм. Данные агрегаты наблюдаются на фазовых контрастах АСМ-снимков в виде дискретных элементов, составляющих общую картину изображения рис. 3.

На втором этапе происходит заморозка исследуемого золя до температуры жидкого азота ($T = 77 \text{ К}$). На данном этапе в золе не происходит кинетических изменений, так как его состояние квазистационарно подобно стеклу. Процессы совершенной самоорганизации происходят при переходном процессе нагревания золя при увеличении его температуры от $T_{пл}$ ($-80 \text{ }^\circ\text{C}$) до комнатной температуры.

Рассмотрим предложенные выше гипотезы. Первая базируется на законе теплопроводности Фурье. Данный закон представляет собой дифференциальное уравнение первого порядка, решение которого следует искать в экспоненциальном виде. Эмпирически определим две точки нагревания золя и аппроксимируем экспоненциальной функцией (рис. 5).

Вторая гипотеза имеет место, если на стадии заморозки не происходит агрегационных процессов, т. е. состояние золя стационарно.

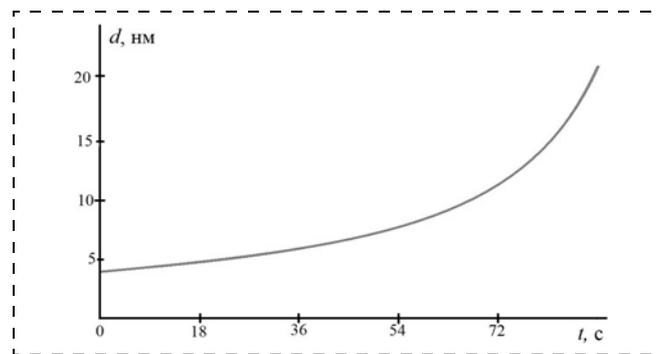


Рис. 4. Кинетика роста фрактального кластера (фрактал Жульена)

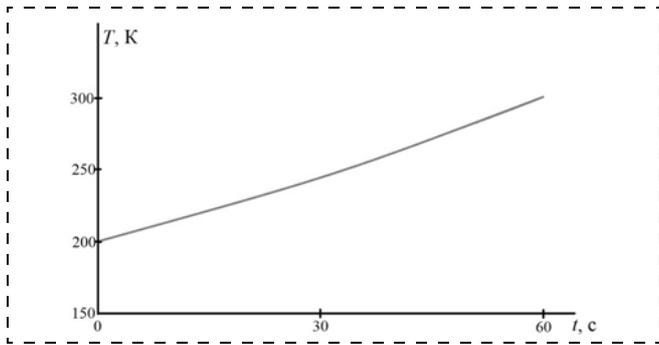


Рис. 5. Кинетика нагревания золя

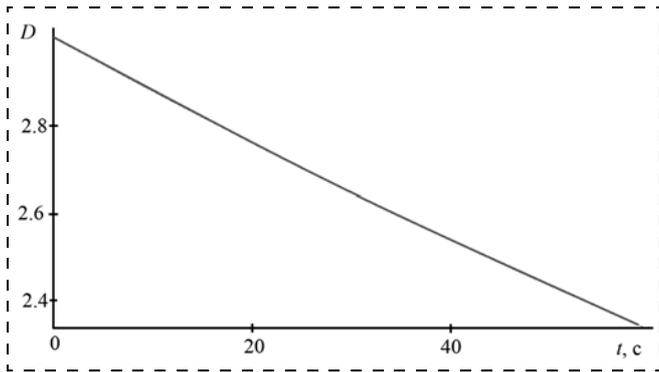


Рис. 6. Изменение фрактальной размерности при нагревании золя

Третья гипотеза базируется на законах изменения скорости теплового движения кластеров. До температуры плавления кластеры покоятся, нет процессов коагуляции. При плавлении у кластеров появляется некоторая скорость, которая мала. Именно это способствует их "укладке" в практически монолитный материал с фрактальностью, близкой к 3. При нагревании фрактальность D уменьшается до значения, соответствующего модели Жульена ($D_0 = 2,335$) (рис. 6).

Найдем диаметр самоорганизованного фрактального образования с учетом того, что его рост происходит в интервале температур $T_{пл} \dots T_{комн}$.

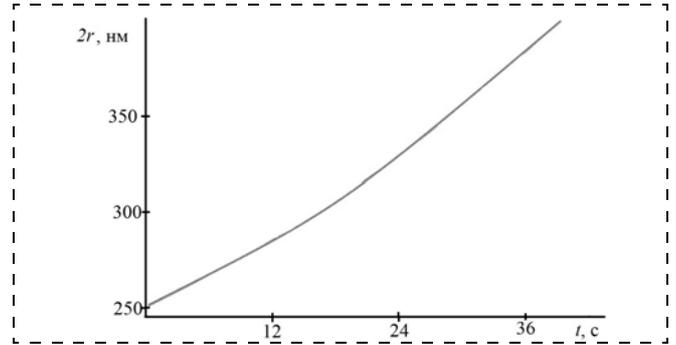


Рис. 7. Зависимость диаметра агрегата от времени

Найдем также среднее значение фрактальной размерности полученных агрегатов.

Решим уравнение Смолуховского с учетом того, что начальный размер кластера составляет 25 нм (среднее значение, найденное ранее) и температура раствора меняется экспоненциально. Данное решение даст нам число кластеров в агрегате в произвольный момент времени. С учетом изменения фрактальности, воспользовавшись соотношением для числа частиц в агрегате n , получим (при размере одной частицы α) зависимость числа частиц n в кластере от его фрактальной размерности D :

$$n(r) = (\alpha^{-D})r^D. \quad (3)$$

Путем простых арифметических операций найдем радиус кластера

$$r(n) = \zeta \left(\frac{n}{\alpha^{-D}} \right)^{1/D}, \quad (4)$$

где ζ — размерный коэффициент.

Зависимость диаметра агрегата от времени для исследования растворов показана на рис. 7.

Средний размер агрегата будет составлять 200...250 нм. Зависимость размера от условий его получения в аналитическом виде примет вид

$$r(n) = \frac{c_0 - Kc_0^2 \Delta t}{\left(c_0 - Kc_0^2 \Delta t - K \left(c_0 - Kc_0^2 \Delta t \right)^2 \tau \right) \left(\alpha 13^{\ln \left(\frac{c_0}{c_0 - Kc_0^2 \Delta t} - 13 \right) - 3 \exp \left[\frac{1}{\delta t} \ln \left(\frac{D_0}{3} \right) \tau \right]} \right)} \left[\frac{1}{3} \exp \left[-\frac{1}{\delta t} \ln \left(\frac{D_0}{3} \right) \tau \right] \right],$$

где Δt — время первого этапа (до заморозки); δt — время нагревания золя до комнатной температуры после заморозки; D_0 — фрактальность агрегата Жульена.

По результатам исследований методом АСМ было показано, что, варьируя термодинамическими и кинетическими условиями золь-гель-нанотехнологии, можно управлять эволюцией фрактальных агрегатов на основе диоксида кремния. В работе экспериментально определены различные этапы эволюции фрактально агрегированных систем на основе диоксида кремния:

- образование сферических структур при нуклеофильном росте;
- развитие лабиринтных структур в условиях спинодального распада при "химическом" охлаждении (доперколяционные структуры);
- образование перколяционных сетчатых структур.

В условиях спинодального распада при физическом охлаждении из растворов-золей, охлажденных до температуры жидкого азота, были получены плотноупакованные образования с высокой концентрацией веретенообразных наночастиц диоксида кремния размером порядка десятка нанометров, представляющих самоорганизующиеся сферические области.

В результате умеренной заморозки золя наблюдаются следующие явления: в области нуклеофильного распада наблюдается замедление роста зародышей; при охлаждении системы ниже температуры спинодали происходит спинодальный распад раствора — новое неупорядоченное состояние. При охлаждении золя ниже температуры фазового перехода наблюдается противоположное явление — образование высокоупорядоченных агрегатов. Данное явление объясняется переходными процессами жесткого охлаждения—нагревания золя.

Список литературы

1. Семиченко Г. Д. Золь-гель процесс в керамической технологии. Харьков: Харьковский политехнический университет, 1997.

2. Максимов А. И., Мошников В. А., Таиров Ю. М., Шилова О. А. Основы золь-гель-технологии нанокompозитов. 2-е изд. СПб.: Элмор, 2008. 225 с.

3. Грачева И. Е., Максимов А. И., Мошников В. А. Анализ особенностей строения фрактальных нанокompозитов на основе диоксида олова методами атомно-силовой микроскопии и рентгеновского фазового анализа // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. Вып. 10. С. 16—23.

4. Мошников В. А., Грачева И. Е. Сетчатые газочувствительные нанокompозиты на основе диоксидов олова и кремния // Приложение к журналу "Вестник РГРТУ". Рязань: Изд. РГРТУ, 2009. № 4.

5. Грачева И. Е., Карпова С. С., Мошников В. А., Пшелко Н. С. Сетчатые иерархические пористые структуры с электроадгезионными контактами // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2010. № 8. С. 27—32.

6. Grachova I. E., Karpova S. S., Moshnikov V. A. Gas-sensitive hierarchical porous nanostructures for multisensor systems // Annual proceedings the Technical University of Varna. 2010. P. 97—102.

7. Жюльен Р. Фрактальные агрегаты // Успехи физических наук. 1989. Т. 157. № 2. С. 339—357.

8. Жабров В. А., Мошников В. А., Таиров Ю. М., Шилова О. А. Золь-гель-технология: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2004. 156 с.

9. Ролдугин В. И. Свойства фрактальных дисперсных систем // Успехи химии. 2003. Т. 72, № 11. С. 1027—1054.

10. Ролдугин В. И. Самоорганизация наночастиц на межфазных поверхностях // Успехи химии. 2004. Т. 73, № 2. С. 123—156.

11. Шилова О. А., Шилов В. В. Нанокompозиционные оксидные и гибридные органо-неорганические материалы, получаемые золь-гель методом. Синтез. Свойства. Применение // Наносистемы. Наноматериалы. Нанотехнологии / Под ред. акад. А. П. Шпака. Киев: Академперіодика. 2003. Т. 1, № 1. С. 9—83.

12. Шпак А. П., Шилов В. В., Шилова О. А., Куницкий Ю. А. Диагностика наносистем. Многоуровневые фрактальные наноструктуры. Ч. II. Киев: Академперіодика, 2004. 112 с.

13. Эфрос А. Л. Физика и геометрия беспорядка // Библиотечка "Квант". М.: Наука, 1982. Вып. 19. 265 с.

14. Гросберг А. Ю., Хохлов А. Р. Статистическая физика макромолекул: учеб. руководство. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989, 344 с.

15. Розенберг Б. А. Микрофазовое разделение в отверждающихся многокомпонентных полимер-олигомерных системах // Российское химическое общество им. Д. И. Менделеева. 2001. Т. XLV, № 5—6. С. 23—31.

УДК 623.3

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

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ И ОСВОЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА НАНОМАТЕРИАЛОВ

Поступила в редакцию 05.09.2011

Под патронажем Российской академии наук (РАН), Министерства образования и науки РФ, Отделения химии и наук о материалах РАН, Научного Совета по наноматериалам при Президиуме РАН, Института металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН и МГУ им. М. В. Ломоносова весной 2011 года в Москве была организована и проведена IV Всероссийская конференция по наноматериалам.

Ключевые слова: Российская академия наук РАН, наноматериалы, фуллерены, мультимодальные наносистемы, модификация поверхности, нанокристаллическая структура, катализ, адсорбция, гидроксил-апатит, халькогениды

В Институте физики металлов УрО РАН И. В. Бызовым, А. Е. Ермаковым, А. А. Мысыком и М. А. Уйминым исследована возможность использования "гигантских фуллеренов" (ГФ) в качестве платформы для формирования мультимодальных наносистем. Структура "ядро—оболочка" ГФ или инкапсулированных наночастиц металлов в углерод позволяет химически модифицировать поверхности для придания им ряда функциональных свойств с сохранением на длительное время базовых физико-химических свойств метастабильных нанокристаллических материалов. В частности, биосовместимые нетоксичные нанокompозиты применимы в качестве многофазовой платформы, на которых терапевтические и диагностические функции выполняют радиофармацевтические препараты, стабильность в биосредах обеспечивают полимерные лиганды, а синтетические пептиды играют роль таргетинговых биомолекул. Структурные особенности полученных ме-

талл-углеродных нанокмозитов исследованы, в частности, методами рентгеновской адсорбционной и фотоэлектронной спектроскопии, просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения и рентгеноструктурного анализа. Финансовая поддержка исследованию оказана по Программе Президиума УрО РАН и РФФИ (грант № 10-02-00323).

В возглавляемом вице-президентом РАН академиком С. М. Алдошиным Институте проблем химической физики РАН, научным коллективом в составе Н. Г. Березкиной, А. Н. Жигача, Е. С. Зотовой, Б. В. Кускова, М. Л. Кускова, И. О. Лейпунского, П. А. Пшеничникова, Н. И. Стоенко и В. Б. Сторожева разработан левитационно-струйный конденсационный метод получения и химической модификации поверхности наноразмерных и субмикронных порошков металлов, сплавов и интерметаллических соединений. Среди базовых факторов, обеспечивающих качество получаемого порошка, можно отметить агломерацию и диффузионное спекание насцентных частиц при контакте, а также коалесценцию частиц в потоке. При нанесении на поверхность насцентных частиц газофазным методом барьерных покрытий в потоке несущего инертного газа до их касания друг с другом возможно формирование методом вторичного разогрева кислород- и азотсодержащих диэлектрических покрытий толщиной, сопоставимой с радиусом частицы.

Примером успешной российско-белорусской научной кооперации является сотрудничество Государственного научно-исследовательского технического института Российской сельскохозяйственной академии с НАН Беларуси, Белорусским национальным техническим университетом, Гомельским университетом им. Ф. Скорины и Государственным техническим университетом им. П. О. Сухого. Коллективом ученых в составе П. А. Витязя, В. Е. Гайшун, А. Ф. Ильющенко, Ю. А. Мазалова, В. С. Нисса, А. Н. Семченко и Л. В. Судника проведен комплекс технологических исследований получения низкоразмерных оксидно-керамических порошков методами паротермального синтеза и золь-гель синтеза, а также их совмещением. Химический состав, дисперсность, фазовая чистота и морфология порошков с нанокристаллической структурой позволяют их применять для синтеза порошков на основе оксидов магния и цинка, смеси сложных оксидов, композиционных материалов сегнетоэлектрической керамики, агломератов нанокристаллических гидроксидов алюминия и магниторезистивных материалов. Показано, что ближний порядок в расположении атомов стеклообразного, аморфного, жидкого и других видов конденсированного состояния вещества несвойственен для ультрадисперсных частиц. Им присущ порядок, согласно которому при переходе от центра к поверхности изменяется межатомное расстояние.

В МГУ им. М. В. Ломоносова, возглавляемом вице-президентом РАН академиком В. А. Садовничим, научным коллективом в составе М. С. Аскеры, А. В. Белецкой, Е. В. Голубиной, Н. Е. Кузьменко, С. Н. Ланина, Д. Ф. Мухамедзянова,

С. Н. Николаева, Д. А. Пичугиной и А. Ф. Шестакова изучены каталитические и адсорбционные свойства наночастиц золота. В частности, разработаны модели для детального описания и моделирования адсорбционных процессов каталитических реакций углеводородов [1]. Поскольку адсорбционные и каталитические свойства наночастиц золота зависят от их заряда, размеров и строения, исследовались углеводороды различного строения. Установлено, что катионные центры и расположенные на ребрах и вершинах кластера координационно-ненасыщенные атомы золота являются активными адсорбционными центрами [2]. Адекватность соответствия центров реального композита с модельными кластерами подтверждена в ходе сравнения данных газохроматографических исследований с теоретическими результатами. Подтверждены свойства изомеризации углеводородов и катализаторов окисления СО при низких температурах [3]. Финансовая поддержка работе оказана по линии грантов РФФИ 10.03.00999, МК-158.2010.3 и НШ-6512.2010.3.

Сотрудником Института химии твердого тела и механохимии СО РАН М. В. Чайкиной разработаны гидроксил-апатитовые наноразмерные материалы для использования в качестве покрытий для медицинских имплантатов. Гидроксил-апатит применяется для покрытия биоинертных и металлических керамических имплантатов и обеспечивает их высокую степень вживления. Разработанный механохимический метод синтеза, в зависимости от соотношения структуры апатита и фосфата реализуется на поверхности фосфата по топоксическому механизму или через аморфное состояние реакционной смеси. В отличие от традиционного трудоемкого и длительного метода механохимический синтез проводится в планетарной мельнице: за 12 мин синтезируются гидроксил-апатит и его модификации в нанокристаллическом состоянии.

Нульмерным наноматериалам на основе халькогенидов было посвящено выступление А. А. Ремпель из Института химии твердого тела (ИХТТ) УрО РАН. На основе наноматериалов создаются квантовые точки, которые, в отличие от молекулярных красителей, излучают электромагнитные волны в узком диапазоне длин волн, а поглощают в широком диапазоне. При эффекте синего смещения цвет флуоресценции определяется размером квантовых точек, что упрощает применение их в белых и монохромных светодиодах, солнечных элементах и лазерах. Среди приоритетных областей использования халькогенидных квантовых точек следует отметить медицину и биологию: например, их присоединение к антителам и биомолекулам обеспечивает мониторинг движения внутри организма. Предлагаемый метод химической конденсации в водных растворах квантовых точек базируется на технологии генерации кластеров твердого вещества до формирования наночастиц с размерами не выше радиуса экситона в полупроводнике. Метод применялся для синтеза наночастиц сульфидов

кадмия и цинка в диэлектрической матрице, в растворах, тонких пленках и порошках.

Также в ИХТТ УрО РАН А. А. Ремпель совместно с С. В. Ремпель и Н. С. Кожевниковой в сотрудничестве с Н. Н. Александровой из ФГУП "Екатеринбургский НИИ вирусных инфекций" Роспотребнадзора разработан нанодисперсный сульфид кадмия для применения в медицине и биологии. В частности, исследованы возможности применения наночастиц сульфида кадмия для изучения структуры клеток и визуализации клеточных культур. Флуоресцентные наночастицы CdS на базе этилендиаминтетрауксусной кислоты, стабилизированные органической оболочкой, получены в водном растворе методом химической конденсации. Благодаря коррекции настроек по времени инкубации с клеточными культурами раствора наночастиц и их концентрации выявлена зависимость от времени инкубации, функционального состояния и типа клеток степени проникновения в них наночастиц CdS. Метод химической конденсации, в отличие от большинства методов получения наноматериалов, обеспечивает получение без применения органических токсичных растворителей за одну стадию коллоидного раствора флуоресцентных наночастиц CdS [4–5]. Методами полуконтактной атомно-силовой микроскопии, динамического рассеяния света и рентгеноструктурного анализа проводилась аттестация по размерам наночастиц. На фоне незначительного количества наночастиц размером от 30 до 40 нм, их средний диаметр составлял порядка 3 нм. Конъюгаты производились из клеточных культур и наночастиц, и методом флуоресцентной оптической микроскопии осуществлялась регистрация флуоресценции образцов. Важным преимуществом наночастиц CdS является проникновение внутрь клеток с мониторингом их структуры, в том числе ядерной мембраны, ядра и цитоплазмы, наряду с возможностью скапливаться на мембране и подсвечивать отдельные клетки. При изучении конъюгатов наночастиц CdS выявлен различный характер люминесценции наночастиц внутри клетки и на ее мембране. В различных областях длин волн видимого оптического диапазона располагаются максимумы спектров флуоресценции конъюгатов.

Выводы

1. В методе химической конденсации квантовых точек в водных растворах применяется механизм взаимодействия серосодержащих органических и неорганических соединений (например, растворимые сульфиды щелочных металлов, диамид тиоугольной кислоты, сероводород и тиосульфат натрия) с растворимыми комплексными соединениями кадмия или свинца. Вследствие быстрого гидролиза в водных растворах растворимых солей Cd и Pb оптимизация метода предполагает проведение термодинамического анализа равновесного существования цианамидов, гидроксидов и сульфидов, что способствует упрощению процес-

дуры выбора начальных условий синтеза наночастиц халькогенидных материалов.

2. Ковалентная пришивка пептидов, полиэтиленгликолей и радионуклидов увеличивает срок пребывания наночастиц в кровотоке для адресной доставки мультимодальных систем. Для медицинской диагностики и для терапии при изотопическом замещении применимы радиоcontrastные препараты на основе меченных изотопами ^{99}Tc и ^{123}I наночастиц Fe@C. Функционализированные наночастицы на базе Fe@C применимы в качестве контрастных реагентов при магнитно-резонансной томографии. Помимо дистрибутивных и визуализационных функций, возможно применение наноконструктов как сорбентов, селективных катализаторов и прочих агентов.

3. Получаемые левитационно-струйным методом ультрадисперсные порошки металлов с функциональными покрытиями применимы в биологии и медицине, в качестве энергетических конденсированных систем (нитраминол) и наполнителей в композитах с матрицей из высокомолекулярного полиэтилена (теплопроводящих диэлектриков). Несмотря на невысокую производительность метода применим для получения наночастиц металлов с поверхностью, модифицированной в соответствии со сферой применения частиц. В частности, возможно повышение значений характеристик, отвечающих за гидрофобные, противоскользящие, каталитические и диэлектрические свойства.

4. По сравнению с обычными кристаллами в ультрадисперсных частицах имеются фазовые расслоения и аморфизация, вакансии, неоднородные деформации и микроискажения, увеличены средние квадратичные смещения атомов и изменены межплоскостные расстояния, что обусловлено нескомпенсированностью связей у значительной доли атомов в приповерхностных слоях, влиянием геометрического фактора и неравновесным состоянием. Следствием этого является высокая химическая активность, так как влияние примесей на искажения в структуре — результат развитой поверхности.

5. К числу перспективных нанодисперсных материалов относятся наночастицы сульфида кадмия в водных растворах. Среди возможных областей применения наночастиц CdS — изучение протекающих в биологических клетках процессов, визуализация клеточных культур и разработка методов экспресс-диагностики вирусных инфекций.

Список литературы

1. Pichugina D. A., Beletskaya A. V., Kuz'menko N. E., Shestakov A. F. // Rev. Adv. Mater. Sci. 2009. V. 20, N 1. P. 48–54.
2. Пичугина Д. А., Ланин С. Н., Ковалева Н. В., Шестаков А. Ф., Кузьменко Н. Е. // Известия академии наук. Серия химическая, 2010. № 11.
3. Golubina E. V., Pichugina D. A., Majouga A. G., Aytkenov S. A. // Studies in Surface Science and Catalysis. 2010. V. 175. P. 297–300.
4. Ремпель А. А. // Успехи химии. 2007. Т. 76, № 5. С. 474–500.
5. Кожевникова Н. С., Ворох А. С., Ремпель А. А. // Журнал общей химии. 2010. Т. 80, Вып. 2. С. 250–255.

УДК 537.6

А. А. Сопильняк¹, студент,
Ю. К. Фетисов¹, д-р физ.-мат. наук, проф., декан,
С. В. Лебедев², канд. физ.-мат. наук, зав. лаб.,
А. Г. Сегалла³, канд. физ.-мат. наук, нач. НТК
¹ Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики "МИРЭА"
² Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"
³ Научно-производственное объединение ОАО "НИИ "Элла"
E-mail: fetisov@mirea.ru

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ДАТЧИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ПЛАНАРНОЙ БИМОРФНОЙ СТРУКТУРЫ С ВОЗБУЖДАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ КАТУШКОЙ

Поступила в редакцию 15.07.2011

Описан пьезоэлектрический датчик постоянных магнитных полей на основе планарной биморфной структуры из цирконата титаната свинца, возбуждаемый электромагнитной катушкой. Датчик использует силу Ампера, пьезоэффект и резонанс изгибных колебаний структуры для увеличения выходного напряжения. Датчик имеет чувствительность ~ 250 В/(А·Тл) и линейную зависимость выходного напряжения от поля в диапазоне полей $\sim 10^{-5} \dots 0,3$ Тл. Разработана методика расчета характеристик датчика.

Ключевые слова: датчик магнитного поля, сила Ампера, пьезоэффект, цирконат-титанат свинца

Введение

Принцип работы пьезоэлектрических (ПЭ) датчиков магнитных полей основан на комбинации силы Ампера, действующей со стороны поля на проводник с током, и пьезоэффекта в пьезоэлектрике. Сила Ампера передается от проводника к пьезоэлектрику, вызывает его деформацию и на электродах последнего генерируется напряжение, значение которого u пропорционально индукции B измеряемого поля. Сила Ампера $F_A \sim IB$, т. е. пропорциональна полю B и току I , что обеспечивает линейность характеристик и возможность управле-

ния чувствительностью датчиков. Для возбуждения датчиков используют переменный ток и регистрируют амплитуду переменного напряжения u с пьезоэлемента.

Предложено несколько конструкций ПЭ датчиков, отличающихся геометрией пьезоэлементов, токовых проводников и режимами работы. Датчик в форме диска из цирконата-титаната свинца (PZT) с электродами на плоскостях и токовым проводником, приклеенным к образующей диска, имел чувствительность $u/(IB) \approx 33$ мВ/(А·Тл) [1]. Датчик в виде пластины из монокристалла магнийниобата-титаната свинца (PMN-PT) с электродами на плоскостях пластины, по которым одновременно пропускали ток, имел чувствительность ~ 64 мВ/(А·Тл) [2]. Аналогичный датчик на монокристаллической PMN-PT пластине с двумя дополнительными токовыми проводниками, приклеенными к торцам пластины, имел чувствительность ~ 230 мВ/(А·Тл) [3].

В работе [4] описан резонансный ПЭ датчик магнитного поля в форме радиально поляризованного PZT-кольца с электродами на внутренней и внешней образующих кольца. Один из электродов кольца был разрезан и использовался одновременно как токовый проводник. При частоте тока ~ 60 кГц, равной частоте радиальных акустических колебаний кольца, вследствие резонансного увеличения деформаций в пьезоэлектрике, чувствительность датчика возрастала на порядок — до ~ 2 В/(А·Тл). ПЭ датчик магнитных полей, использующий резонанс изгибных колебаний планарной биморфной PZT-структуры, возбуждаемый текущим по среднему электроду биморфа переменным током с частотой ~ 1 кГц [5], показал чувствительность ~ 10 В/(А·Тл).

В настоящей работе предложен, экспериментально и теоретически исследован ПЭ резонансный датчик магнитного поля на основе планарной биморфной PZT-структуры с возбуждающей электромагнитной катушкой. Применение катушки позволяет, как будет показано, существенно увеличить чувствительность датчика, повысить линейность его характеристик и расширить диапазон измеряемых магнитных полей.

Конструкция и принцип работы датчика

Конструкция датчика схематически изображена на рис. 1. Основным элементом датчика является монокристаллическая биморфная структура, содержащая два пьезоэлектрических слоя и металлические электроды, один из которых расположен между слоями,

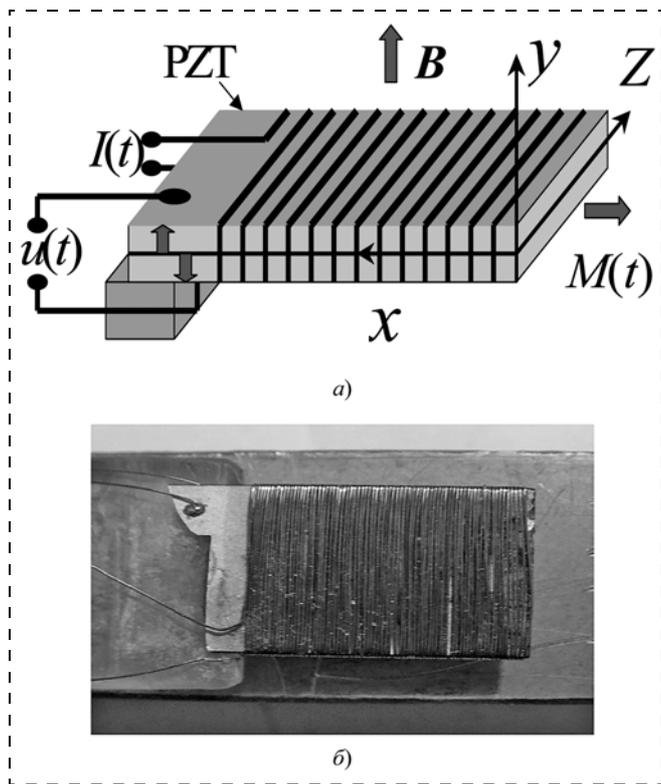


Рис. 1. Пьезоэлектрический датчик магнитного поля на основе биморфной структуры с возбуждающей катушкой:
 а — конструкция; б — внешний вид. Стрелки показывают направления поляризации слоев

а два других — на внешних поверхностях структуры. Структура изготовлена методом пленочной керамической технологии из PZT с температурой спекания 950 °С. Длина структуры вдоль оси x составляла 12 мм, ширина вдоль оси z — $a = 8$ мм, а толщина каждого слоя вдоль оси y равнялась $h/2 = 0,1$ мм. Толщина Pd-Ag электродов не превышала ~ 4 мкм. Один конец структуры был жестко закреплен на массивном основании, так что длина свободной части биморфа вдоль оси x составляла $L = 9,5$ мм. Слои PZT поляризовали навстречу друг другу путем нагрева до ~ 100 °С, приложения к электродам напряжения 200 В и последующего охлаждения до комнатной температуры. На свободную часть биморфной структуры была намотана и закреплена эпоксидным клеем возбуждающая катушка с активным сопротивлением 4,8 Ом, содержащая $N = 75$ витков провода диаметром 80 мкм. Датчик на вращающейся подставке помещали между полюсами электромагнита в постоянное магнитное поле $B = 0 \dots 1$ Тл, которое измеряли тесламетром. Через катушку от внешнего генератора ГЗ-117 пропускали переменный ток $I \cos(2\pi ft)$ с амплитудой I до 40 мА и частотой f , равной 10 Гц...200 кГц.

Описанный ПЭ датчик работает следующим образом. Протекающий через катушку ток $I(t)$ создает знакопеременный магнитный момент $M(t)$, который взаимодействует с магнитным полем B и стремится повернуть катушку в направлении поля.

В результате возбуждаются изгибные колебания биморфной структуры, она деформируется и между внешними электродами структуры вследствие пьезоэффекта генерируется переменное напряжение $u(t) = u \cos(2\pi ft + \beta)$. Амплитуда генерируемого напряжения u пропорциональна индукции поля B и силе тока I . При совпадении частоты возбуждающего тока с частотой собственных изгибных колебаний структуры значение деформаций в пьезоэлектрике и амплитуда генерируемого напряжения резонансно возрастают в Q (добротность) раз. Частотные и полевые зависимости амплитуды u , сдвига фазы β генерируемого напряжения регистрировали с помощью цифрового осциллографа TDS 3032B с входным сопротивлением 1 МОм.

Результаты измерений

На рис. 2 приведена измеренная зависимость амплитуды выходного напряжения датчика $u(f)$ от частоты возбуждающего тока f при амплитуде тока $I = 17$ мА и магнитном поле $B = 0,27$ Тл. Поле направлено перпендикулярно к плоскости структуры, как показано на рис. 1. Резонанс вблизи частоты $f_1 = 1,14$ кГц с амплитудой $u_1(f_1) = 1,2$ В и добротностью $Q = 49$ соответствует, как будет показано далее, возбуждению основной моды изгибных колебаний структуры. На частоте резонанса сдвиг фаз между напряжением и возбуждающим током составлял $\beta(f_1) = 90^\circ$.

На рис. 3 приведена измеренная зависимость выходного напряжения датчика u_1 на резонансной частоте от индукции магнитного поля B при том же токе $I = 17$ мА. В исследованном диапазоне полей зависимость имела линейный вид. С увеличением B резонансная частота колебаний и добротность структуры практически не изменялись, что свидетельствует о линейности акустических колебаний структуры.

На рис. 4 показана зависимость выходного напряжения датчика u_1 на резонансной частоте от амплитуды текущего через катушку тока I при фиксированном магнитном поле $B = 0,27$ Тл. Вид-

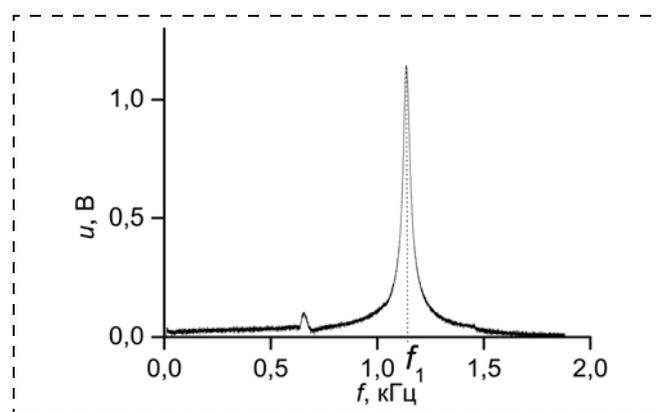


Рис. 2. Зависимость напряжения u , генерируемого датчиком, от частоты тока f при $B = 0,27$ Тл и $I = 17$ мА

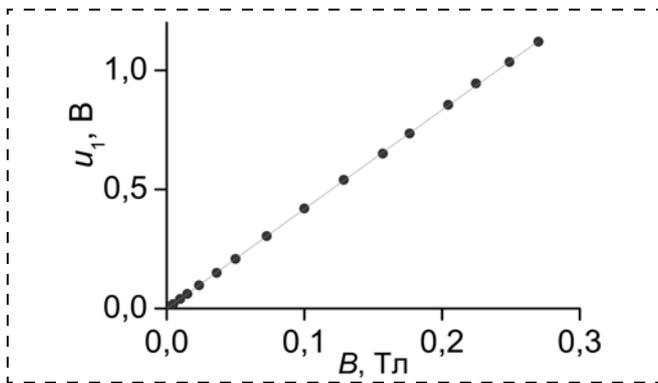


Рис. 3. Зависимость напряжения u_1 , генерируемого датчиком на резонансной частоте f_1 , от магнитного поля B при $I = 17$ мА

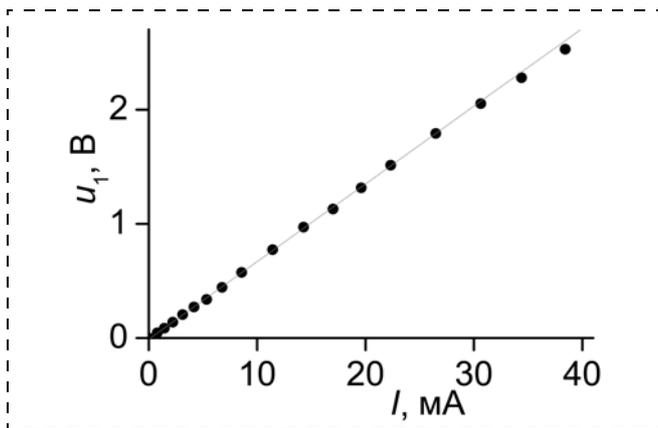


Рис. 4. Зависимость напряжения u_1 , генерируемого датчиком на резонансной частоте f_1 , от тока I через катушку при $B = 0,27$ Тл

но, что в исследованном интервале токов зависимость также линейна.

На рис. 5 точками изображена измеренная зависимость выходного напряжения датчика u_1 на резонансной частоте от угла α между перпендикуляром к плоскости структуры и направлением поля при постоянных значениях $B = 0,27$ Тл и $I = 17$ мА. Сплошной линией на рисунке изображена рассчитанная кривая $u_1 \approx |\cos(\alpha)|$. Совпадение зависимо-

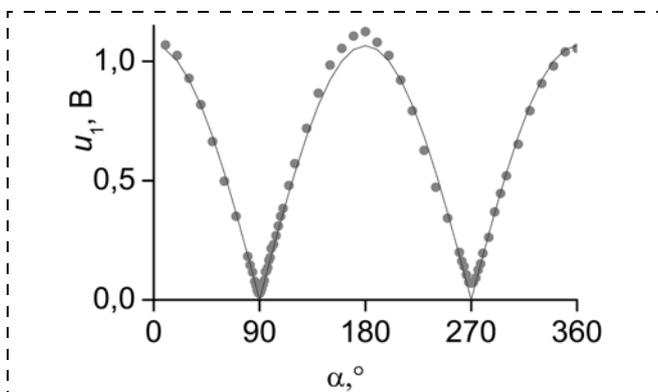


Рис. 5. Зависимость напряжения u_1 , генерируемого датчиком на резонансной частоте f_1 , от ориентации поля при $B = 0,27$ Тл и $I = 17$ мА

стей свидетельствует о том, что амплитуда генерируемого сигнала пропорциональна нормальной к плоскости структуры компоненте магнитного поля B_y .

Расчет характеристик датчика

Рабочую резонансную частоту датчика оценим, используя формулу для частоты малых изгибных колебаний пластины прямоугольного сечения, жестко закрепленной на одном конце и свободной на другом [6]:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \frac{k^2}{L^2} \sqrt{\frac{YJ}{\gamma A}} = \frac{k^2}{4\pi\sqrt{3}} \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{Y}{\gamma}}, \quad (1)$$

где Y и γ — модуль Юнга и плотность материала пластины; $J = ah^3/12$ — момент инерции поперечного сечения относительно нейтральной оси; L , a , h — длина, ширина и толщина пластины, соответственно; $k = 1,875$ — коэффициент для низшей моды изгибных колебаний. Подставляя в формулу параметры PZT ($Y = 7 \cdot 10^{10}$ Н/м², $\gamma = 7,7 \cdot 10^3$ кг/м³) и размеры структуры, получаем значение $f_1 = 1,08$ кГц, которое хорошо совпадает с измеренным 1,15 кГц.

Амплитуду u_1 генерируемого датчиком сигнала найдем, рассмотрев неоднородное распределение механических напряжений T при изгибе структуры и связь механических напряжений с электрическим полем E в пьезоэлектрике.

На биморфную структуру, помещенную в перпендикулярное к плоскости структуры магнитное поле B (см. рис. 1, а), со стороны витков с током I действует сила Ампера, которая создает распределенный момент сил с линейной плотностью вдоль оси x

$$M_1 = F_{A1} h = IN_1 a B h, \quad (2)$$

где N_1 — число витков катушки на единицу длины; a и h — ширина и толщина структуры. В результате в структуре возникают касательные механические напряжения, распределение которых неоднородно по длине и толщине структуры и определяется формулой

$$T_x(x, y) = \frac{M_1}{J} x y. \quad (3)$$

Механические напряжения равны нулю на свободном конце структуры ($x = 0$), линейно растут при приближении к точке крепления ($x = L$) и обращаются в ноль в центральной плоскости ($y = 0$) структуры. При изгибе биморфной структуры, у которой средний электрод расположен в центральной плоскости, один слой пьезоэлектрика растягивается ($T_x > 0$), а другой — сжимается ($T_x < 0$), поэтому выбранная поляризация слоев в противоположных направлениях приводит к сложению генерируемых слоями сигналов.

В слое пьезоэлектрика компоненты электрической индукции D и деформации S связаны с ком-

понентами механического напряжения T и электрического поля E [7]

$$\left. \begin{aligned} D_y &= D_{31} T_x + \varepsilon \varepsilon_0 E_y; \\ S_x &= s_{xx} T_x + d_{31} E_y, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где d_{31} и s_{xx} — пьезоэлектрический модуль и податливость пьезоэлектрика; ε — диэлектрическая проницаемость; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ — электрическая постоянная.

Для разомкнутой цепи ($D = 0$) из уравнений (4) получаем неоднородное распределение поля E_y в структуре

$$E_y(x, y) = -d_{31} T_x(x, y) / \varepsilon_0 \varepsilon. \quad (5)$$

Интегрируя выражение (5) с учетом соотношений (2) и (3) по объему структуры и принимая во внимание встречные направления поляризации слоев, находим связанный заряд на внешних поверхностях слоев

$$q = \frac{d_{31} M_1 h a L^2}{8J}. \quad (6)$$

Поскольку поверхности структуры металлизированы, то постоянство потенциала приведет к перераспределению зарядов в электродах и между ними установится разность потенциалов, которую можно оценить как $u = q/C$, где $C = \varepsilon \varepsilon_0 a L/h$ — емкость структуры.

Окончательно, учитывая увеличение деформаций в Q (добротность) раз на частоте резонанса f_1 , получаем приближенное выражение для амплитуды электрического напряжения, генерируемого биморфной пьезоэлектрической структурой с возбуждающей катушкой в магнитном поле:

$$u_1 = Q \frac{3d_{31}}{2\varepsilon \varepsilon_0} NIB. \quad (7)$$

Видно, что амплитуда напряжения зависит от электрических и механических параметров используемого пьезоэлектрика и числа витков катушки N . Оценка с использованием выражения (7) соответствующих эксперименту параметров PZT ($d_{31} = 190 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/Н}$, $\varepsilon = 2000$), измеренной добротности $Q = 49$, $I = 17 \text{ мА}$ и $B = 0,27 \text{ Тл}$ дает амплитуду генерируемого напряжения $u_1 \approx 0,3 \text{ В}$, согласующуюся по порядку величины с измеренной.

Как следует из формул (1) и (7), при неизменных значениях остальных параметров рабочую частоту датчика f_1 и амплитуду генерируемого напряжения u_1 можно изменять, подбирая размеры биморфной PZT-структуры. Частота и амплитуда напряжения не зависят от ширины a структуры; с увеличением толщины h структуры частота f_1 ли-

нейно растет, а u_1 остается неизменной; при увеличении длины L структуры частота f_1 быстро падает, в то время как u_1 линейно растет пропорционально числу витков катушки.

Обсуждение результатов

Чувствительность ПЭ датчика на основе биморфной PZT-структуры с возбуждающей электромагнитной катушкой, рассчитанная по наклону зависимостей на рис. 3 и рис. 4, составила $u/(IB) = 245 \text{ В/(А} \cdot \text{Тл)}$. Это значение на два порядка выше чувствительности датчика на основе PZT-кольца [3] и более, чем на порядок, превышает чувствительность датчика на основе планарной биморфной PZT-структуры [5], которые возбуждались током, протекающим через электроды структур. В описанном датчике отсутствует электрическая связь между возбуждающей (катушка) и регистрирующей (биморфная структура) цепями, что значительно уменьшило уровень прямой электромагнитной наводки. Без магнитного поля при токе через катушку 20 мА амплитуда наводки в измерительной цепи не превышала $\sim 0,1 \text{ мВ}$. Отсюда, используя измеренную чувствительность датчика, получаем оценку для минимального значения регистрируемого поля $B_{\text{мин}} \sim 2 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$. Как следует из данных рис. 5, датчик имеет высокую избирательную чувствительность к компоненте магнитного поля, перпендикулярной к плоскости биморфной структуры, что позволяет использовать датчик для создания векторных измерителей магнитных полей. Предложенный датчик с возбуждающей катушкой, сопротивление которой $\sim 5 \text{ Ом}$, легче согласовать с генератором, чем датчики [4, 5], у которых возбуждающий ток протекает непосредственно через электрод пьезоэлемента с сопротивлением $\sim 0,1 \text{ Ом}$. Потребляемая возбуждающей катушкой датчика мощность при токе 20 мА составляла $\sim 2 \text{ мВт}$.

Заключение

Таким образом, изготовлен и исследован резонансный датчик магнитного поля на основе планарной биморфной структуры из пьезокерамического цирконата-титаната свинца с возбуждающей электромагнитной катушкой. Датчик использует комбинацию силы Ампера, пьезоэффекта и резонанс изгибных колебаний структуры для увеличения выходного сигнала. Чувствительность датчика составляет $\sim 245 \text{ В/(А} \cdot \text{Тл)}$, что на 1—2 порядка выше чувствительности известных резонансных пьезоэлектрических датчиков. Предложенный датчик имеет линейную характеристику в широком диапазоне полей $\sim 10^{-5} \dots 0,3 \text{ Тл}$. Пьезоэлектрические датчики такого типа могут найти применение в устройствах измерения магнитных полей и составить

конкуренцию широко распространенным датчикам на основе эффекта Холла.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 11-02-12241-офи-м).

Список литературы

1. Jia Y., Zhou D., Luo L. et al. Magnetoelectric effect from the direct coupling of the Lorentz force from a brass ring with transverse piezoelectricity in a lead zirconate titanate (PZT) disk // Appl. Phys. 2007. V. A89. P. 1025–1027.

2. Jia Y., Tang Y., Zuy X., Luo H. Additional dc magnetic field response of magnetostrictive/piezoelectric laminates by Lorentz force effect // J. Appl. Phys. 2006. V. 100. P. 126102.

3. Leung C. M., Or S. W., Ho S. L. DC magnetic field sensor based on direct coupling of Lorentz force effect in aluminum strip and transverse piezoelectric effect in $0,7\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0,3\text{PbTiO}_3$ single-crystal plate // J. Appl. Phys. 2010. V. 107. P. 09E702.

4. Крыканов И. М., Коплик А. Б., Фетисов Ю. К., Чашин Д. В. Датчик постоянного магнитного поля на основе пьезоэлектрического кольца // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, Вып. 18. С. 19–25.

5. Чашин Д. В., Лебедев С. В., Сегала А. Г., Итальянцев А. Г., Фетисов Ю. К., Горнев Е. С. Пьезоэлектрический датчик магнитного поля на основе планарной биморфной структуры с током // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 4(129). С. 45–48.

6. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. М.: Физматлит, 1959. 439 с. [Timoshenko S. Vibration problems in engineering. Toronto: D. Van Nostrand comp. Inc., 1955].

7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 620 с.

УДК 621.38.049.77

С. П. Тимошенко¹, д-р техн. наук, зав. каф.,
e-mail: str@miee.ru,

В. Е. Плеханов², канд. техн. наук, доц.,
e-mail: v.plehanov@yandex.ru,

С. А. Анчутин¹, вед. инженер,
e-mail: step305@mail.ru,

Н. М. Зарянкин¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
e-mail: n.zaryankin@mail.ru,

В. Г. Рубчиц¹, вед. технолог,
e-mail: vrubchic@yandex.ru,

И. С. Дернов¹, инженер-технолог,
e-mail: i.s.dernov@yandex.ru,

В. Ф. Шилов¹, вед. инженер,

Е. С. Кочурина¹, инженер-конструктор,
e-mail: kochurinaes@gmail.com

¹Московский институт электронной техники
(технический университет), Москва, Зеленоград

²Московский авиационный институт
(технический университет)

БАЛАНСИРОВКА РЕЗОНАТОРА КОЛЬЦЕВОГО МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Поступила в редакцию 04.07.2011

Приведены результаты анализа конструкции кольцевого резонатора микрогироскопа с учетом влияния систематических факторов (анизотропия материала и наличие упругого подвеса), сформулированы требования к материалу резонатора, показан способ сведения частот методом удаления массы с моделированием результатов балансировки.

Ключевые слова: кольцевой резонатор, анизотропия, метод конечных элементов, балансировка

Вопросы проектирования классического твердотельного волнового гироскопа подробно рассмотрены в литературе, например в [1]. Однако в работах подобного типа не учитывается специфика

микромеханики, в частности, наличие упругого подвеса, анизотропия материала резонатора, жесткая привязка элементов систем съема сигнала и возбуждения колебаний к кольцевому резонатору и т. д. Эти особенности достаточно сложно учесть, используя аналитический аппарат. Объясняется этот факт высокой сложностью уравнений, подлежащих анализу. В настоящей работе предлагается проводить исследование кольцевого резонатора численными методами. Использование метода конечных элементов позволяет анализировать конструкции резонатора с учетом практически любых факторов. В данной статье решается задача определения собственных частот и форм собственных колебаний резонатора, влияния свойств материала на собственные частоты, обоснование и выбор способа балансировки резонатора.

Для подробного анализа кольцевого резонатора микрогироскопа воспользуемся численным методом конечных элементов [2–4]. Для моделирования свойств материала резонатора было исследовано влияние анизотропии монокристаллического кремния на значения собственных частот идеального кольца. Для этого была построена конечно-элементная сетка кольца радиусом 3 мм и шириной 120 мкм. Для модального анализа кольца использовались конечные элементы (КЭ) типа PLANE223 (рис. 1).

Данный тип КЭ содержит восемь узлов, каждый из которых имеет две степени свободы (вдоль осей X и Y соответственно). Одна из возможностей PLANE223 — моделирование анизотропных свойств материала. Сетка конечных элементов содержит 3600 элементов (12 240 узлов). Характерный размер одиночного элемента — 28 мкм.

Рассмотрим в качестве материала кольца монокристаллический кремний с ориентацией (100) и (111). В работе [5] приведена матрица жесткостей для ориентаций кремния (100) и (111).

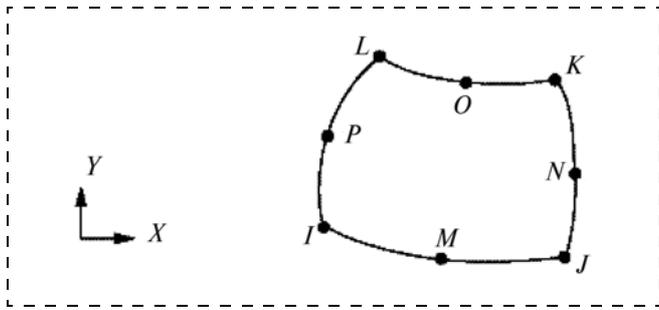


Рис. 1. Конечный элемент PLANE223: I, K, L, M, N, O, P, J — узлы конечного элемента; x, y — локальная система координат конечного элемента [2]

Для кристаллографической ориентации кремния (100) матрица жесткости имеет вид

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix},$$

где $C_{11} = 165,7$ ГПа; $C_{12} = C_{13} = 63,9$ ГПа; $C_{44} = 79,6$ ГПа.

Вращение матрицы жесткости вокруг оси Z на угол Θ (перпендикулярной плоскости пластины кремния XY) дает повернутую матрицу жесткости:

$$C' = \begin{bmatrix} C'_{11} & C'_{12} & C'_{13} & 0 & 0 & C'_{16} \\ C'_{12} & C'_{11} & C'_{13} & 0 & 0 & C'_{26} \\ C'_{13} & C'_{13} & C'_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C'_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C'_{44} & 0 \\ C'_{16} & C'_{26} & 0 & 0 & 0 & C'_{66} \end{bmatrix},$$

где

$$C'_{11} = \frac{1}{4} (3C_{11} + C_{12} + 2C_{44} + (C_{11} - C_{12} - 2C_{44})\cos(4\Theta));$$

$$C'_{12} = \frac{1}{4} (C_{11} + 3C_{12} - 2C_{44} - (C_{11} - C_{12} - 2C_{44})\cos(4\Theta));$$

$$C'_{33} = C_{12};$$

$$C'_{16} = -\frac{1}{4} (C_{11} - C_{12} - 2C_{44})\sin(4\Theta);$$

$$C'_{26} = \frac{1}{4} (C_{11} - C_{12} - 2C_{44})\sin(4\Theta);$$

$$C'_{33} = C_{11};$$

$$C'_{44} = C_{44};$$

$$C'_{66} = \frac{1}{4} (C_{11} - C_{12} + 2C_{44} - (C_{11} - C_{12} - 2C_{44})\cos(4\Theta)).$$

По определению матрица упругости $S = C^{-1}$. При этом модуль Юнга для деформаций в плоскости пластины кремния $E_{in} = \frac{1}{S_{11}}$.

Для кремния с кристаллографической ориентацией (100) зависимость модуля Юнга E_{in} от угла Θ в плоскости пластины имеет вид, показанный на рис. 2.

При этом значение модуля Юнга меняется от 130,1 до 169,1 ГПа (на 26,3% относительно среднего значения). Результаты модального анализа кольца, изготовленного из кремния с кристаллографической ориентацией (100), сведены в табл. 1.

Для кристаллографической ориентации кремния (111) матрица жесткости имеет вид [2]

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{13} & 0 & \bar{C}_{15} & 0 \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{11} & \bar{C}_{13} & 0 & -\bar{C}_{15} & 0 \\ \bar{C}_{13} & \bar{C}_{13} & \bar{C}_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{44} & 0 & -\bar{C}_{15} \\ \bar{C}_{15} & -\bar{C}_{15} & 0 & 0 & \bar{C}_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\bar{C}_{15} & 0 & \bar{C}_{66} \end{bmatrix},$$

где

$$\bar{C}_{11} = \frac{1}{2} (C_{11} + C_{12} + 2C_{44});$$

$$\bar{C}_{12} = \frac{1}{6} (C_{11} + 5C_{12} - 2C_{44});$$

$$\bar{C}_{13} = \frac{1}{3} (C_{11} + 2C_{12} - 2C_{44});$$

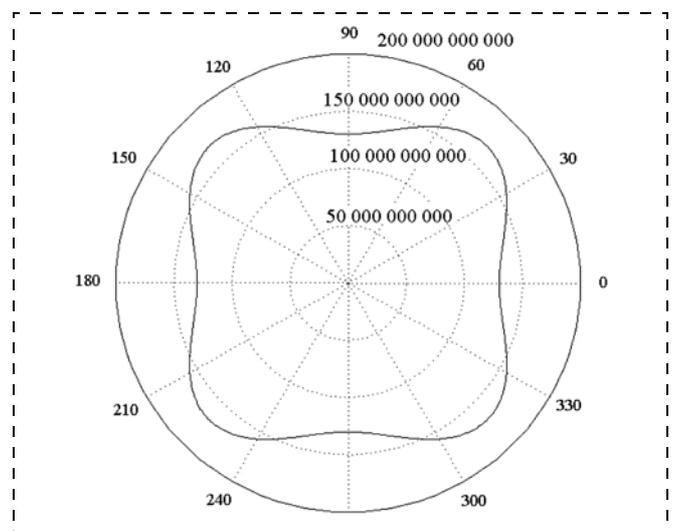


Рис. 2. Зависимость модуля Юнга от ориентации в пластине кремния (100) [5]

$$\bar{C}_{15} = \frac{1}{3\sqrt{2}} (C_{11} - C_{12} - 2C_{44});$$

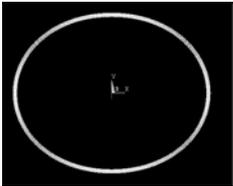
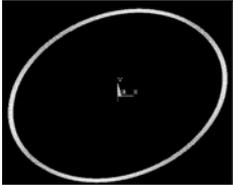
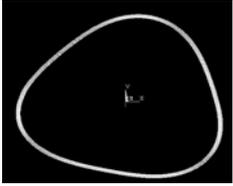
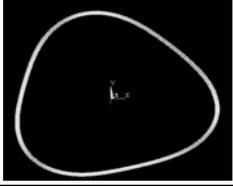
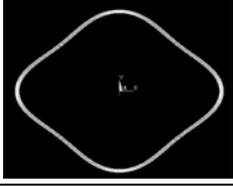
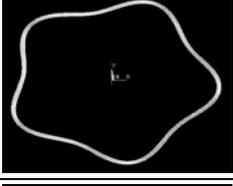
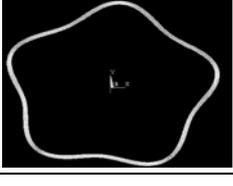
$$\bar{C}_{33} = \frac{1}{3} (C_{11} + 2C_{12} + 4C_{44});$$

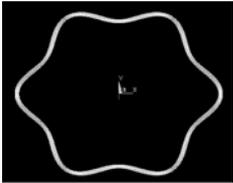
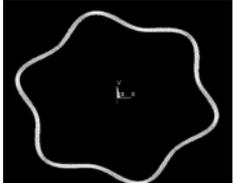
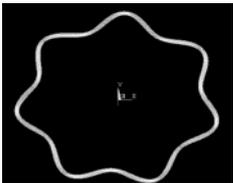
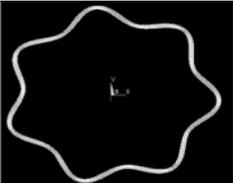
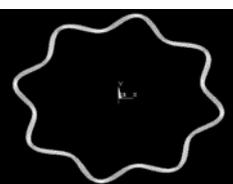
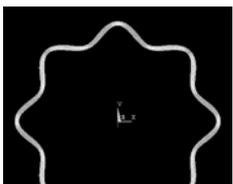
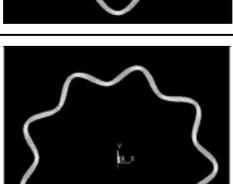
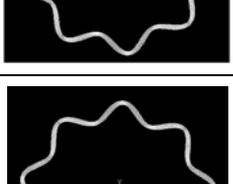
$$\bar{C}_{44} = \frac{1}{3} (C_{11} - C_{12} + C_{44});$$

$$\bar{C}_{66} = \frac{1}{6} (C_{11} - C_{12} + 4C_{44}).$$

Таблица 1

Результаты модального анализа кольца Si(100)

| Форма собственных колебаний | Номер моды | Собственная частота, Гц | Значение расщепления частоты, Гц | Значение расщепления частоты, % |
|---|---------------|----------------------------|--|---------------------------------------|
|  | 2 | 13 171,24 | 888,58 | 6,65262 |
|  | 2 | 14 059,82 | | |
|  | 3 | 38 480,95 | 0,00 | 0,00000 |
|  | 3 | 38 480,95 | | |
|  | 4 | 73 491,20 | 310,73 | 0,42192 |
|  | 4 | 73 801,93 | | |
|  | 5 | 118 818,28 | 0,00 | 0,00000 |
|  | 5 | 118 818,28 | | |

| Форма собственных колебаний | Номер моды | Собственная частота, Гц | Значение расщепления частоты, Гц | Значение расщепления частоты, % |
|---|---------------|----------------------------|--|---------------------------------------|
|  | 6 | 173 777,06 | 47,72 | 0,02746 |
|  | 6 | 173 824,78 | | |
|  | 7 | 238 413,65 | 0,00 | 0,00000 |
|  | 7 | 238 413,65 | | |
|  | 8 | 312 458,54 | 5,88 | 0,00188 |
|  | 8 | 312 464,42 | | |
|  | 9 | 395 731,69 | 0,00 | 0,00000 |
|  | 9 | 395 731,69 | | |

Результаты модального анализа кольца Si(111)

| Номер моды | Собственная частота, Гц | Значение расщепления частоты, Гц | Значение расщепления частоты, % |
|------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 2 | 14 575,55 | 0,00 | 0,00000 |
| 2 | 14 575,55 | | |
| 3 | 41 171,82 | 0,00 | 0,00000 |
| 3 | 41 171,82 | | |
| 4 | 78 795,60 | 0,00 | 0,00000 |
| 4 | 78 795,60 | | |
| 5 | 127 123,03 | 0,00 | 0,00000 |
| 5 | 127 123,03 | | |
| 6 | 185 941,97 | 0,01 | 0,00000 |
| 6 | 185 941,98 | | |
| 7 | 255 049,07 | 0,00 | 0,00000 |
| 7 | 255 049,07 | | |
| 8 | 334 226,93 | 0,02 | 0,00000 |
| 8 | 334 226,93 | | |
| 9 | 423 239,33 | 0,00 | 0,00000 |
| 9 | 423 239,33 | | |

Вращение матрицы жесткости вокруг оси Z на угол Θ (перпендикулярной плоскости пластины кремния XY) дает повернутую матрицу жесткости:

$$C' = \begin{bmatrix} \bar{C}'_{11} & \bar{C}'_{12} & \bar{C}'_{13} & -\bar{C}'_{24} & \bar{C}'_{15} & 0 \\ \bar{C}'_{12} & \bar{C}'_{11} & \bar{C}'_{13} & \bar{C}'_{24} & -\bar{C}'_{15} & 0 \\ \bar{C}'_{13} & \bar{C}'_{13} & \bar{C}'_{33} & 0 & 0 & 0 \\ -\bar{C}'_{24} & \bar{C}'_{24} & 0 & \bar{C}'_{44} & 0 & -\bar{C}'_{15} \\ \bar{C}'_{15} & -\bar{C}'_{15} & 0 & 0 & \bar{C}'_{44} & -\bar{C}'_{24} \\ 0 & 0 & 0 & -\bar{C}'_{15} & -\bar{C}'_{24} & \bar{C}'_{66} \end{bmatrix},$$

где

$$\bar{C}'_{11} = \bar{C}_{11};$$

$$\bar{C}'_{12} = \bar{C}_{12};$$

$$\bar{C}'_{13} = \bar{C}_{13};$$

$$\bar{C}'_{15} = \bar{C}_{15} \cos(\Theta)(2 \cos(2\Theta) - 1);$$

$$\bar{C}'_{24} = \bar{C}_{15} \sin(\Theta)(2 \cos(2\Theta) + 1);$$

$$\bar{C}'_{33} = \bar{C}_{33};$$

$$\bar{C}'_{44} = \bar{C}_{44};$$

$$\bar{C}'_{66} = \bar{C}_{66}.$$

По определению матрица упругости $S = C^{-1}$. При этом модуль Юнга для деформаций в плоскости пластины кремния $E_{in} = \frac{1}{S_{11}}$.

Для кремния с кристаллографической ориентацией (111) зависимость модуля Юнга E_{in} от угла Θ в плоскости пластины имеет вид, показанный на рис. 3.

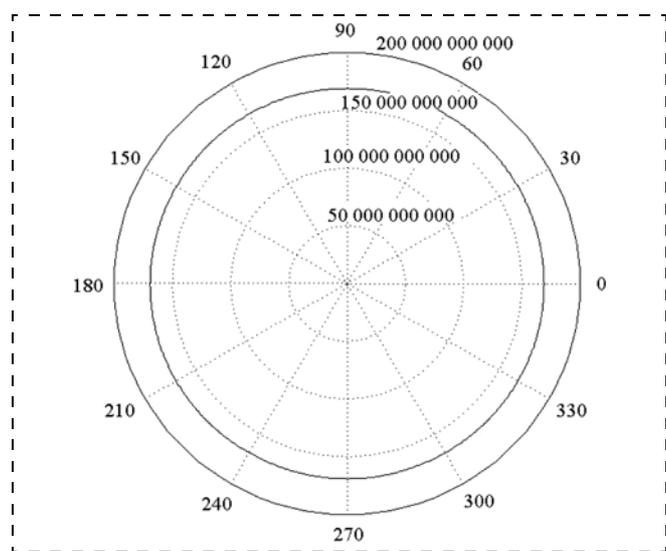


Рис. 3. Зависимость модуля Юнга от ориентации в пластине кремния (111) [5]

При этом значение модуля Юнга не зависит от направления в плоскости пластины кремния и имеет значение 169,1 ГПа. Результаты модального анализа кольца, изготовленного из кремния с кристаллографической ориентацией (111), сведены в табл. 2.

Модальный анализ кольцевого резонатора показал, что в качестве материала резонатора строго необходимо использовать кремний с кристаллографической ориентацией (111). Использование кремния с ориентацией (100) приводит к значительному расщеплению частот на второй (рабочей) моде собственных колебаний кольца.

Для определения чувствительности расщепления частот к неоднородностям материала резонатора был проведен ряд расчетов. В первом случае в качестве варьируемого параметра выбран модуль Юнга. Результаты расчета сведены в табл. 3. Модуль Юнга представлен в виде

$$E = E_0(1 + \sum \delta E \sin(M\Theta)),$$

где M — номер формы неоднородности модуля Юнга; E_0 — номинальное значение модуля Юнга; δE — относительная величина двукратной неоднородности модуля Юнга. Значение неоднородности выбрано на уровне 10 % от номинального значения модуля Юнга.

Зависимость относительной величины расщепления частот (в 1 %) от формы неоднородности модуля Юнга материала кольца

| Номер моды колебаний | Форма неоднородности модуля Юнга M | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|--------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 2 | $3 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-5}$ | 4,9986 | $6 \cdot 10^{-5}$ | $8 \cdot 10^{-5}$ | $8 \cdot 10^{-5}$ | $1 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ |
| 3 | $2 \cdot 10^{-5}$ | $8 \cdot 10^{-4}$ | $8 \cdot 10^{-5}$ | $9 \cdot 10^{-5}$ | 4,9774 | $1 \cdot 10^{-4}$ | $1 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ |
| 4 | $5 \cdot 10^{-5}$ | $7 \cdot 10^{-5}$ | 0,0016 | $1 \cdot 10^{-4}$ | $1 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | 4,9479 | $2 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ |
| 5 | $6 \cdot 10^{-5}$ | $9 \cdot 10^{-5}$ | $1 \cdot 10^{-4}$ | 0,0025 | $2 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | 4,9103 | $3 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ |
| 6 | $7 \cdot 10^{-5}$ | $1 \cdot 10^{-4}$ | $7 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | 0,0036 | $2 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | 4,8651 | $4 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ | $6 \cdot 10^{-4}$ | $6 \cdot 10^{-4}$ |
| 7 | $8 \cdot 10^{-5}$ | $1 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | 0,0048 | $3 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ | 4,8125 | $6 \cdot 10^{-4}$ | $6 \cdot 10^{-4}$ | $6 \cdot 10^{-4}$ | $7 \cdot 10^{-4}$ |
| 8 | $1 \cdot 10^{-4}$ | $1 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | 0,0062 | $4 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ | $6 \cdot 10^{-4}$ | $6 \cdot 10^{-4}$ | $7 \cdot 10^{-4}$ | 4,7529 | $7 \cdot 10^{-4}$ | $8 \cdot 10^{-4}$ |
| 9 | $1 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | 0,0072 | $5 \cdot 10^{-4}$ | $6 \cdot 10^{-4}$ | $6 \cdot 10^{-4}$ | $6 \cdot 10^{-4}$ | $7 \cdot 10^{-4}$ | $7 \cdot 10^{-4}$ | $8 \cdot 10^{-4}$ | $8 \cdot 10^{-4}$ | 4,6868 |

Примечание. В таблице светлым фоном указана кратная зависимость относительной величины расщепления частот, темным фоном — двукратная зависимость.

На основании расчетов можно сделать следующие выводы:

- Значительное расщепление частот i -й формы собственных колебаний кольца вызывается двукратной формой неоднородности модуля Юнга материала кольца. Относительная величина этого расщепления частот может быть примерно оценена по формуле $\delta f_p \approx \frac{1}{2} \delta E$, где δE — относительная величина двукратной неоднородности модуля Юнга. Этот результат совпадает с результатом, приведенным в работе [1].
- Незначительное расщепление частот i -й формы собственных колебаний кольца вызывается i -й формой неоднородности модуля Юнга материала кольца. На практике этим расщеплением можно пренебречь, так как в соответствии с расчетом относительная величина расщепления собственных частот на 3–4 порядка меньше величины исходной неоднородности.

- Остальные формы неоднородности практически не влияют на расщепление частот i -й формы собственных колебаний. Величина их влияния сопоставима с погрешностью расчета.

Проведенные расчеты позволяют сформулировать требования к неоднородности материала кольцевого резонатора микрогироскопа, а именно: четвертая гармоника неоднородности материала должна быть не более 0,01–0,1 %. При этом фактическое расщепление частот второй моды собственных колебаний можно ожидать на уровне 0,005–0,05 % (0,72–7,2 Гц).

Для достижения на практике величины расщепления собственной частоты второй моды собственных колебаний на уровне 0,1 Гц (0,0007 %) необходимо проводить балансировку кольцевого резонатора.

Рассмотрим подробнее вопрос балансировки кольцевого резонатора. Для этого искусственно внесем четвертую гармонику неоднородности по модулю Юнга материала кольца. Значение неоднородности 5 %. В данном случае модальный анализ



Рис. 4. Расщепление собственных частот второй моды собственных колебаний

Таблица 4

Результаты численного моделирования балансировки (шаг 2,5°)

| Число удаляемых элементов | Резонансная частота по тяжелой оси, Гц | Резонансная частота по легкой оси, Гц | Расщепленные частот, Гц | Относительное расщепление частот, % |
|---------------------------|--|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| 0 | 14 388,18 | 14 751,47 | 363,29 | 2,49 |
| 1 | 14 423,07 | 14 761,36 | 338,29 | 2,32 |
| 2 | 14 495,23 | 14 779,90 | 284,67 | 1,94 |
| 4 | 14 604,58 | 14 809,68 | 205,1 | 1,39 |
| 6 | 14 714,61 | 14 842,33 | 127,72 | 0,86 |
| 7 | 14 674,85 | 14 864,77 | 99,92 | 0,67 |
| 9 | 14 861,76 | 14 915,60 | 53,84 | 0,36 |

Таблица 5

Результаты численного моделирования балансировки (шаг 1,25°)

| Число удаляемых элементов | Резонансная частота по тяжелой оси, Гц | Резонансная частота по легкой оси, Гц | Расщепленные частот, Гц | Относительное расщепление частот, % |
|---------------------------|--|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| 0 | 14 388,18 | 14 751,47 | 363,29 | 2,49 |
| 1 | 14 423,07 | 14 761,36 | 338,29 | 2,32 |
| 2 | 14 459,55 | 14 769,23 | 309,68 | 2,12 |
| 4 | 14 531,96 | 14 768,24 | 254,28 | 1,73 |
| 6 | 14 607,28 | 14 800,31 | 193,03 | 1,31 |
| 8 | 14 681,54 | 14 818,43 | 136,89 | 0,93 |
| 10 | 14 757,97 | 14 834,64 | 76,67 | 0,52 |
| 12 | 14 830,61 | 14 857,63 | 27,02 | 0,18 |

дает следующие результаты. Две формы (рис. 4) собственных колебаний (вторая, рабочая мода) имеют частоты 14 388,18 и 14 751,47 Гц.

Расщепление частот составляет 363,29 Гц (2,49 %). Из рис. 4 видно, что мягкая (тяжелая) ось кольца развернута на 45° от оси X , а жесткая (легкая) ось кольца совпадает с осью X .

Для балансировки кольца можно [1] увеличить жесткость тяжелой оси. Для этого симметрично уберем материал кольца в точках с угловыми координатами 45, 135, 225, 315°. Это внесет неоднородность в кольцо по четвертой гармонике, но в "противофазе" к существующей несимметричности и, таким образом, позволит скомпенсировать исходную неоднородность. Шаг между удаляемыми точками — 3,5°.

Для численного моделирования балансировки в местах удаления массы конечные элементы заменяются на нулевые КЭ (NULL), что с точки зрения расчета аналогично фактическому удалению массы.

Пример удаления массы при моделировании балансировки показан на рис. 5.

Результаты численного моделирования балансировки для различного числа удаляемых элементов сведены в табл. 4 и 5.

На основании проведенного моделирования процесса балансировки можно сформулировать методику балансировки кольцевого резонатора микрогирскопа:

- 1) определить положение тяжелой и легкой осей;

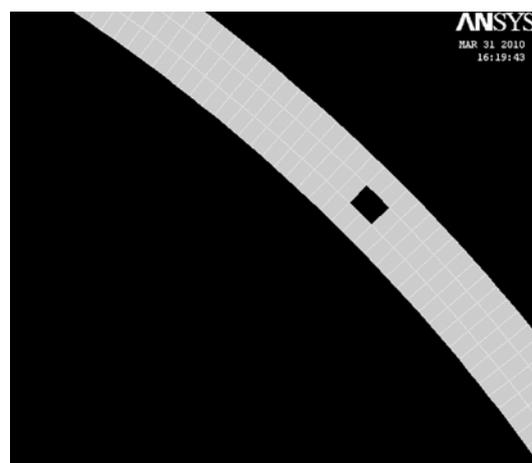


Рис. 5. Удаление массы при численном моделировании балансировки резонатора

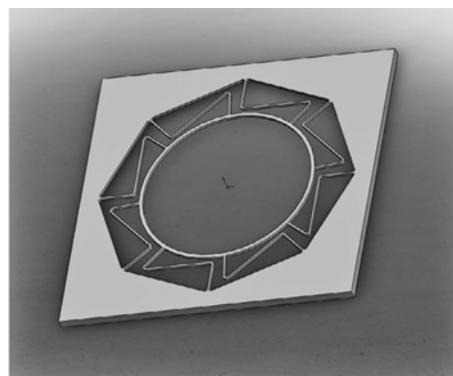


Рис. 6. Геометрическая модель кристалла кольцевого микрогирскопа CRS03 производства BAE Systems [6–7]

- 2) удалить массу из резонатора симметрично, начиная с тяжелой оси с шагом 45°;

- 3) повторить пункты 1–2 до достижения необходимого значения расщепления частот.

Стоит отметить, что при приближении значения относительного расщепления частот необходимо удалять все меньшую массу, в противном случае возможен реверс осей жесткости (оси жесткости меняются местами). Кроме того, массу надо удалять симметрично относительно тяжелой оси и оси, перпендикулярной ей, для сохранения углового положения тяжелой оси. Данный метод реализован на практике в МИЭТ при производстве микрогирскопов серии ММГК. На практике метод позволяет снижать значение расщепления с 15 Гц (0,1 %) (исходное) до 0,2 Гц (0,001 %) (после балансировки).

Был проведен окончательный расчет кристалла кольцевого микрогирскопа (кольцевого резонатора с учетом упругого подвеса). Для примера был выбран кристалл кольцевого микрогирскопа CRS03 производства BAE Systems [6–7]. Геометрическая модель кристалла приведена на рис. 6.

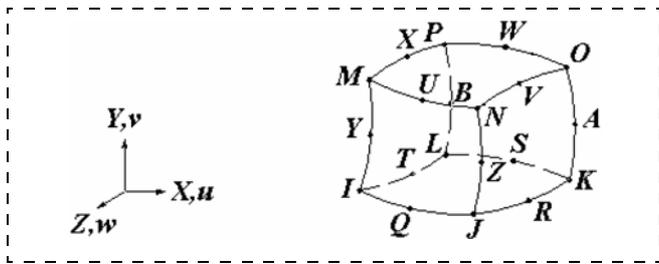


Рис. 7. Конечный элемент SOLID186:

$I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, A, B$ — узлы конечного элемента. XYZ — локальная система координат конечного элемента; u, v, w — компоненты вектора перемещения конечного элемента [2]

Таблица 6

Результаты модального анализа кристалла микрогироскопа

| Форма собственных колебаний | Собственная частота, Гц |
|-----------------------------|-------------------------|
| 1 | 11 589 |
| 2 | 14 673 |
| 3 | 33 248 |

На базе геометрической модели была построена конечно-элементная модель кристалла с использованием конечных элементов (КЭ) типа SOLID186 [2]. Форма КЭ SOLID186 показана на рис. 7.

Краткая характеристика типа конечных элементов SOLID186:

- три степени свободы (линейные перемещения);
- возможность моделирования материалов с анизотропными свойствами;
- учет нелинейных деформаций.

Результаты модального анализа кристалла сведены в табл. 6.

Таким образом, в данной статье проведен анализ кольцевого резонатора микрогироскопа с учетом влияния систематических факторов (анизотропия материала и наличие упругого подвеса), сформулированы требования к материалу резонатора, показан способ сведения частот методом удаления массы с моделированием результатов балансировки.

Список литературы

1. Матвеев В. А., Липатников В. И., Алехин А. В. Проектирование волнового твердотельного гироскопа. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. 168 с.
2. Справочник по программному пакету ANSYS 11.0. Ansys Inc. www.ansys.com.
3. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферова М. А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. М.: Издательство УРСС, 2003. 272 с.
4. Анчугин С. А., Плеханов В. Е., Тимошенко С. П. Введение в конечно-элементный анализ. Использование ANSYS в задачах математической физики: учеб. пособие. М.: МИЭТ, 2007. 280 с.
5. Chia-Ou Chang, Guo-En Chang, Chan-Shin Chou, Wen-Tien Chang Chien, Po-Chih Chen. In-plane free vibration of a single-crystal silicon ring // International Journal of Solids and Structures. 2008. Vol. 45, N 24. P. 6114–6132.
6. Pearce C. The performance and future development of a MEMS SiVSG and its application to the SiIMU // Symposium Gyro Technology (American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.). 2001. P. 6–9.
7. Fountain R. Characteristics and Overview of a Silicon Vibrating Structure Gyroscope // Advances in Navigation Sensors and Integration Technology (Research and Technology Organisation North Atlantic Treaty Organisation, France). 2004. P. 8-1–8-9.

Информация

NANO BIO EXPO

Nano Bio Expo

Выставка нано- и биотехнологий
Место проведения: Япония/Токио
Дата проведения: 01.02–01.02.2012

NANO NECH 2012



Выставка нанотехнологий
Место проведения: Япония/Токио
Дата проведения: 01.02–01.02.2012



MINATEC CROSSROADS 2012
Международная выставка микро- и нанотехнологий
Место проведения: Франция/Гренобль
Дата проведения: 01.06–01.06.2012



EPMT 2012

Выставка современных технологий

Место проведения: Швейцария/Женева
Дата проведения: 05.06–08.06.2012

УДК 621.396.677.3

П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф., директор,
О. В. Матвеев, канд. техн. наук, мл. науч. сотр.,
Д. Л. Гнатьюк, мл. науч. сотр.,
А. П. Лисицкий, канд. техн. наук, зав. лаб.,
Ю. В. Федоров, зав. лаб.,
Учреждение Российской академии наук Институт
сверхвысокочастотной полупроводниковой
электроники РАН,
e-mail: liant2@yandex.ru

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ АНТЕНН ДИАПАЗОНА 5 ГГц С МИНИМАЛЬНЫМ ОБЪЕМОМ

Поступила в редакцию 08.09.2011

Рассмотрены реализации многослойных антенн, антенн с метаматериалами, перестраиваемых антенн диапазона 5 ГГц с точки зрения минимизации объема. Минимум объема достигается при многослойном построении антенны.

Ключевые слова: антенна, многослойная антенна, антенна с минимальным объемом, метаматериалы, перестраиваемая антенна, круговая поляризация излучения, антенна круговой поляризации

Введение

В работах [1, 2] рассмотрены вопросы разработки встроенных антенн диапазона 5 ГГц с излучателем монополюсом, а также различных планарных излучателей на основе двухслойной металлизации. Ниже рассматриваются многослойные и объемные антенны, применение метаматериалов, средств коммутации и методы обеспечения круговой поляризации для антенн диапазона 5 ГГц.

Многослойные антенны

Как рассмотрено в работе [2], излучающий резонатор для экономии площади выполняется деформированным и изогнутым. Излучатель также может быть выполнен в различных слоях (рис. 1) [3]. Далее на рисунках черный кружок или стрелка указывают место подачи сигнала. При размерах $28 \times 9 \times 3$ мм и $\epsilon = 4,34$, толщине диэлектрика $h = 1,5$ мм обеспечены рабочие полосы (5,15...5,35 и 5,725...5,825 ГГц при КСВ < 2).

В работе [4] описан пассивный вибратор объемной (трехслойной) реализации (рис. 2, см. четвер-

тую сторону обложки). Подводящая линия выполнена в нижнем проводящем слое. При размерах вибратора $60 \times 10 \times 3$ мм обеспечена полоса 1,83...2,78 ГГц.

Двухслойный излучатель (рис. 3) с объемной спиралью (рис. 4), расположенный под прямоугольником из диэлектрика (ПД) ($\epsilon = 7,7$), обеспечивает полосы 2,35...2,57, 5,29...6,01 ГГц при размерах ПД 8×4 мм и общих размерах излучающей

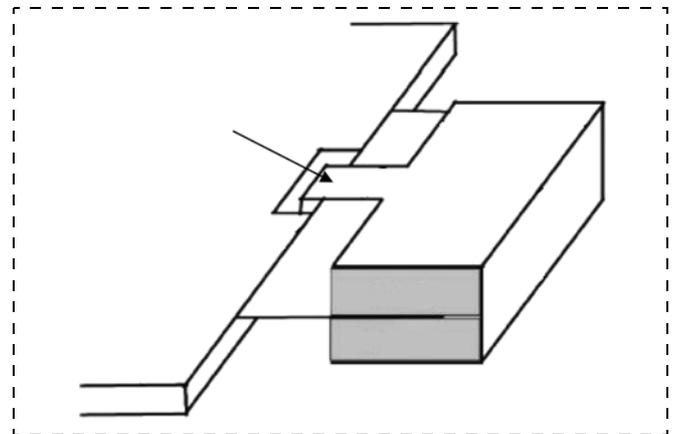


Рис. 1. Изогнутый излучатель, выполненный в различных слоях

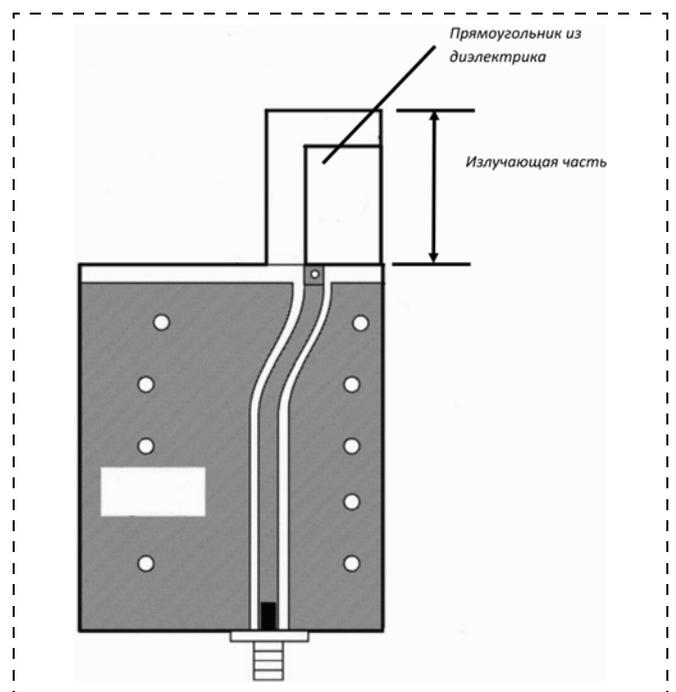


Рис. 3. Антенна, основанная на прямоугольнике из диэлектрика с двухслойным излучателем под ней

части $12,2 \times 7$ мм, реализованной на диэлектрике с $\varepsilon = 4,4$ [5].

Трехслойная антенна со сложной топологией "промежуточного" земляного проводника, поднятого над непрерывным земляным проводником (рис. 5, см. четвертую сторону обложки), обеспечивает узкие полосы 2,45; 3,5; 5,2; 5,75 ГГц с коэффициентом усиления ДН более 9 дБ при малых размерах $12 \times 13,8 \times 4$ мм [6].

Разработан излучатель-монополь (рис. 6), выполненный в различных планарных слоях в размерах блока памяти USB flash с полосой 2,3...11 ГГц (размер монополя $16 \times 9 \times 4,5$) [7].

Конструкцию многослойной антенны с монополем, имеющим щелевой резонатор (рис. 7) защищает патент [8]. Обеспечивается кардиоидная форма ДН в полосе 1...2,4 ГГц.

Предложена антенна из двух слоев диэлектрика с подводом сигнала в два удаленных монополя [9]. Верхний слой имеет два идентичных излучателя-мо-

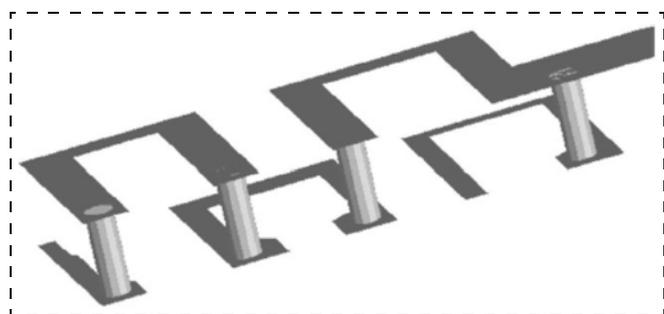


Рис. 4. Вид двухслойного излучателя-спирали

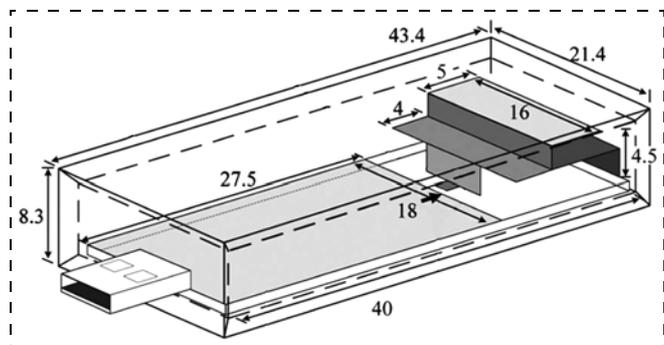


Рис. 6. Монополь, выполненный в различных планарных слоях в размерах блока памяти USB flash

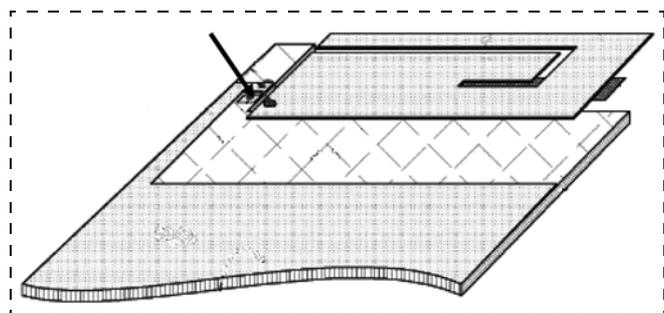


Рис. 7. Многослойная антенна с монополем, имеющим щелевой резонатор

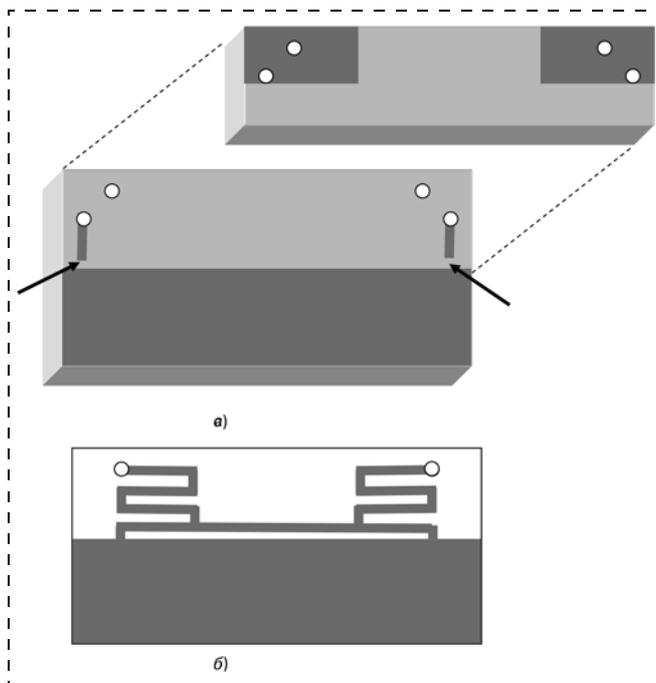


Рис. 8. Строение антенны с подводом сигнала в две удаленные точки:

a — металлизация верхнего и нижнего слоев диэлектрика; *б* — нижний (земляной) слой. Стрелки показывают место подачи синфазных сигналов

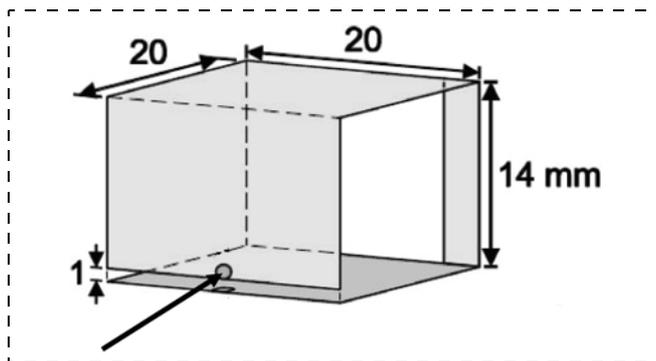


Рис. 9. Объемный вибратор

нополя размером $16 \times 6,5$ мм, соединенных через металлизированные отверстия с меандрами земляной металлизации (рис. 8). Обеспечена полоса 1,8...2,55 ГГц при размерах излучателя $50 \times 10 \times 3$ мм. Для диапазона 5 ГГц размеры уменьшаются в 2 раза, что обеспечивает данной антенне размеры, минимальные среди широкополосных антенн.

В работе [10] описан объемный вибратор (рис. 9). Получены полосы частот 2,400...2,690; 3,400...3,800; 5,150...5,850 ГГц при размерах $20 \times 20 \times 14$ мм.

Компактная антенна предложена на основе меандров в трех проводящих слоях (рис. 10) [11]. На верхнюю пару меандров сигнал поступает с выхода фазорасщепителя (*balun*) в виде чипа SMD. Таким образом, верхняя пара меандров являются активными вибраторами, нижние меандры — пассивными. Обеспечена узкая полоса в районе 5 ГГц при размерах $22,0 \times 17,0$ мм. Излучатели-меандры имеют ма-

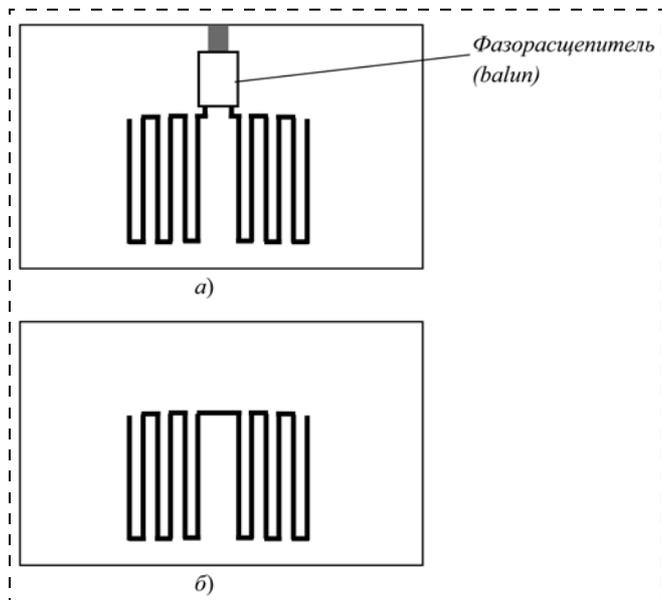


Рис. 10. Антенна на основе меандров в трех слоях: *a* — топология верхнего слоя; *б* — двух нижних слоев

лые размеры $3,95 \times 5,1$ мм и выполнены на диэлектрике с $\epsilon = 3,5$, $h = 0,3$ мм для каждого слоя.

Использование метаматериалов

Метаматериалы, представляющие многослойные комбинации проводников и диэлектриков со структурой много меньшей длины волны, могут быть подобны средам с большой электрической или магнитной проницаемостью, что позволяет уменьшить размеры антенн. В работе [12] изложены основы электродинамического анализа метаматериалов и предложен монополю, выполненный из ячеек метаматериала с земляным проводником (рис. 11, см. четвертую сторону обложки). При размерах антенны 32×28 мм, $\epsilon = 2,2$, $h = 0,76$ мм получена полоса 5...9 ГГц, коэффициент усиления ДН 2...6 дБ.

Антенна из трех пластин металлизированного диэлектрика с монополюльным излучателем (рис. 12, *a*) над экраном вида прямоугольника (рис. 12, *б*) с окном (первая пластина), размещенным над двумя идентичными частотно селективными проводящими слоями (*frequency selective surface* (FSS)) второй и третьей пластин (рис 12, *в*) при $\epsilon = 4,4$. Получена однонаправленная ДН с коэффициентом усиления более 6 дБ в рабочей полосе 3...12 ГГц [13].

Четыре слоя диэлектрика с металлизацией с идентичными S-образными щелями в металлизации каждого слоя (рис. 13), расположенные над монополюем, повышают коэффициент усиления ДН антенны с 6 до 8 дБ в рабочей полосе 5,56...5,91 ГГц [14]. Размер антенны — 55×30 мм, $\epsilon = 4,4$. Сечение антенны показано на рис 14. Излучение направлено вверх, т. е. через проводники метаматериала.

Из метаматериала сделан излучатель-монополюль и площадка на обратной стороне, соединенная с земляным проводником подводящей копланарной линии

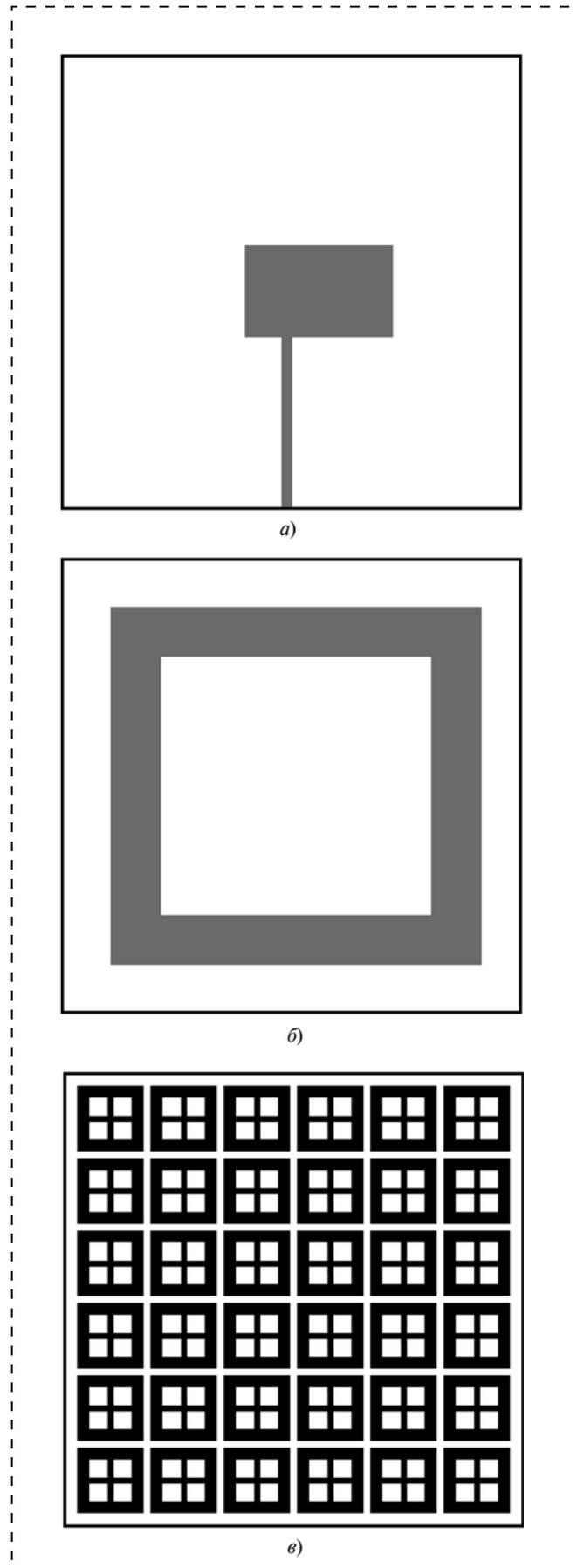


Рис. 12. Топологии слоев монополюльного излучателя, несимметричного относительно подводящей линии (*a*), земляного проводника (*б*) и двух частотно селективных проводящих слоев (*в*)



Рис. 13. Вид S-образных щелей в металлизации диэлектрика

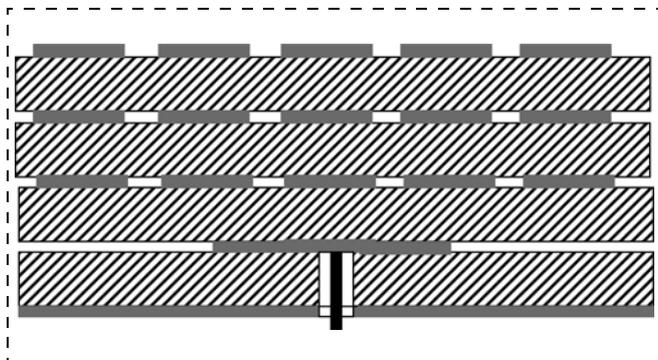


Рис. 14. Поперечное сечение антенны с моноподем, с четырьмя слоями диэлектрика, имеющими металлизацию в виде решетки из S-образных щелей

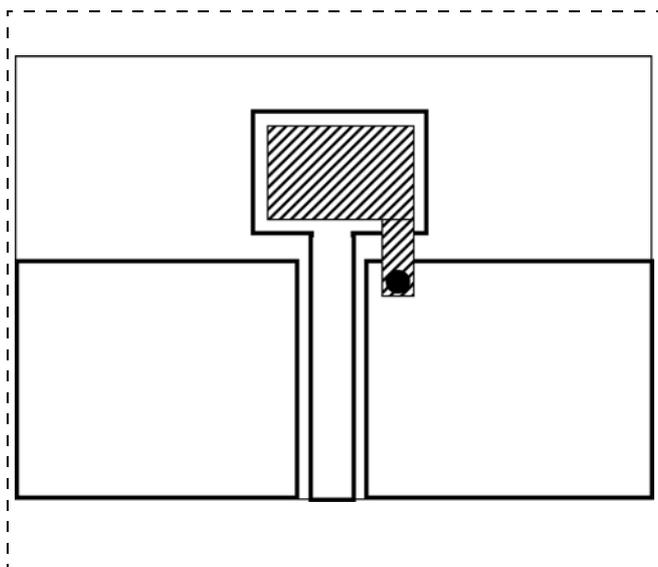


Рис. 15. Вид антенны с моноподем и согласующей площадкой в земляном слое из метаматериала. Земляной слой показан штриховой линией

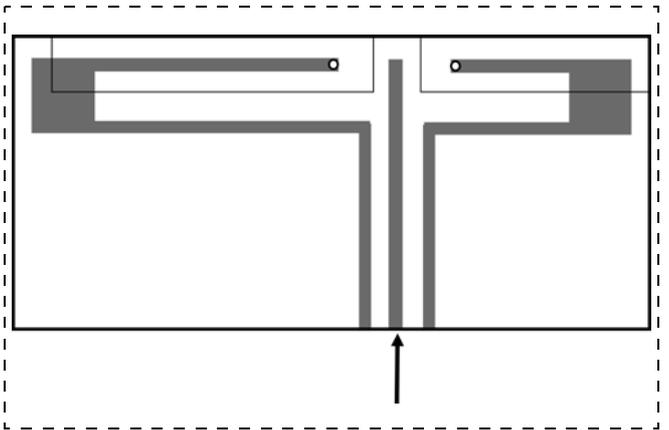


Рис. 16. Топология с моноподем в виде узкой линии и шлейфов земляных проводников, контур обозначает проводники земляного слоя

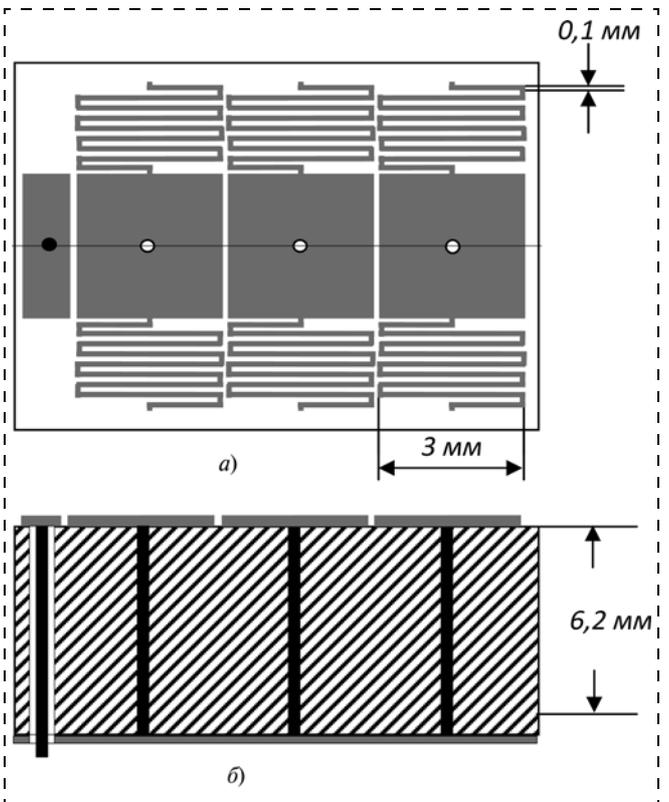


Рис. 17. Топология излучателя с емкостно-связанными резонаторами (а) и разрез антенны по коаксиалу (б)

через металлизированное отверстие (рис. 15) [15]. Получена полоса 3,14...7,20 ГГц при размере монополя 6×5 мм, общем размере 30×22 мм при $\epsilon = 4,34$, $h = 1,59$ мм.

Из метаматериала выполнен моноподем в виде узкой линии и узкие земляные проводники (рис. 16) [16]. Получена полоса 2,2...2,5 ГГц при размерах излучателя 40×15 мм, $h = 1$ мм, $\epsilon = 4,6$.

На основе меандров, образующих с прямоугольным проводником емкостно-связанные резонаторы (*zeroth-order resonator (ZOR)*) разработана антенна для частот 2,04, 2,41, 3,52 ГГц (рис. 17) [17]. Сиг-

нал подается через вертикальный коаксиал на левую площадку, с которой благодаря емкостной связи поступает на идентичные резонаторы, имеющие заземление в центре. Диэлектрик отделен от земляного проводника зазором толщиной 6,2 мм. Размер излучателя примерно 15×9 мм, размер антенны — 20×20 мм, $\varepsilon = 4,4$, $h = 1,52$ мм.

Перестраиваемые антенны

Не представляет трудностей введение в планарную антенну управляющих элементов (варакторных и PIN-диодов), что позволяет управлять рабочей полосой частот антенны. Антенна выполняется узкополосной, что приводит к уменьшению размеров. Предложена перестраиваемая варакторными и

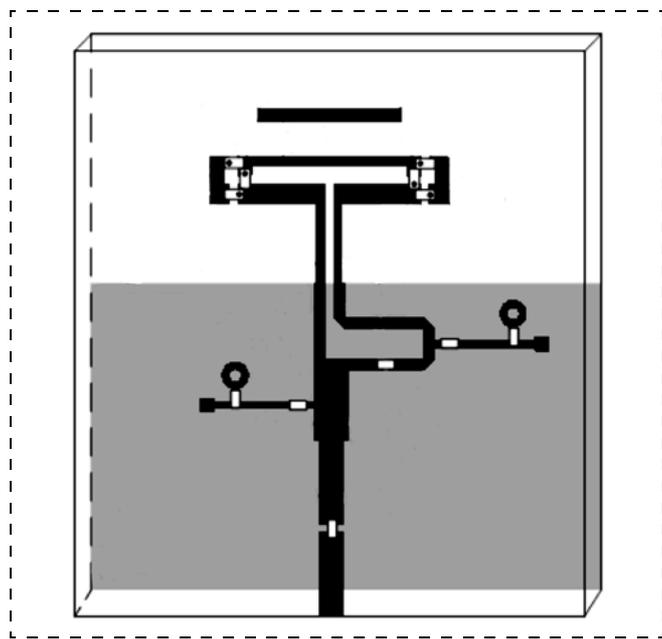


Рис. 18. Антенна типа Яги, перестраиваемая варакторными и PIN-диодами

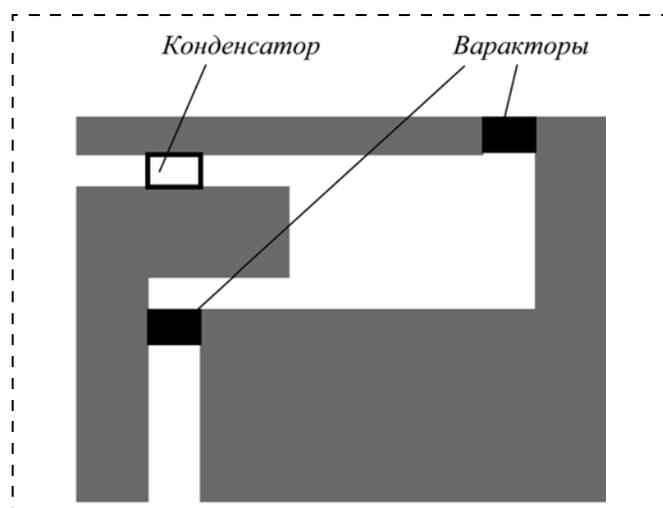


Рис. 19. Излучатель антенны PIFA с управляющими варакторами

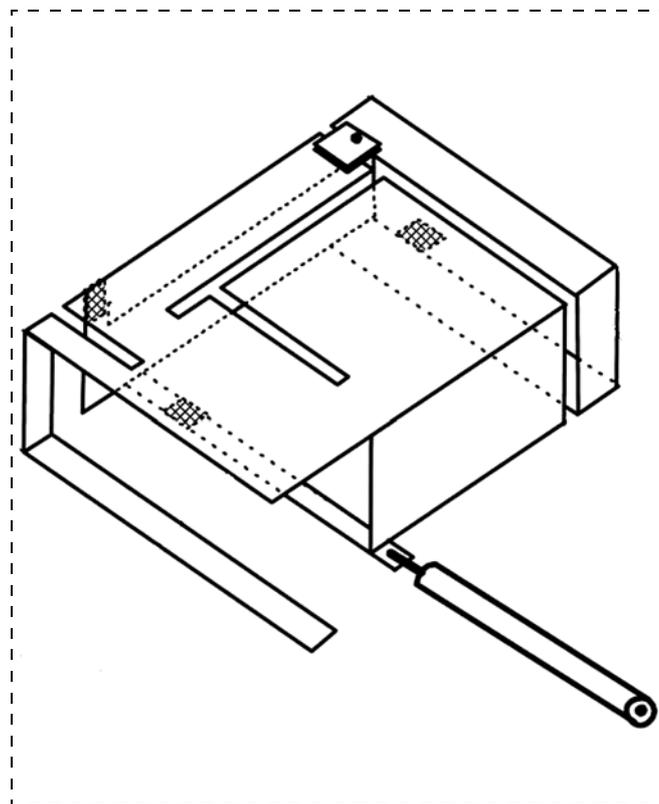


Рис. 20. Объемный излучатель с перестройкой варактором

PIN-диодами антенна типа Яги (рис. 18) [18]. Диапазон перестройки 10 % при рабочей частоте 6 ГГц.

В работе [19] описана антенна PIFA с двумя управляющими варакторами (рис. 19). При максимальном изменении емкости варактора происходит изменение рабочих полос: 0,7...0,95 ГГц (GSM900), 1,79...2,19 ГГц (UMTS), 3,43...3,64 ГГц (WiMAX), 5...5,06 ГГц (HiperLAN/2). Антенна имеет размеры $50 \times 43,5$ мм, излучатель — $31,5 \times 30$ мм.

В работе [20] описан объемный излучатель размером $13 \times 20 \times 4$ мм (рис. 20) с перестройкой единственным варактором, обеспечивающий полосы 1,6...2,4 и 3,...4,5 ГГц.

В работе [21] описан меандровый излучатель в виде ортогональной сетки проводников с MEMS-переключателями, что позволяет в широких пределах изменять площадь монополя, присоединенную к источнику сигнала. При управлении MEMS-переключателями достигнут сдвиг частоты минимума КСВ с 4,57 до 6,84 ГГц. Данные результаты следует считать предварительными, так как сетка из MEMS-переключателей, введенная в металлизацию, открывает новые возможности для управления рабочей топологией как антенн, так и СВЧ устройств в целом.

Возможно также управление направлением главного луча диаграммы направленности антенны [22] путем введения варакторов в излучающие щелевые резонаторы.

Обеспечение круговой поляризации излучения

Для мобильных устройств необходимо обеспечивать круговую поляризацию излучения. Возможно очевидное решение — использовать пару ортогональных автономных излучателей, либо реализовать топологию излучателя с токами в излучателе, ортогональными по направлению. Возможно компромиссное решение, при котором сигнал подается на пару ортогональных излучателей, имеющих общий земляной проводник.

Реализация второго подхода описана в работе [23]. Форма излучателя показана на рис. 21. Расчеты показали полосу 5,12...5,9 ГГц при КСВ < 2, размерах излучателя 21×21 мм, $\epsilon = 1$, $h = 2,5$ мм.

Близкая по структуре антенна на основе монополя с щелевым резонатором и с третьим проводящим слоем между монополем и земляным проводником описана в работе [24] (рис. 22). Получена узкая полоса 1,0 % для 3,5 ГГц и 3,1 % для 5,8 ГГц.

Крестообразный излучатель, представляющий второй вариант антенны с круговой поляризацией (рис. 23), описан в работе [25]. Размер излучателя 23×23 мм, обеспечена полоса WiMAX 3,5 ГГц.

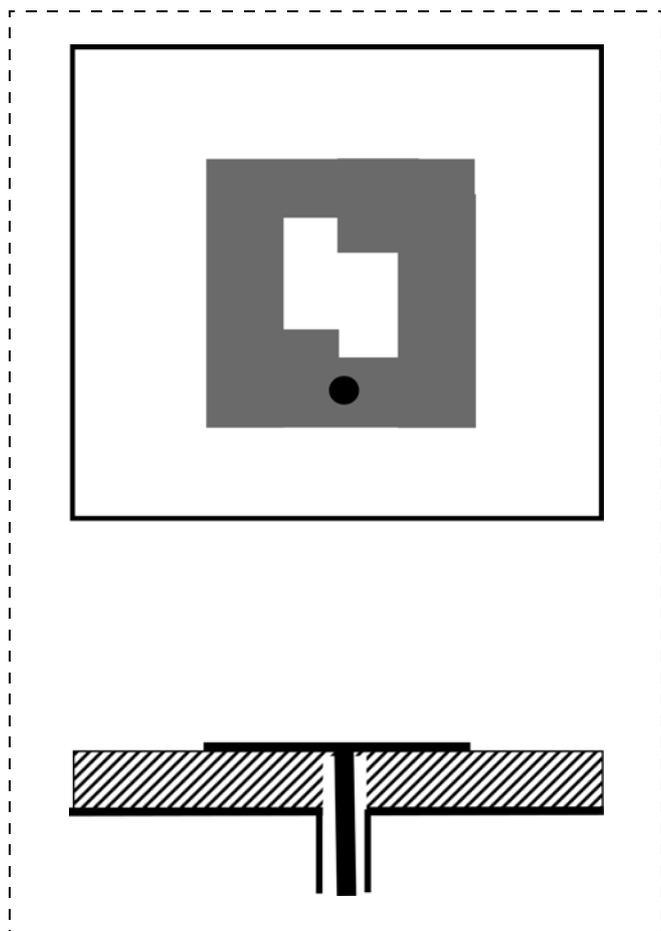


Рис. 21. Излучатель антенны с круговой поляризацией: разрез по оси коаксиала и вид сверху

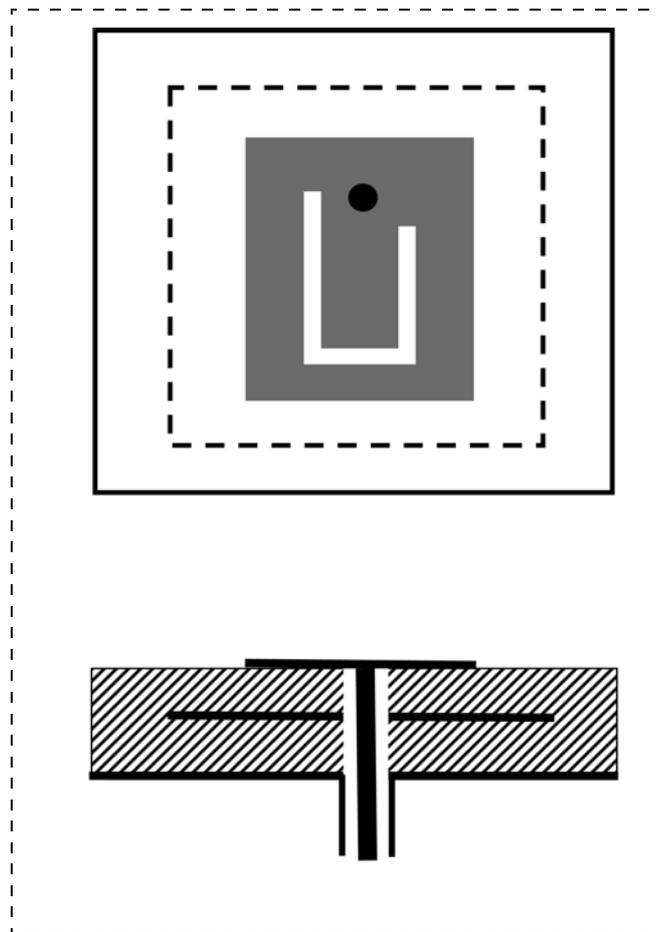


Рис. 22. Вид сверху и разрез антенны круговой поляризации с щелевым резонатором

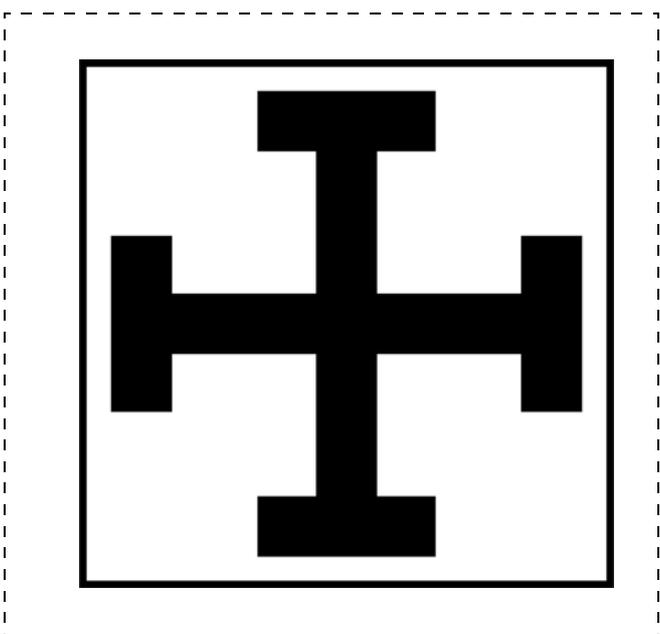


Рис. 23. Крестообразный излучатель

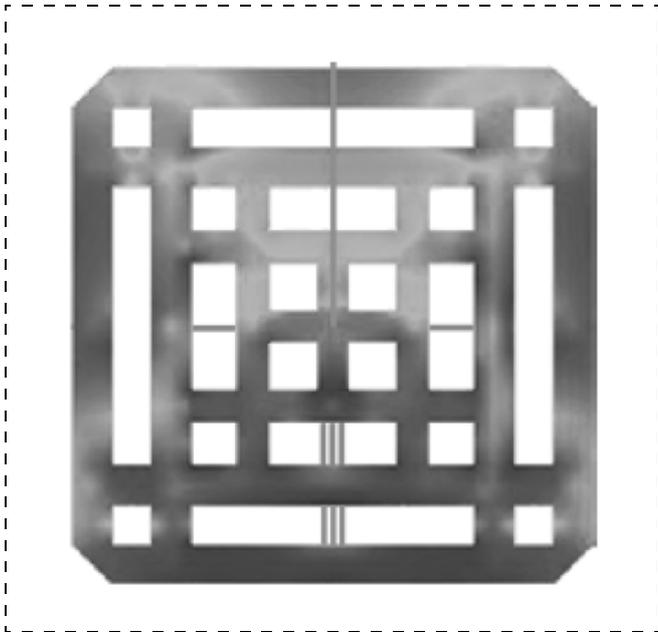


Рис. 24. Излучатель круговой поляризации

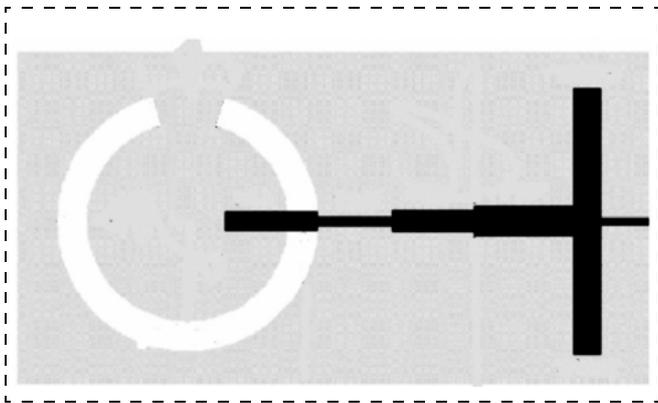


Рис. 25. Топология антенны круговой поляризации с согласующими цепями

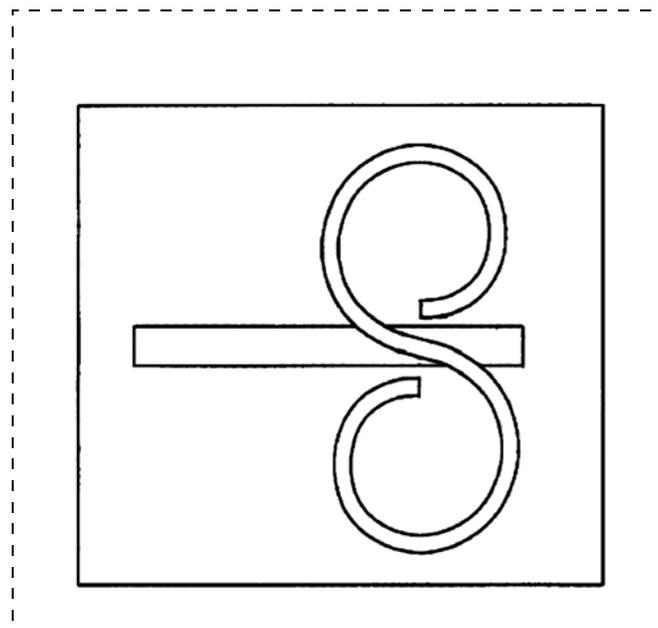


Рис. 26. Топологии сигнального полоска и S-образной щели антенны круговой поляризации

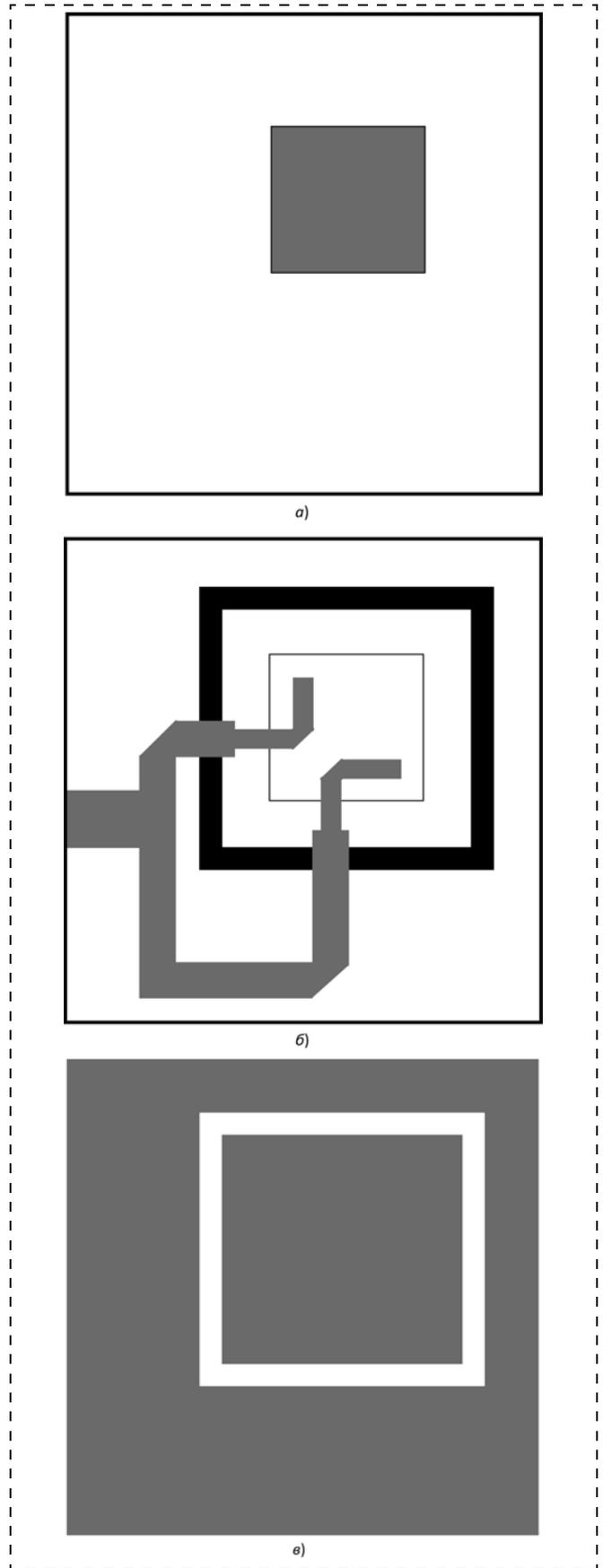


Рис. 27. Антенна круговой поляризации с ортогонально расположенными излучателями над общим земляным проводником: *a* — нижняя сторона верхнего диэлектрика; *б* и *в* — нижняя и верхняя стороны нижнего диэлектрика. Для наглядности на слое (*б*) показаны силуэты других слоев

Излучатель, показанный на рис. 24, обеспечивает круговую поляризацию при подводе сигнала близко к центру в полосе более 2...4 ГГц [26]. Размеры 30×30 мм, $\epsilon = 3,5$, $h = 1,52$ мм.

Круговую поляризацию обеспечивает антенна (рис. 25), топология которой совместно с согласующими цепями приведена в работе [27]. Получено узкополосное согласование на частоте 5,83 ГГц при $\epsilon = 3,0$, $h = 0,5$ мм.

В патенте [28] защищены разновидности топологии обоих проводников планарной антенны следующего вида: в земляном проводнике создается S-образная щель, к которой сигнал подводится по микрополосковой линии на противоположной стороне (рис. 26). Такая структура обеспечивает круговую поляризацию и форму ДН, близкую к кардиоидной.

Третий подход реализован в работе [29]. Антенна состоит из двух металлизированных слоев диэлектрика и проводящей плоскости под ними, разделенных воздушными зазорами. Два излучателя, расположенных взаимно перпендикулярно, выполнены на нижней стороне нижнего диэлектрика, верхняя металлизация которого непрерывна за исключением квадратной щели (рис. 27). На верхнем диэлектрике металлизация присутствует в виде прямоугольника на нижней стороне. Получена рабочая полоса 2,95...4,3 ГГц при размерах излучателя 22×22 мм.

Заключение

Усилия разработчиков направлены прежде всего на обеспечение минимального объема при требуемой рабочей полосе. Данному критерию в наибольшей степени соответствуют объемные реализации антенн. Введение элементов коммутации в антенны является одним из перспективных направлений улучшения характеристик антенн при малом объеме антенны.

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

Список литературы

1. Мальцев П. П., Матвеев О. В., Гнатюк Д. А., Лисицкий А. П., Федоров Ю. В. Обзор реализаций встроенных антенн диапазона 5 ГГц с излучателем-монополюсом // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 9. С. 2—4.
2. Мальцев П. П., Матвеев О. В., 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.
3. Ali M., Sittironnarit T., Hwang H.-S., Sadler R. A., Hayes G. J. Wide-Band/Dual-Band Packaged Antenna for

5—6 GHz WLAN Application // IEEE transaction on antennas and propagation. 2004. Vol. 52. N 2. P. 610—615.

4. Wei-Yu Li, Kin-Lu Wong. Surface-Mount Loop Antenna for WWAN/WLAN/WiMAX Operation in the Mobile Phone // Microwave Conference. 2008. 2008, APMC Asia-Pacific. P. 1—4.

5. Moon J. I., Park S. O. Small Chip Antenna for 2,4/5,8-GHz Dual ISM-Band Applications // IEEE antennas and wireless propagation letters. 2003. Vol. 2. P. 313—315.

6. Bhatti R. A., Choi J. H., Park S. O. Quad-Band MIMO Antenna Array for Portable Wireless Communications Terminals // IEEE antennas and wireless propagation letters. 2009. Vol. 8. P. 129—132.

7. Lee J., Hong S., Shin J., Choi J. A Compact Ultrawideband Monopole Antenna for Wireless Communication Application // IEEE transaction on antennas and propagation. 2009. Vol. 57, N 9. P. 2785—2788.

8. Патент WO2006084951A1. Internal monopole antenna / Raappana A., Kupari M. et al. 17 Aug. 2006.

9. Park Y., Byun J., Harackiewicz F. J., Yu B., Kim B., Park M.-J., Chung Y.-S., Lee B. Multi-Band Diversity Antenna for Mobile Handset Applications / Proc. for 2010 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and CNC/USNC/URSI Radio Science Meeting. 2010. July 11—17.

10. Saou-Wen Su, Jui-Hung Chou. Internal Wideband Monopole Antenna for MIMO Access-Point Applications // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2008. AP-S 2008. IEEE, 5—11 July 2008. P. 1—4.

11. Yoshida S., Kameda S., Takagi T., Tsubouchi K. 5-GHz Band 3-Stacked Meander Line Antenna Using Multi-Layered Organic Substrates // Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2010 IEEE. 2010. P. 1—4.

12. Li L. W., Li Y. N., Hu L. Wideband and Low-Loss Metamaterials for Microwave and RF Applications: Fast Algorithm and Antenna Design // Metamaterials. 2010. P. 293—319.

13. Ranga Y., Matekovits L., Esselle K. P., Weily A. R. Multioctave Frequency Selective Surface Reflector for Ultrawideband Antennas // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2011. Vol. 10. P. 219—222.

14. Wu C. Y., Yeh S. H., Lu T. H. Novel High Gain Metamaterial Antenna Radome for WiMAX Operation in the 5,8-GHz band // Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 IEEE. 2007. P. 3488—3491.

15. Antoniadis M. A., Eleftheriades G. V. A Broadband Dual-Mode Monopole Antenna Using NRI-TL Metamaterial Loading // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2009. Vol. 8. P. 258—261.

16. Soon Ho Hwang, Tae Sik Yang, Joon Ho Byun, Kim A. S. Design and Analysis of Metamaterial Antenna for Mobile Handset Application // 3rd European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2009. 23—27 March 2009. P. 3563—3566.

17. Dakhli N., Choubani F., David J. Multiband small zeroth-order metamaterial antenna // Applied Physics A: Materials Science & Processing, Online First™, 10 January 2011.

18. Qin P. Y., Weily A. R., Guo Y. J., Bird T. S., Liang C. H. Frequency Reconfigurable Quasi-Yagi Folded Dipole Antenna // IEEE transaction on antennas and propagation. 2010. Vol. 58, N 8. P. 2742—2747.

19. AbuTarboush H. F., Nilavalan R., Peter T. PIFA based Reconfigurable Multiband Antenna for Wireless Applications // Proc. of the International Conference in Electromagnetic in

Advanced Application, Sydney, Australia, 20—24 Sept. 2010. P. 232—235.

20. **Viet-Anh Nguyen, Manh-Tuan Dao, Yun Tack Lim, Seong-Ook Park.** A Compact Tunable Internal Antenna for Personal Communication Handsets // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2008. Vol. 7. P. 569.

21. **Grau A., Ming-Jer Lee, Romeu J., Jafarkhani H., Jofre L., De Flaviis F.** A Multifunctional MEMS-Reconfigurable Pixel Antenna for Narrowband MIMO Communications // Antennas and Propagation Society International Symposium. IEEE 9—15 June 2007. P. 489—492.

22. **Slater M. J., Pan H. K., Bernhard J. T.** Preliminary Results in the Development of a Compound Reconfigurable Antenna // Proc. 2008 IEEE/URSI International Symposium on Antennas and Propagation. July 2008.

23. **Ali M., Dougal R., Yang G., Hwang H. S.** Wideband (5—6 GHz WLAN Band) Circularly Polarized Patch Antenna for Wireless Power Sensor // Proc. of Antennas and Propagation Society International Symposium, 2003. IEEE. 2003. Vol. 2. P. 34—37.

24. **Payam Nayeri, Kai-Fong Lee, Atef Z. Elsherbeni, Fan Yang.** Dual-Band Circularly Polarized Antennas Using Stacked

Patches With Asymmetric U-Slots // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011. Vol. 10. P. 492—495.

25. **Hung-Chi Huang, Ken-Huang Lin, Hsin-Lung Su, Chin-Yih Wu, Hung-Hsuan Lin.** Design of Dual-Polarized High-Gain Antenna Radome by Using Jerusalem Cross Metamaterial Structure // Proc. of Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009 (APSURSI'09). IEEE, 1—5 June 2009. P. 1—4.

26. **Ghali H. A., Moselhy T. A.** Broad-Band and Circularly Polarized Space-Filling-Based Slot Antennas // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2005. Vol. 53, N 6. P. 1946—1950.

27. **Heikkinen J., Kivikoski M.** Low-Profile Circularly Polarized Rectifying Antenna for Wireless Power Transmission at 5,8 GHz // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2004. Vol. 14, N 4. P. 162—164.

28. **Европатент EP1158606A1.** Dual-spiral-slot antenna for circular polarization / Brankovic V., Krupezevic D. 28.11.2001.

29. **Caso R., Pino M. R., Nepa P., Manara G.** A Novel Dual-Feed Slot-Coupling Feeding Technique for Circularly Polarized Patch Arrays // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2010. Vol. 9. P. 183—186.

ИНФОРМАЦИЯ

Первое информационное сообщение

08—12 октября 2012 г. состоится

V Всероссийская научно-техническая конференция

"ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МИКРО- и НАНОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ – 2012" (МЭС-2012)

Место проведения: Подмосковье

Сайт конференции — www.mes-conference.ru

Учредители конференции:

Российская академия наук (Отделение нанотехнологий и информационных технологий РАН)
Префектура Зеленоградского административного округа г. Москвы
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
Национальный исследовательский университет "МИЭТ"
Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ)
Федеральное государственное унитарное предприятие "Научно-исследовательский институт физических проблем им. Ф. В. Лукина"

Организатор и проводящая организация конференции

Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (ИППМ РАН)

Соорганизаторы конференции

Московское Научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи (МНТОРЭС) им. А. С. Попова

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ КЛЮЧЕВЫЕ ДАТЫ

| | |
|---|---------------|
| • Начало регистрации авторов и участников на сайте конференции: | с 01.10.2011 |
| • прием докладов: | до 31.01.2012 |
| • завершение рецензирования и информация авторам о включении доклада в программу конференции: | 15.04 2012 |
| • прием к публикации финальной версии доклада: | до 01.06.2012 |
| • приезд участников: | 08.10.2012 |
| • презентация коммерческих продуктов: | 08.10.2012 |
| • выставка коммерческих продуктов: | 08—09.10.2012 |
| • открытие конференции: | 09.10.2012 |
| • работа секций | 09-11.10 2012 |
| • закрытие конференции: | 11.10.2012 |
| • отъезд участников: | 12.10.2012 |

Рабочий язык конференции — русский

Основные обсуждаемые темы

1. Теоретические аспекты проектирования микро- и нанoeлектронных систем (МЭС).
2. Методы и средства автоматизации проектирования микро- и нанoeлектронных схем и систем (САПР СБИС).
3. Опыт разработки цифровых, аналоговых, цифроаналоговых, радиотехнических функциональных блоков СБИС
4. Особенности проектирования СБИС для нанометровых технологий.
5. Системы на кристалле перспективной РЭА.
6. Выставка и презентация коммерческих продуктов.

Область интересов конференции

включает (но не ограничивает) следующие темы актуальных исследований проектирования СБИС и методов автоматизации проектирования СБИС:

1. Схемы и системы нанометровых технологий.
2. Системы на кристалле.
3. Проектирование цифровых СБИС.
4. Проектирование аналоговых и радиотехнических функциональных блоков СБИС.
5. Проектирование СБИС со смешанными сигналами.
6. Методы структурного синтеза аналоговых, цифровых и смешанных СБИС и СФ блоков.
7. Микромеханические системы.
8. Специализированные (стойкие к спецвоздействиям, фоточувствительные и т. п.) СБИС.
9. Фоточувствительные СБИС.
10. Методы цифровой обработки информации.
11. Методы высокоуровневого моделирования.
12. Методы логического синтеза и логического моделирования в САПР СБИС.
13. Методы электрического моделирования в САПР СБИС.
14. Методы аналогового и смешанного поведенческого моделирования.
15. Методы моделирования радиотехнических СБИС.
16. Методы генерации моделей для САПР СБИС.
17. Методы автоматического топологического проектирования в САПР СБИС.
18. Методы приборно-технологического моделирования.
19. Методы моделирования межсоединений.
20. Методы проектирования и моделирования новых приборных структур и схем нанoeлектроники.

Еще раз напоминаем: сайт конференции — www.mes-conference.ru

На этом сайте можно найти более подробную предварительную информацию о МЭС-2012

Ученый секретарь Оргкомитета МЭС-2012

Борискин Вячеслав Степанович,

тел. 499-729-9569

тел./факс 499-729-9208

Эл. почта: boriskin@ippm.ru

- Astahov M. V., Filonov M. R., Yagodkin Yu. D., Sarkisov P. D., Yurtov E. V.** *About Realization of Personnel Training Projects in the Field of Functional and Structural Materials* 2
 The problems of engineering skills training and retraining for nanoindustry within the scope of Federal state educational standards of 3rd generation are discussed.
Keywords: education in science and technology, nanoindustry, nanomaterials, educational standards
- Belkin L. M., Belkin M. E.** *Application of Optoelectronic Principle for Microwave-Band Frequency Conversion and Multiplication*. 4
 Based on vertical channel surface-emitting laser (VCSEL) a cost-effective arrangement of an optoelectronic frequency converter is investigated in theory and experimentally. Results of the model design representing its work in frequency converter (OEFC) and multiplier (OEFM) modes and the simulation of a key frequency converter's parameter that is conversion loss are highlighted. In accordance with the simulating results and closed to them measured data on S-band prototypes the conversion loss of the OEFC is near 36 dB and the same of the OEFM is near 45 dB. An example of OEFM cost-effective employment for the RoF's base station uplink is reviewed.
Keywords: microwave photonics, vertical channel surface-emitting laser (VCSEL), optoelectronic frequency converter, Radio-over-Fiber telecom system (RoF)
- Vasil'ev V. A., Chernov P. S.** *Diffusion Model of Growth and Surface Morphology of Thin Films of Materials*. 11
 A review of growth patterns of surfaces of materials. An original model of the growth of thin films, which is a stochastic cellular automaton is an exact and takes into account the diffusion of particles. It allows the influence of substrate temperature, deposition rate and time on the parameters characterizing the surface morphology. The results of comparison of experimental data obtained by atomic force microscopy and theoretical obtained by simulation using the proposed diffusion model are obtained.
Keywords: surface, thin film, a stochastic cellular automaton, the surface morphology
- Abramov I. I., Kolomejtseva N. V.** *Simulation of Resonant Tunneling Diode Based on Si/SiGe*. 16
 The combined two-band model for the simulation of I–V characteristics RTD based on Si/SiGe is developed. Satisfactory agreement with experimental data with proposed model is obtained.
Keywords: the resonant tunneling diode, numerical simulation, combined two-band model
- Sokolov L. V., Parfenov N. M.** *Technological Singularities of Forming of Three Dimensional Microelectromechanical Systems*. 19
 Recent achievements in the area of researches and the development of different physics-chemical processes of etching of monocrystal silicon for formation solid micromechanical structures are generalized and analyzed. The main trends of the development of sensors and microelectromechanical devices are shown.
Keywords: recent technologies, micromechanical structures, microelectromechanical devices
- Averin I. A., Pecherskaya R. M., Pronin I. A.** *Features of Low Self-Organized Sols Based on Binary Systems Based on SiO_2 – SnO_2* 27
 The paper presents the physical and chemical laws of cooling sols orthosilicic acid below the phase transition. Explain the formation of a strictly ordered clusters, with radial symmetry. The results of the simulation are confirmed by experimental studies.
Keywords: sol-gel technology, self-organization, the spinodal, binodal, fractals
- Rathke L. S.** *Prospective of Development and Producing of Nanomaterials* 30
 Under the patronage of Russian academy of science (RAS), Ministry of education and science of Russian Federation, Department of chemistry and sciences of materials of RAS, Scientific Council for nanomaterials at Presidium of RAS, Institute of metallurgy and materials named after A. A. Baykov of RAS and Lomonosov state university at the spring of 2011 organized the IV Russian conference for nanomaterials.
Keywords: Russian academy of sciences, RAS, nanomaterials, fullerenes, multimodal nanosystems, modification of surface, nanocrystalline structure, catalyses, adsorption, hydroxyl-apatite, halogenides

Sopilnyak A. A., Fetisov Yu. K., Lebedev S. V., Segalla A. G. *Piezoelectric Resonance Sensor of Magnetic Fields Based on Planar Bimorph Structure with Electromagnetic Excitation Coil*. 33
Piezoelectric resonance sensor of permanent magnetic fields based on planar bimorph lead zirconate titanate structure with excitation electromagnetic coil is described. The sensor uses combination of the Ampere force, the piezoelectric effect and the bending oscillation resonance of the structure in order to increase the output voltage. The sensor has a sensitivity of ~ 250 V/(A-T) and linear output voltage vs. field dependence in the $\sim 10^{-5}$ –0,3 T magnetic field range. The theory describing characteristics of the sensor is developed.

Keywords: magnetic field sensor, Ampere force, piezoelectric effect, lead zirconate titanate

Timoshenkov S. P., Plehanov V. E., Anchutin S. A., Zaryankin N. M., Rubchits V. G., Dernov I. S., Shilov V. F., Kochurina E. S. *Micromechanical Ring Gyroscope Resonator Balancing* 37
The article gives results of the ring resonator microgyroscope analysis with accounting of systematic factors (material anisotropy and presence of elastic suspension), requirements for resonator material stated, way of frequency convergence by method of mass removing with balancing results modeling shown.

Keywords: ring resonator, anisotropy, finite element method, balancing adjustment

Maltsev P. P., Matveenko O. V., Gnatyuk D. L., Lisitskiy A. P., Fedorov Yu. V. *Lines of Development of 5 GHz Integrated Planar Antennas with Minimal Size* 45
5 GHz multilayer antennas, based on metamaterials and tunable antennas are examined relying on the criterion of size reduction. Size reduction is resulted from multilayer antenna realization.

Keywords: antenna, multilayer antenna, small antenna, metamaterials, tunable antenna, circular polarization, circularly polarized antenna

For foreign subscribers:

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

The journal bought since november 1999.

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

ISSN 1813-8586.

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

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

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Телефон редакции журнала **(499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru**
Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

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

Сдано в набор 13.09.2011. Подписано в печать 26.10.2011. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,21. Заказ 777. Цена договорная

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